An Evaluation of Disc Arrangement and Cutterhead Geometry of Current Tunnel Boring Machines

O. Z. Hekimoğlu
Emeritus Professor of Mining Engineering, Mugla Sitki Kocman University, Mugla, 48000, Turkey

ABSTRACT: Adverse geologic face condition is one of the challenging factors effecting machine performance of tunnel boring machines, and a well-balanced cutter head is one of the choices for successful tunnelling operation to overcome such difficult conditions. A correct disposition of disc cutters on the entire cutterhead has a great influence on machine stability and cutting efficiency. Current machines are seen to be laced in combination of spoke and scattered type disc arrangements, despite variety of design configurations exists in practice. No extensive information was, however, found on the relative merits of these patterns. Furthermore, tunnel boring machines have now been overwhelmingly employ flat-face geometry cutterheads, whilst dome or conical type cutterheads which were used previously are no longer common. Conclusive information on the superiority of flat-face cutterheads over those of dome or conical types does not, however, exist. In this paper, the cutter head design of current tunnel boring machines were evaluated, in terms of disc arrangements and cutting head geometry, on dynamic and kinematic bases. It was noted that scattered type disc arrangement with equal angular spacing may be better-balanced than spoke type design, and flat type cutter heads may offer better steering action than conical or domed type cutter heads, when all are compared in adverse geologic conditions, respectively.

1 INTRODUCTION

Tunnel boring machines (TBM) employing disc type cutters, are commonly employed in tunnel constructions. The overall arrangement or the disposition of the cutter tools, i.e. locating the cutter tools at their correct cutting positions on the entire cutting head, known as cutter head design or tool lacing, significantly affect the magnitude and variation of disc forces. Cutter head design of TBMs, thereby, emerges to be important for efficient machine performance, and it involves the consideration of several factors.

In cutterhead design, selection of disc types and specifying cutter head dimensions including provision of loading buckets and man holes for a particular rock formation are the first step parameters to be considered. This procedure will, then, be followed by proper arrangements of disc cutters on the entire cutting head shell.

Studies on rock cutting with discs are largely based upon laboratory trials with respect to the characteristics of certain fundamental parameters, such as relationships between disc forces and spacing (s) to depth of penetration (p) ratio, in combinations with rock and cutter tool characteristics, as depicted in Figure 1. The disc forces are resolved into three mutual components, namely Rolling, Thrust and Sideway Forces. Rolling forces actively cut the rock material during disc rotation, while the thrust forces hold the disc at a given depth of penetration. The magnitude of disc forces varies with tool spacing and depth of penetration. Specific energy which is defined as the energy spent to cut a unit volume of rock material, is

considered as a measure of cutting efficiency which changes with spacing to penetration (s/p) ratios. Fundamental investigations on disc cutting are explained in details, elsewhere (Roxborough & Rispin, 1973; Roxborough & Philips, 1975; Ozdemir, 1977; Bilgin, 1977).

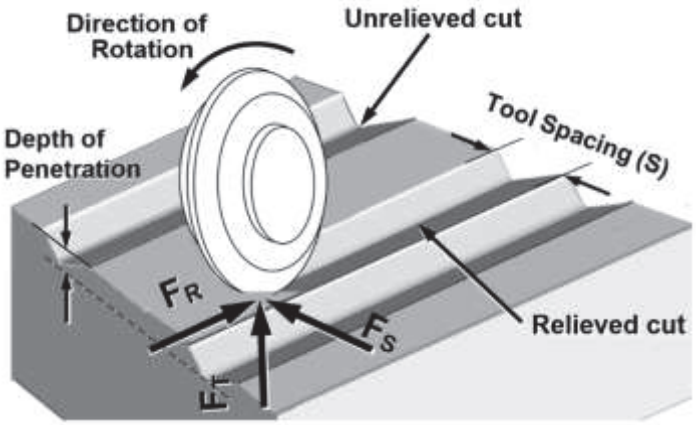


Figure 1. Description of fundamental parameters in rock cutting with discs; FR = Rolling force, FT = Thrust force and FS = Side force.

In cutter head design or tool lacing cutting tools are disposed on the surface of the cutting head in arrays to cut in sequences to obtain assistance from the action of preceding cutters. In such sequential cutting process, spacing between successive cutters, termed as angular spacing (Θ), also emerges to be important along with spacing and penetration. One of the typical disc arrangements on the cutter head of current TBMs is shown in Figure 2. The discs with the axes orientated perpendicularly to the cutter head surface are known as the face discs, while those progressively tilted from the edge of flat face towards the outermost periphery of the cutter head, are called 'gauge cutters' as illustrated in Figure 2b. It is to note that in mechanical excavation whether by roller cutters or drag tools, the gauge cutters or corner cutters are a must for all types of cutter heads since they provide smooth transition from the face towards the corner to avoid confined cutting.

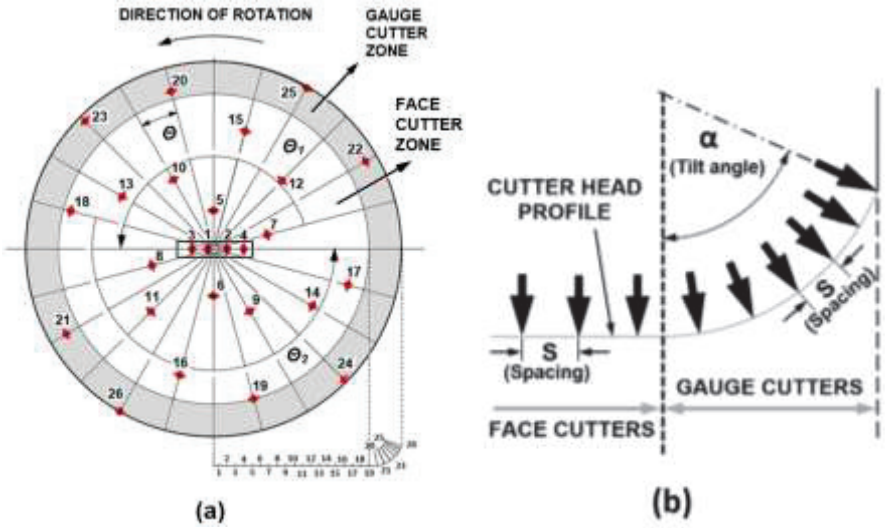


Figure 2. Fundamental parameters in cutting head design of TBMs; (a) projection of the disc cutters on a plane perpendicular to the axis of cutter head, (b) gauge cutters projected on a plane parallel to the axis of cutter head (Θ is angular spacing).

Extensive laboratory rock cutting investigations specifically aiming at cutter head design of TBMs are very limited in the published literature. A number of laboratory disc cutting studies was carried out at Colorado School of Mines in U.S.A on comparing five different modes of cutting positions through linear cutting trials where adjacent discs are arranged to cut in symmetric and asymmetric fashions (Ozdemir, 1977). It was inferred that notably high side forces occur together with rolling forces when the adjacent discs are cutting in an asymmetric fashion. The findings of this research were also confirmed by an investigation performed at the University of Newcastle Upon Tyne, UK, on laboratory simulation of TBM cutter heads (Fauvel, 1981).

Various tool lacing patterns have been employed for TBM cutter heads, in practice. With the current cutterheads, the discs are mainly laced in the form of spoke and scattered type arrangements or having the combinations of these two patterns, as shown in Figure 3. It is inevitable that each of these lacing arrangements absolutely possesses certain distinct different characteristics, with several positive and negative impacts on machine performance. In spite of the differences in the lacıng patterns employed in practice for TBMs, the number of studies on the relative merits of different cutter head designs particularly in terms of cutter head balance is rather limited. Rostami (2008) explained the principal concepts considered in the design of TBM cutterheads for hard rocks together with a general approach for developing an optimum design conditions. It was stated that better cutter head balance can be obtained with proper design concepts. Furthermore, the flat shaped cutterheads were stated to be more efficient, easier, and more convenient to maintain; and the ease of changing cutters at the back plate was reported to be one of the advantages for flat shape cutter heads (Rostami & Chang, 2017). Flat faced cutter heads were reported to be suitable for hard rock at smaller depth of advance, while domed cutter heads generally run more smoothly in broken rock conditions (Lislerud, 1997). TBM cutter heads with radial, spiral, and uniformly distributed lace designs were compared. It was stated that the cutters, buckets, and manholes on the cutter head surface can be distributed with no boundary conflicts, and low unbalanced forces and moments, can be obtained if they are uniformly and symmetrically arranged on the entire cutter head (Farrokh, 2021).

(a) **(b)** **(c)**

Figure 3. Types of disc arrangement on TBM cutter heads; (a) a spoke or star type cutter head (Robbins Company), (b) a scattered type cutter head (Herrenknecht Company), (c) a combined type cutter head (Robbins Company).

This paper investigates the characteristics of various tool lacing arrangements commonly employed for current TBMs' cutter head. Some common design patterns were compared in terms of tool force distribution and cutter head balance on dynamic and kinematic bases, with special reference to the findings of previous researches. Similarly, a comparison between flat cutter heads and non-flat (domed or coned) cutter heads was also carried out.

2 FUNDAMENTAL PARAMETERS IN CUTTER HEAD DESIGN OF TBMS

Before proceeding to the arrangement of disc cutters on the cutter head of a TBM, it is prudent to specify disc characteristics, such as disc diameter with respect to cutter load capacity, level of disc forces and cutter velocity limit. Discs with higher diameters up to 483 mm (19 in) are generally employed for hard and abrasive cutting conditions. Smaller diameter discs are, however, preferred for machines of smaller diameter. Detailed information on these topics can be found elsewhere (Rostami & Chang, 2017).

2.1 Spacing and Depth of Penetration

Distance between the adjacent discs is one of the important parameter effecting the magnitude of disc forces, and is considered together with depth of penetration (p). Early laboratory linear cutting trials performed on trimmed flat rock surface with 'V' type disc cutters indicated that minimum specific energy occurs, in general. at s/p ratios of 7 and 8, and it tends to increase after this value until the interactions between adjacent grooves ceases to exist. The specific energy was, however, shown to keep decreasing with higher spacing values after this optimum ratio, when each level of neighboring cuts is progressively deepened to form successive layers of grooves, known as 'groove deepening' (Roxborough & Philips, 1975), (Ozdemir, 1977), (Fauvel, 1981). High value of spacing at or beyond this optimum value was recommended, due to the fact that cutters are more prone to wear at close spacing, along with decreased cutting efficiency. It was further stated that with wider spacing, less number of cutters are to be fitted on the cutter head, hence lowered cutter cost per unit volume of rock excavated is obtained (Ozdemir, 1977), The optimum range of s/p ratio is also affected by rock characteristics, in such that it increases with rock brittleness. It was reported that s/p ratios between 10 and 20 is commonly considered in practice for TBM cutter heads (Rostami & Chang, 2017).

The state of breakout between adjacent grooves, e.g. chip occurrence is, however, not always consistent during above-mentioned groove deepening cutting process. A cycle of events associated with a pair of incrementally deepened adjacent grooves was reported to occur in intact rock with three stages (Howarth & Roxborough 1982), as shown in Figure. 4. In the first stage, the tool forces and rock yield are small as no interaction occurs between the grooves, when the cuts are carried out on a fresh rock surface. At the second stage, the groves are deepened by successive passes, and no breakthrough happens. The disc forces are, therefore, maximum and the yield is small, due to increased contact area between rock and the disc.

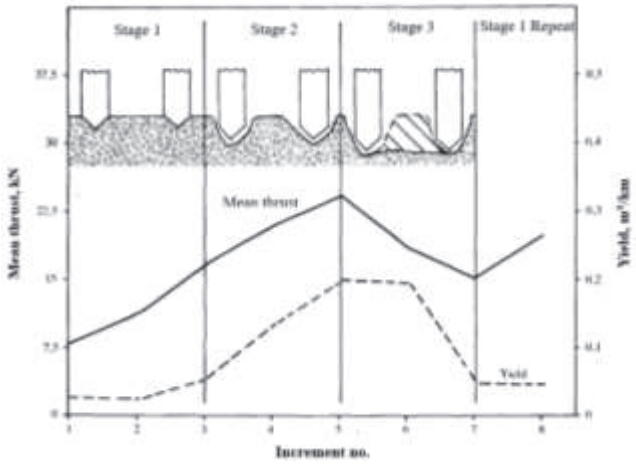


Figure 4. Cyclic deepening of grooves in three stages (Howarth & Roxborough, 1982)

At the third stage, the rock yield is maximum as the ridge between adjacent grooves is sheared through with the next pass at the same incremental value, and the cycle will be repeated after this stage. It was stated that, cutting tools operating in such a cyclic deepening mode will wear more quickly than corresponding tool which is arranged to cut at optimally relieved situation, due to increased rubbing area between the disc and the rock, and the increased disc forces.

Cyclic deepening of grooves was also found when a series of disc cutting experiments was carried out on rocksalt specimens with 30 MPa Uniaxial Compressive Strength by using 'V' type discs with 40^0 and 60^0 edge angle respectively (Hekimoglu 1984). Initial trials performed on trimmed flat rock surface, showed that minimum specific energy was obtained at s/p ratio of 7 and interaction between adjacent grooves gradually ceased after this optimum value. The next experiments were conducted in groove deepening mode where the rock surface was preconditioned until a stable cutting regime was reached, and successive passes were, then, carried out at the same depth increments as described in Figure 5.

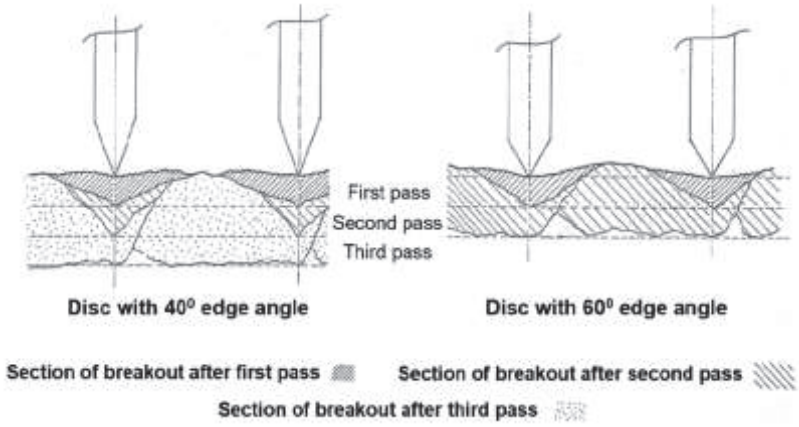


Figure 5. Notation of cyclic deepening of grooves in rocksalt (Hekimoglu, 1984).

Unlike the initial trials on flat rock surface, the specific energy kept decreasing towards higher tool spacing well beyond the optimum value, due to resumption of interaction between neighbouring grooves (Fig. 6). Cyclic deepening of grooves was observed to occur at higher s/p ratios with different trends according to the value of disc edge angles, as depicted in Fig. 5.

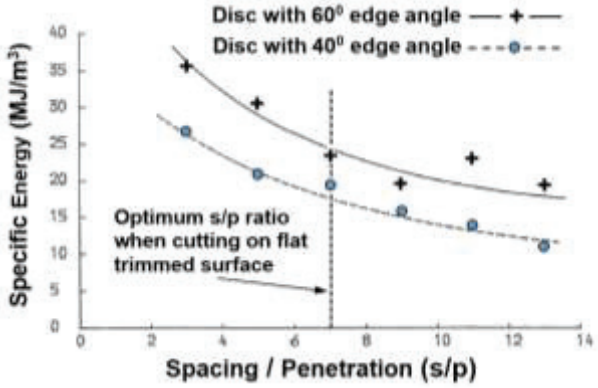


Figure 6. Variation of specific energy wıth s/p ratio in groove deepening cutting (Hekimoglu, 1984).

There was great difference in rock yields between each successive passes for the disc with 40^0 edge angle where cyclic rock breakthrough was observed to repeat in every three passes, i.e. cyclic breakthrough occurred in three stages. With discs of 60^0 edge angle, the amount of rock yield obtained during the first pass was, however, slightly lower than the next pass, and this trend was consistent with the all successive passes, indicating a two-stage cyclic breakthrough. It is important to note that V type disc cutters have now been replaced by 'constant cross

section' discs which exhibit a slender cutting face. It may be put forward that the slim cutting geometry of the current constant cross section discs might render the cutters liable to above-mentioned cyclic deepening.

The depth of penetration is one of the primary factor considered in cutting head design, and is defined as vertical distance from the cut surface to the tool edge in relation to the position of adjacent tools cutting along a horizontal line as, in laboratory cutting conditions (Fig. 1). Laboratory investigations on depth of penetration and other fundamental parameters were mainly carried out in this fashion. The results of these studies have been commonly considered in cutter head design of TBMs. It is, however, important to note that such tool positions appear to be different if the actual cutting action of TBM cutter heads are taken into account.

TBMs are a type of axial motion machines where the axis of cutter head rotation is in-line with the direction of advance. The tools, hence, describe a helical motion by tracing a spiral path with a pitch equal to the advance per revolution (APR), and the cutting direction is, therefore, no longer parallel to the direction of advance. Under such circumstances, the effective depth of cut or effective depth of penetration may be calculated as follows:

$$EDP = APR \cos\left(\tan^{-1}\left(APR / 2\pi r\right)\right) \quad (2)$$

Where;
EDP = Effective depth of penetration (mm),
APR = Advance per revolution of the cutter head (mm),
r = Cutting radius or the distance from the centre of the disc to the centre of the cutting head (mm).

It is to note that the innermost cutter being closest to the cutter head centre is effected most by this situation, i.e. the effect diminishes drastically away from the centre to the periphery. The effective depth of penetration for the innermost cutters, however, appears to approximate to the nominal depth of penetration if the dimensional and operational characteristics of the practical TBMs are considered. For example, with the current TBMs, the distance from the centre of the cutter head to the centre of the closest disc cutter is not less than about 80 mm. The effective depth of penetration for this particular disc would, then, be 9.998 mm if 10 mm advance per revolution is assumed. It may, then, be put forward that the effective depth taken by discs fitted on the current TBMs may not be affected by this situation.

2.2 Cutterhead Geometry

Cutter head geometry denotes the shape bordered by the lines and curves (also called perimeter) passing through the tip of the cutters, when viewed on a horizontal plane along the axis of the machine. The disk cutters are generally arranged in the form of face cutters and gauge cutters, regardless of cutter head type. A cutter head geometry can take either a flat or non-flat shapes. With flat type cutter heads, as the name suggests, the axes of face disks are perpendicular to a straight line orientated normal the cutter head axis (Fig. 7a).

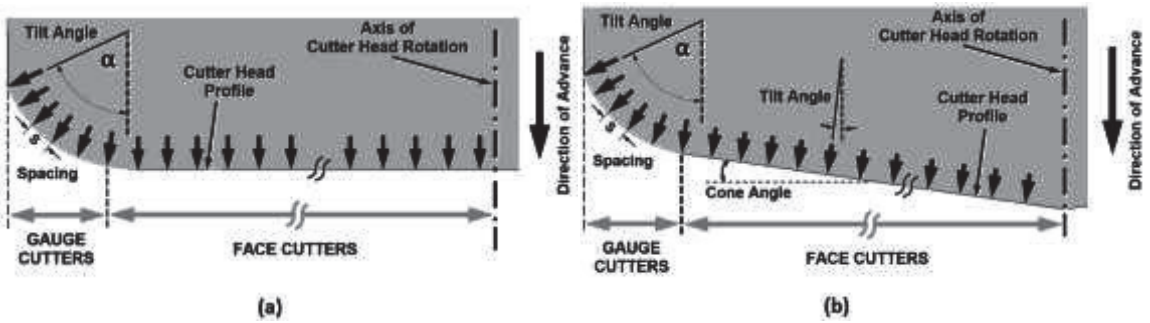


Figure 7. TBM cutterheads (a) with flat geometry and (b) with conical geometry.

The cutter head geometry is termed conical, if the axes of face disks are normal to the surface of an inclined straight line, i.e. the disc axes are tilted with respect to the machine axis along the conical surface, as illustrated in Figure 7b. With domed type cutter heads the perimeter described by the face disks takes a form of curve rather than a straight line, as opposed to the flat and conical type cutter heads, and the tool axis is generally positioned perpendicularly to the tangent line at the intersection of the perimeter. Conical and domed type geometries are inevitably classified within the category of non-flat cutter heads, and they have been phased out, and now been replaced by flat geometry types.

The cutter head of a TBM is subject to the adverse effects of various reaction forces during cutting process. These forces act on the cutter head axis in vertical (F_Y), horizontal (F_X) and axial (F_Z) directions. Furthermore, the Torque (T) is the another factor acting against the rotational movement of the cutter head (Fig. 8). Both the magnitude and the direction of these reaction forces crucially effect steering ability of the machine, since they cause diversion from the course of desired advance direction. It may, therefore, prove to be useful to compare flat type cutter heads to non-flat type geometries on a dynamic basis with special reference to the characteristics of these reaction forces.

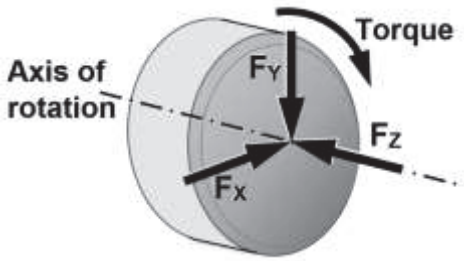


Figure 8. Depiction of reaction forces and torque acting on the cutter head axis in three dimensions.

Considering the components of disc forces, Thrust Force (F_T), Rolling Force (F_R) and Side Force (F_S) on X, Y and Z planes, respectively, the magnitudes of reaction forces acting on the cutter head axis with respect to angular position during one revolution of the cutter head can be expressed as follows;

$$F_X = \Sigma [F_T \cos \Theta \sin \alpha - F_R \sin \Theta \pm FS \cos \Theta \cos \alpha] \quad (3)$$
$$F_Y = \Sigma [F_T \sin \Theta \sin \alpha + F_R \cos \Theta \pm F_S \sin \Theta \cos \alpha] \quad (4)$$
$$F_Z = \Sigma [F_T \cos \alpha + F_S \sin \alpha] \quad (5)$$

Where;
F_X = Horizontal Reaction force (N),
F_V = Vertical Reaction force (N),
F_Z = Axial Reaction force (N),
Θ = Angular position of cutter disc during one revolution of the cutter head (degree),
α = Tilt angle of disc cutter (degree).

The above equations can be employed to assess the level of fluctuations in horizontal and vertical reaction forces during one revolution of the cutter head, thereby denoting the cutter head balance, to a certain extent. Among the reaction forces, the axial component (F_Z) is independent from the angular position, and it also accounts for both magnitude and direction of eccentric forces acting perpendicularly on the cutter head surface. The direction of side force can be either negative or positive, as it acts on a disc cutter in either direction depending upon the tool position. Nearly all laboratory trials indicated positive direction. However, it was found to be negative, to a lesser extent, particularly at lower tool spacing below the optimum

s/p ratio, during angled surface disc cutting trials where asymmetric cutting was the case (Fauvel, 1981). The sign of side force might, therefore, be assumed positive, since tool spacing employed with the current TBMs is generally above the optimum value, and the cutting mode is predominantly asymmetric.

Both the thrust and side force components are seen to be effective in all directions of the above-mentioned reaction forces, while rolling forces act only in horizontal and vertical directions. The thrust force component inevitably has the highest magnitude among all, reaching up to 10 folds of rolling force, in most cases. Furthermore, the side force, though incomparable with the magnitude of thrust force, can be greater than rolling force, when cutting position of discs are asymmetrical. The inclusion of thrust force component in both horizontal and vertical reaction forces is due to the tilt angle of the cutters, and the same is true for side force in axial reactions. With the flat shape cutter heads, only the gauge tools are to be provided with tilt angles, whereas on the non-flat shape cutter heads all of the entire tools are tilted. While the gauge tools are progressively tilted towards the corner wall, the area to be sept by each gauge tool also gradually diminishes, in a manner as depicted in Figure 9.

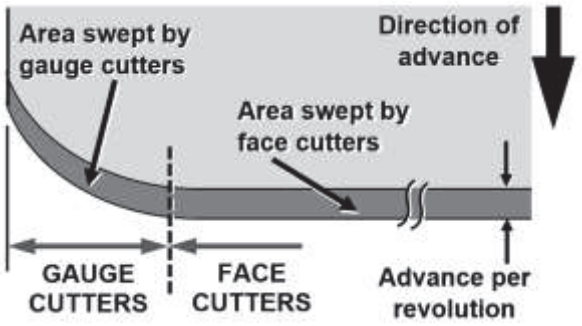


Figure 9. Quantitative description of area swept by face cutters and gauge cutters, respectively, for one revolution of a cutter head with flat geometry.

By virtue of this condition, the disc forces are expected to show a gradual decrease as well. This situation was also confirmed by the results of laboratory simulation of TBM cutter heads, in such a way that forces acting on gauge tools tend to show a decreasing trend as tilt angles increased (Fauvel, 1981). Moreover, the gauge tools do not constitute a great portion on the entire surface of the cutter head compared to that formed by the face cutters. It may, then, be reasonable to neglect the effects of gauge tools in this argument for all cases, due to the fact that total disc forces generated at gauge tool zone are considerably smaller than those of the face cutters. Hence, effects of tilt angle may not be considered with flat-shaped cutter heads, while the opposite is true for domed and cone shaped cutter heads. Under such circumstances, it may, then, be possible to rearrange the above reaction forces for flat type cutter heads as follows;

$$FX = \Sigma [FR \sin \Theta \pm FS \cos \Theta\} \quad (6)$$

$$FY = \Sigma [FR \cos \Theta \pm FS \sin \Theta\} \quad (7)$$

$$FZ = \Sigma [FT] \quad (8)$$

It is seen that the thrust force, the largest component of the disc force, is no longer involved in horizontal and vertical reactions for flat shaped cutter heads, while the side force is not effective in the axial reaction force. The equations (6) (7) and (8), thus, indicate that the magnitudes of reaction forces (especially horizontal and vertical forces) acting on flat type cutter heads would be smaller than those of equivalent cutter heads of domed or conical geometry, when cutting under the same design and rock conditions.

The direction of these reaction forces with respect to the axis of the cutter head rotation is another important issue to be counted, as it has a crucial influence on the balance of the TBMs. A simple comparison between a flat-shaped cutter head and a conical type cutter head with 8^0 cone angle might, then, be made, by using the above equations to determine the state of reaction forces acting on both cutter heads respectively**.** It is inevitable that both types of these cutter heads are said to be balanced in uniform rock conditions, if they are properly designed, whereas the opposite is true when operating in adverse geological conditions. The difference between these lacing patterns would, thereby, be better understood if the comparison is made for adverse geological conditions, since rock formations are not always uniform in tunnelling operations. In order to simplify the comparison, a reference cutting head of 2 m-diameter is considered to operate in the same face conditions, respectively. The cutter head embraces a total of 24 face discs constantly spaced at 80 mm with equal angular spacing. The tunnel face was assumed to be halved by two different rock types in such that the rock at one half of the face is hard, whilst the one at the other half is soft (Fig. 10). The rolling and thrust forces were assumed to be 5 kN and 40 kN for hard rock, and 1 kN and 5 kN for soft rock, respectively, in consideration of previous laboratory disc cutting experiments (Fauvel 1981, Bilgin 1977).

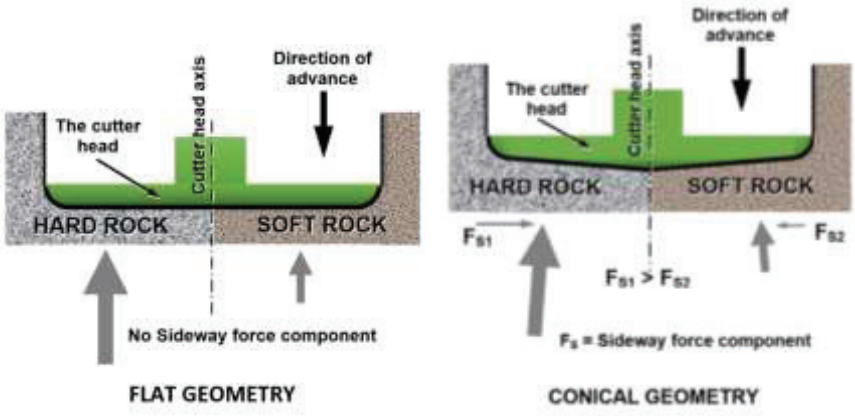


Figure 10. Mixed rock conditions assumed for comparison of reaction forces between flat shape and conical geometry cutter heads.

Fluctuations in horizontal reaction forces calculated by Equation (3) and (6) for flat and conical cutterheads, respectively, are given in Figure 11. It is seen that under the same conditions, the conical cutter heads exhibit higher force values than flat geometry. The fluctuations in vertical reaction forces are not given here, as they show very similar trend to those of the horizontal forces.

The direction of unbalanced forces normal to the cutter head face would appear to be rather axial wise for the flat-shaped cutter head, whereas it tends to act sideways for the conical type cutter heads, as shown in Figure 10. In other words, the resultant axial force does not impose any side force component with flat type geometry, whilst the opposite is true for conical geometry.

This simple analysis may imply that flat geometry cutter heads are likely to exhibit better performance than non-flat-shaped cutter heads in terms of reaction forces and steering ability, within the above-mentioned conditions and assumptions.

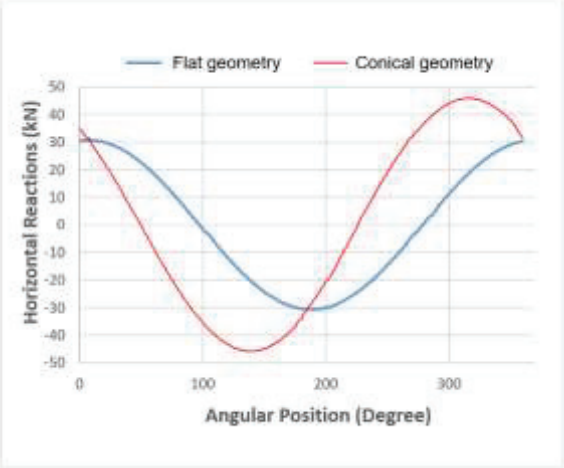


Figure 11. Fluctuations in horizontal reaction forces during one revolution of the cutter head with different geometries.

2.3 Angular Spacing

Angular spacing, as the name suggests, is the angle (Θ) between the radial lines of successive cutters on the cutter head surface (Figure 2). It is one of the important parameter effecting the level of tool forces, and is primarily dictated by the type of tool arrangement employed. It would, therefore, be useful to evaluate the aspects of angular spacing in tool lacings. It is impossible to cover the all ranges of tool arrangements in this paper, since there are numerous lacing combinations exist for cutter head design of TBMs in practice. Thereby, the most common lacings with distinct differences were considered. It may be seen that 'spoke-type', 'scattered-type' and 'combined-type' tool lacings have been common arrangements in practice. With spoke-type design, the face cutters are arranged along diametrical lines, in such that the cutters located in one half of the diameter are counterbalanced by those at the opposing side (Fig. 3a). The number of spokes can vary with angular spacing, and the gauge cutters are usually located between the spoke lines at the periphery. Scattered type lacing is obtained if the cutters are disposed without distinct spokes, whether in regular or random, i.e. the discs are not concentrated along the diametrical lines (Fig. 3b). Combined type design is a combination of spoke and scattered type arrangements (Fig. 3c). It is important to note that spiral arrangement is merely associated with sequential positioning of cutters, and it can be found in both spoke and scattered type lacings.

It was reported that with spoke type lacing, concentration of cutters along specified radial lines on the cutter head structure can lead to stress concentration imposed by thrust and radial forces. This may not be the case with the scattered type lacing, since the cutters are dispersed on the cutter head with certain angular intervals. Furthermore, large free space between the spokes allows the entrance of free rock blocks coming in contact with the cutter head surface during its rotation. It may, then, cause second wear and increase both torque and unbalanced moments (Farrokh, 2021).

In cutter head design of TBMs, it is a crucial issue to allocate the cutters on the entire face with equal duties to achieve well-balanced cutting conditions. Equal force distribution is inevitably a must in this respect, while it is highly challenging to achieve it for every disc. Cutter heads designed in this manner are said to be reasonably balanced, and they are very likely to perform successfully in uniform rock conditions, but in adverse geologic conditions. Differences in the characteristics of spoke type and scattered type lacings may be better understood, if they are compared under adverse geological conditions, respectively.

Five different lacing patterns on a flat type cutting head with different angular spacing, being 180^0, 90^0, 45^0, 30^0, and 15^0, were compared under equal conditions, in terms of fluctuations in horizontal and vertical reaction forces (Fig. 12).

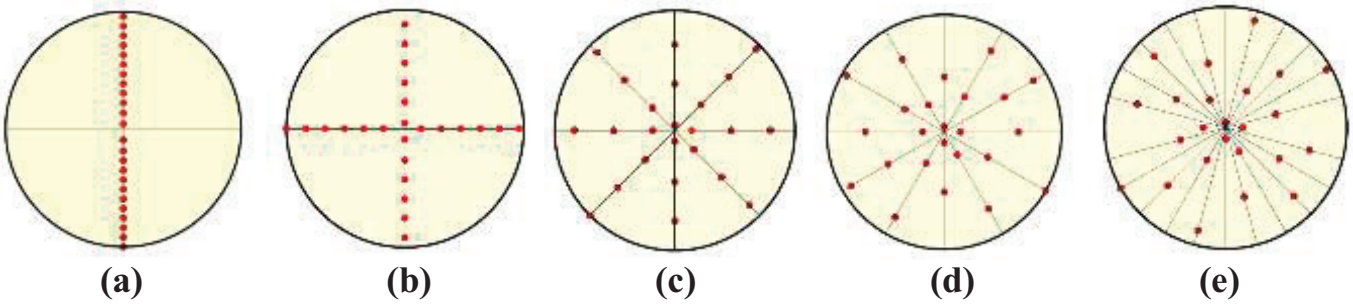


Figure 12. Five different lacing arrangements; (a) 180^0 angular spacing, (b) 90^0 angular spacing, (c) 45^0 angular spacing, (d) 30^0 angular spacing, (e) 15^0 angular spacing,

In order to simplify the comparison, the reference cutting head as mentioned in the previous section was also assumed here for all types of lacings, respectively. A total of 24 discs were considered to be equally distributed on each spoke at equal angular spacing, and no side forces and tilt angles were considered for the sake of simplicity. The condition of tunnel face and magnitude of tool forces given in the previous section were considered here as well. It is important to emphasize that the Lacing 1, though not common in practice, was purposely considered, since it denotes an extreme case of angular spacing. Fluctuations in horizontal and vertical reaction forces calculated for each lacing during one revolution of the cutting head are presented in Figure 13.

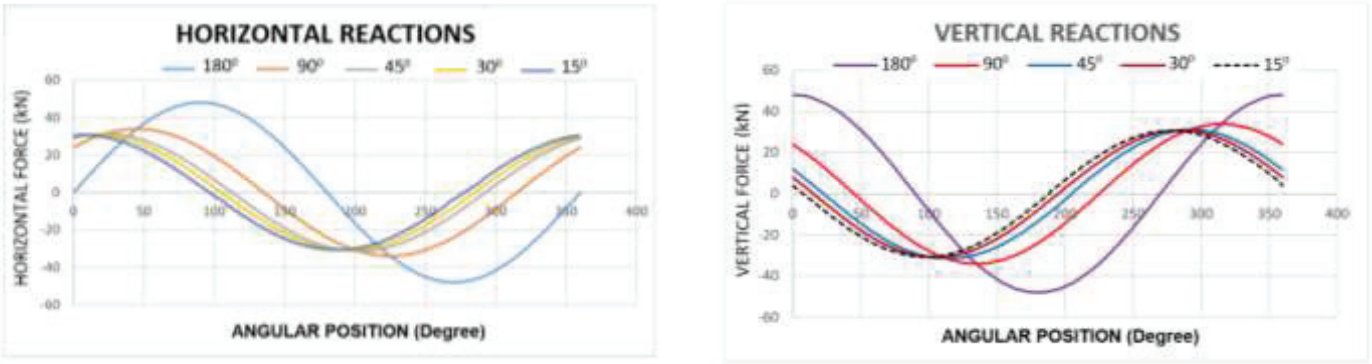


Figure 13. Fluctuations in horizontal and vertical reaction forces for five different angular spacing.

All lacings exhibit the same manner of variation during one revolution of the cutter head, and magnitudes of the reaction forces tend to diminish towards smaller angular spacing. The standard deviation which was adopted as a degree of fluctuations tends to rise slowly at low values, and then abruptly after 45^0, as the angular spacing increases (Fig. 14).

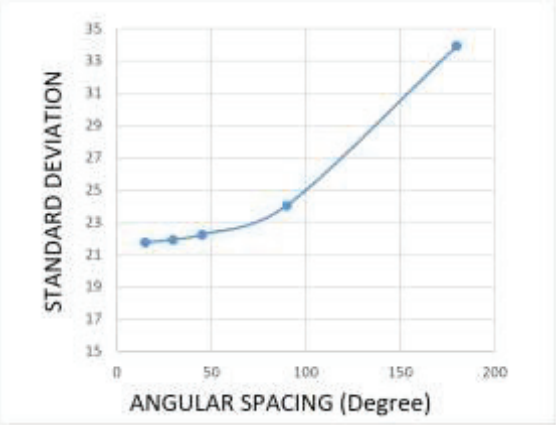


Figure 14. Standard deviations of horizontal and vertical reaction forces for five different lacing patterns.

There was no difference between the values of standard deviations calculated for horizontal and vertical reaction forces respectively. This simple analysis infers that when cutting in mixed face conditions, the cutter head balance in terms of horizontal and vertical reaction forces improves as the spoke type arrangement is gradually transformed to a regularly scattered type, when angular spacing is decreased. The regularly scattered type lacing emerges to be better than spoke type cutter heads, in accordance with the results of this simple analysis. This analysis also infers that spreading the discs with equal angular spacing may be beneficial as to cutter head balance.

3 DISCUSSION

The value of disc spacing employed by the current TBMs is considerably higher than that obtained at optimum s/p ratio. The nominal depth of penetration (DOP) for any type of cutter tools arranged in cutting sequences (or spirals), is generally defined as follows;

DOP = (APR / n) …… (11)
Where;
DOP = Nominal depth of penetration (mm),
n = Number of cutting sequences or spirals.

Considering the fact that two-spiral pattern is common with the current TBMs, the nominal depth of penetration for each cutting sequence, e.g. at 8 mm advance per revolution, would be 4 mm (Fig. 22).

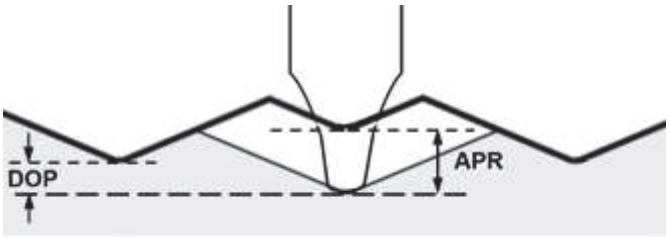


Figure 22. Notation of nominal depth of penetration (DOP) for a disc cutter with symmetric cutting position with respect to the adjacent discs of preceding sequence in a two sequence cutter head.

The s/p ratio for 90 mm tool spacing, then, emerges to be around 22, being well above the optimum value. Such higher spacing values might not be advantageous in terms of adverse cyclic deepening action occurring at higher s/p ratios, as mentioned in this paper. The increased

spacing, however, poses a different trend, in terms of minimizing adverse side forces in accordance with the previous laboratory trials carried out on level rock surface. Mean side forces were shown to decrease by 50 % when disc spacing was doubled (Ozdemir 1977). At the other hand, mean side forces were reported to diminish up to the optimum s/p ratio and then tended to be constant towards higher spacing after this value, whereas it exhibited different trend with relieved inclined surface trials (Fauvel, 1981). This manner of decrease may, though, be helpful, it does, however, not suffice to minimize the side forces, since the magnitudes are still much higher than that occurring in symmetrical cutting mode. It may, then, be put forward that moderate spacing values just above the optimum value might be reasonable to consider for TBM cutter heads to avoid cycling deepening.

4 CONCLUSIONS

Dominant tool lacing parameters, namely tool spacing, depth of penetration and angular spacing along with disc cutting positions, are evaluated for TBM cutter heads in terms of actual cutting action of discs with special reference to the results of previous laboratory simulation trials. Based upon the explanations presented in this paper, following conclusions may be drawn:

(1) Scattering the discs with equal angular spacing on the entire cutting head may prevent the adverse effect of simultaneous loading caused by a group of cutters radially located along a spoke of cutter head, in mixed face conditions. In this respect, scattered type disc arrangement with equal angular spacing emerge to be better than cutter heads with spoke or star type lacing.

(2) Cutter heads with face geometry may offer better steering abilities than conical or domed type cutter heads in mixed face conditions, in terms of reaction forces.

(3) Increasing the disc spacing with a value much more than the optimum spacing to penetration (s/p) ratio might not be advantageous in terms of adverse cyclic deepening.

ACKNOWLEDGEMENT

The author wishes to thank to Dr. R. J. Fowell (Reader in Mining Engineering), formerly at the University of Newcastle Upon Tyne (U.K.), now at the University of Leeds, for his invaluable supervision and sincere help, during the research on disc cutting of rocksalt, at the University of Newcastle Upon Tyne. The views presented here are those of the author's own.

REFERENCES

Bilgin, N. (1977). "Investigations into the Mechanical Cutting Characteristics of Some Medium and High Strength Rocks",Ph.D. Thesis, Univ. of Newcastle upon Tyne, June, 1977.

Farrokh, E, (2021) Uniformly distributed lace design for hard rock TBMs, Tunnelling and Underground Space Technology, 110 (2021) 103829.

Fauvel OR, (1981). Implications of Laboratory Rock Cutting for the Design of a Tunnel Boring Machine Cutter Head, Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne. July.

Hekimoglu, OZ, (2014). Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural stones, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 72, December, pp. 230-241.

Hekimoglu, OZ, Ozdemir, L, (2004). Effects of Angle of Wrap on the Performance of Continuous Miners and Drum Shearers, Trans. Inst. Min. Metall. A, Vol. 113, No. 2.

Ozdemir, L, (1977). Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability. Ph.D Thesis, Colorado School of Mines.

Rostami, J, (2008). Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction, Geomech Tunn 2008;1(1):18–28.

Rostami, J, Chang, (2017). SE, A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring Machines, Engineering. Volume 3, Issue 6, December 2017. Pages 892-904.

Roxborough, FF, Rispin, (1975). A Mechanical cutting characteristics of the Lower Chalk, Report to the Transport and Road Research Laboratory of the Department of the Environment, University of Newcastle Upon Tyne (UK).

Roxborough, FF, Phillips, H R, (1975). Rock Excavation by Disc Cutter. Int. J. Rock Mech & Min. Sci, Vol.12, pp.36-36.

T1 NATM Tunnel conversion to TBM on The Esme-Salihli High Speed Railway Project

İ. Dağ
Kolin İnşaat Turizm Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ankara, Turkey

Ö. Durukan, I. Sáenz de Santa María Gatón
TMD: Tünel Mühendisliği ve Danışmanlık Limited Şirketi., İstanbul, Türkiye

ABSTRACT: Kolin İnşaat and the Turkish State Railways (TCDD) have successfully completed the construction of the T-1 Tunnel, which is 3.05 km long, on the Esme-Salihli Section of the Ankara-Izmir High Speed Railway Project. Originally, this tunnel was planned to be an NATM Tunnel, but due to the complex geology and tight project schedule, a feasibility study was requested from TMD to analyze whether it could be excavated by means of TBM. The feasibility study considered all aspects of the tunnel, including the construction process, operational and ventilation requirements, as well as compliance with NFPA safety regulations. As a result, a TBM Tunnel was chosen as the best option. The tunnel was completed in only six months, setting new world records for the best daily (32.4 m), weekly (196.2 m), and monthly (730.8 m) advance rates in the 13 to 14 m diameter range. This success story sets an example for the future tunnel projects.

1 GEOLOGY

The tunnel is situated in the Aegean Region, which is predominantly composed of metamorphic rock formations. Above this, a younger layer of sedimentary rock is present, and this entire system is referred to as the Menderes Masif System. Figure 1 provides an overview of the general geology in the project area.

The tunnel geology consists of Neojen terrigenous deposits consisting in gravel stone, sandstone, claystone and siltsone. These units are at tunnel level, generally medium – highly wheathered (W3 – W4) and brownish coloured with medium – poor strength (R3 – R4).

The TBM machine commenced boring through altered gneiss and subsequently traversed through a mélange comprising a combination of gneiss, sandstone, claystone, mudstone, quartz, and silt. Towards the end of the excavation, the machine was predominantly boring through mudstone.

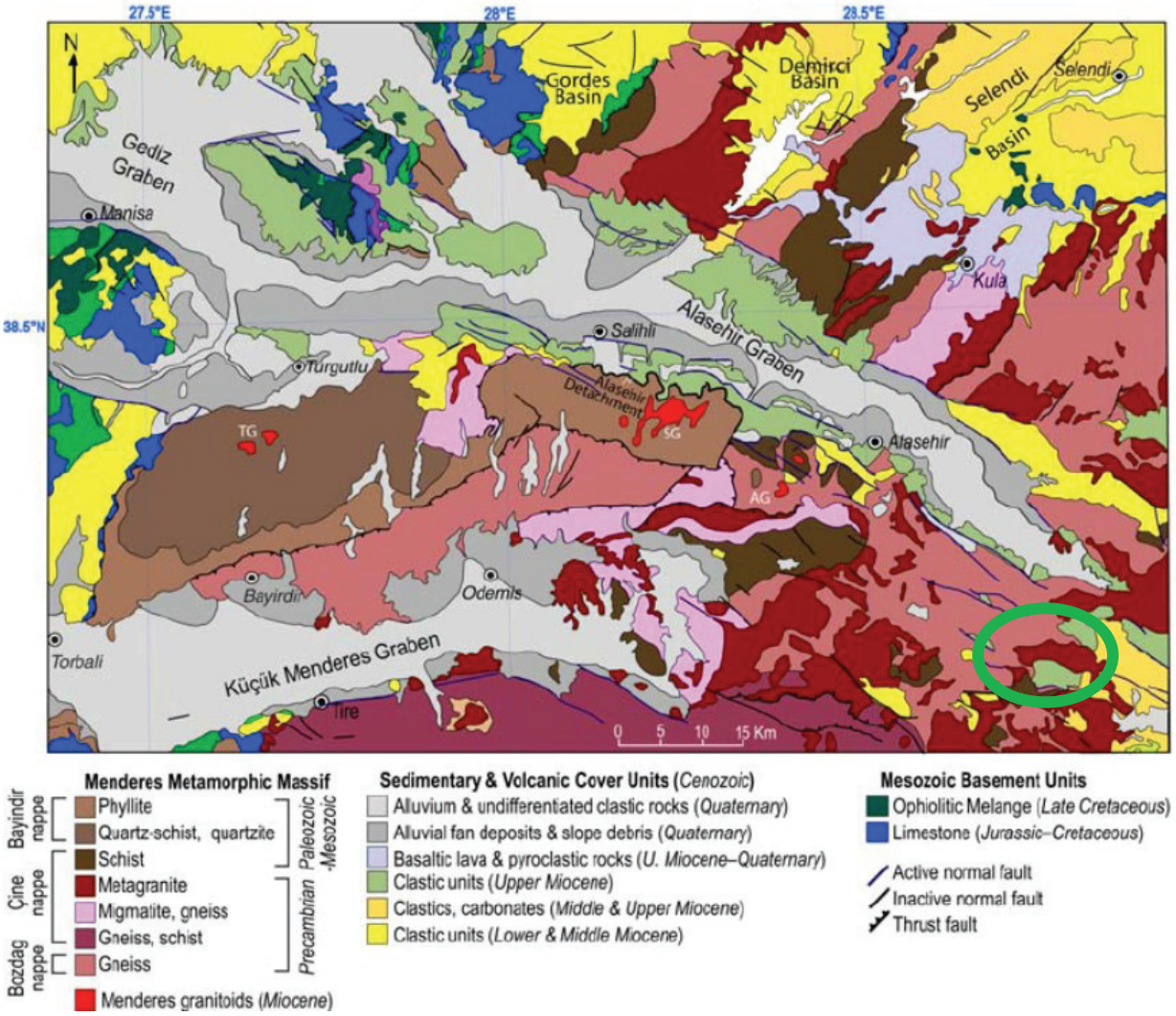


Figure 1. General geology of project area (Green circle refers to tunnel location)

2 TBM FEASIBILITY

2.1 TBM Main Characteristics

The proposed TBM proposed by contractor had been manufactured by Robbins and is a mixed shielded TBM suitable to excavate as a rock TBM in open mode or like an EPB machine. The cutter-head is designed to cope with a mix condition. TBM main specification are in Table 1.

Table 1. TBM main specification

Total length	13700mm
Shield length	12950mm
Excavation diameter	13690mm (new discs) – 13730mm (max overcut)
Outer diameter of front shield	13620mm
Outer diameter of rear shield	13620mm
Grout ports	Through segments
Probe ports	N=30, ϕ=125mm, incl 7°
Bentonite injection ports	N=32, ϕ=50mm, incl 90°
Cutters	N=81, 19” interchangeable with soil rippers
Cutter-head power	N=19 x 220kW
Cutter-head speed	EPB → 0-2rpm; Rock → 0-4.6rpm
Cutter-head torque	Nominal=52.229kNm -Breakout=73.844kNm
Cutter-head thrust	Maximum 25.110kN -
Total thrust	Maximum=216.577kN – Exceptional=282.492kN
Articulate thrust	Maximum=141.400kN
Screw conveyor 1200mm	1.408m^3/h
Conveyor belt	1.963m^3/h

2.2 Applicability

In order to compare this machine with equivalent ones for the same diameters the Thrust and Torque have been inserted in two graphs (Figures 2 and 3) showing these values as a function of diameter for TBM-Single Shield as per (Ates et al., 2014).

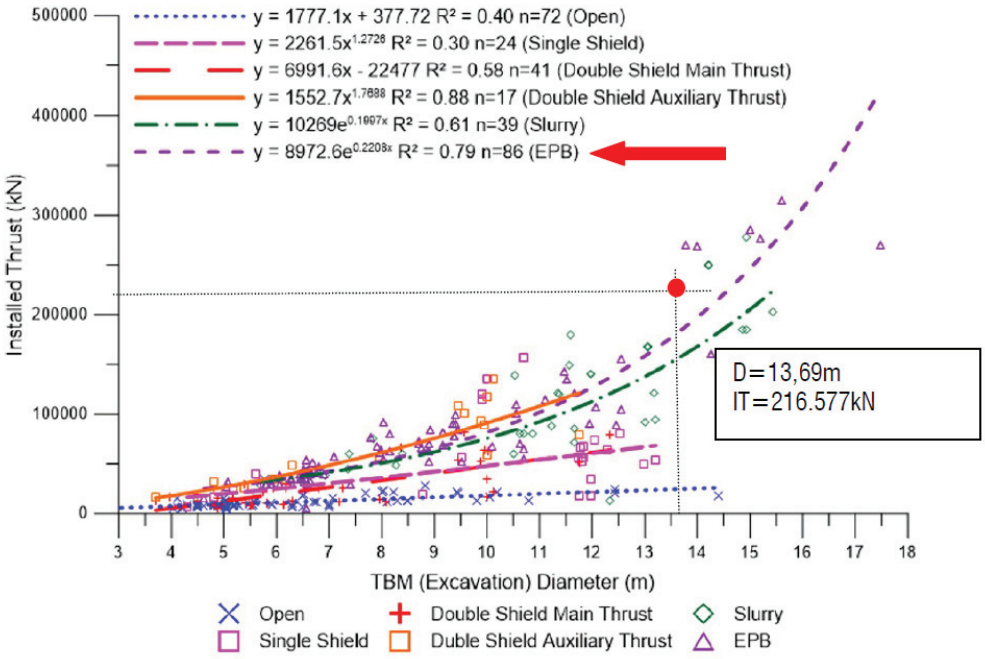


Figure 2. Thrust as a function of diameter for TBM-Single Shield

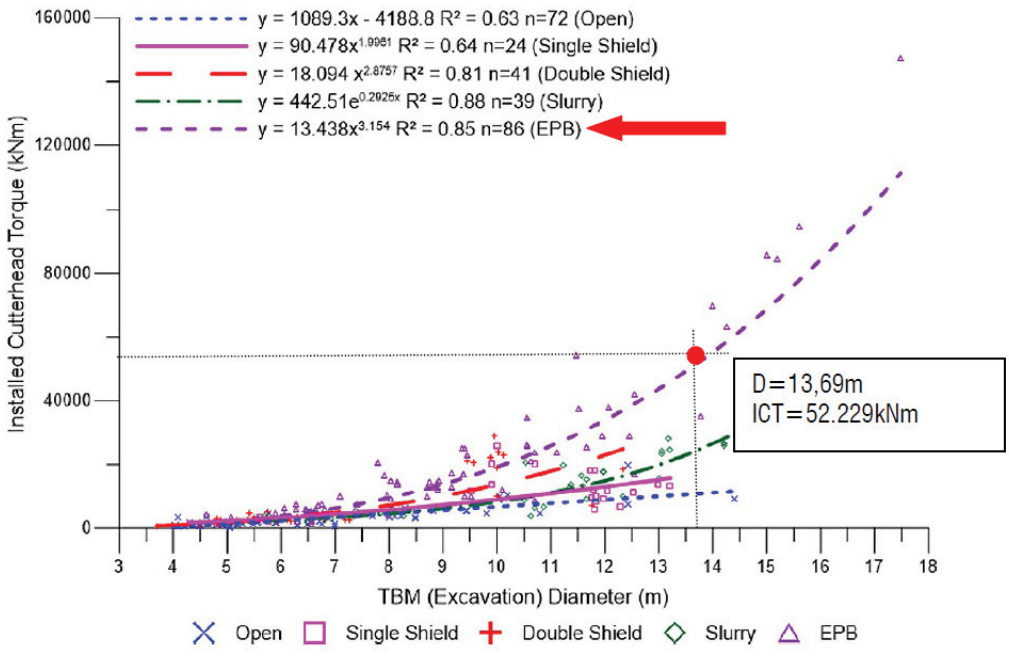


Figure 3. Torque as a function of diameter for TBM-Single Shield

The TBM is perfectly fitting the curve for an EPB machine while is over-dimensioned as a rock shield machine, which is advantageous: in fact while working as a normal rock machine the TBM will be always able to move forward, while working as EPB it is perfectly fitting with the usual numbers for this kind of diameter.

Nevertheless, it must be pointed out that the shield is fully cylindrical thus reducing the possibility of the TBM to cope with squeezing condition. However, the absence of conicity of the shield is compensated by the high machine power.

Also it is to be considered the fact that the heterogeneity of the material could require some effort and excavation mode changing while driving in the opening ration of the cutter-head.

All in all it was concluded the TBM was well dimensioned as EPB machine and therefore a very powerful rock shield TBM.

2.3 Proposed Segmental Lining

The proposed ring is universal type with a 8+0 segments, skewed (inclined) flat joints between segments, guiding rods and bolts in the radial (segment to segment) joints and plastic connectors in the circumferential (ring to ring) joints. The inner diameter is 12500mm while segments' thickness is 450mm and average length is 1800mm. Ring main features are indicated in Figure 4 and Table 2 below.

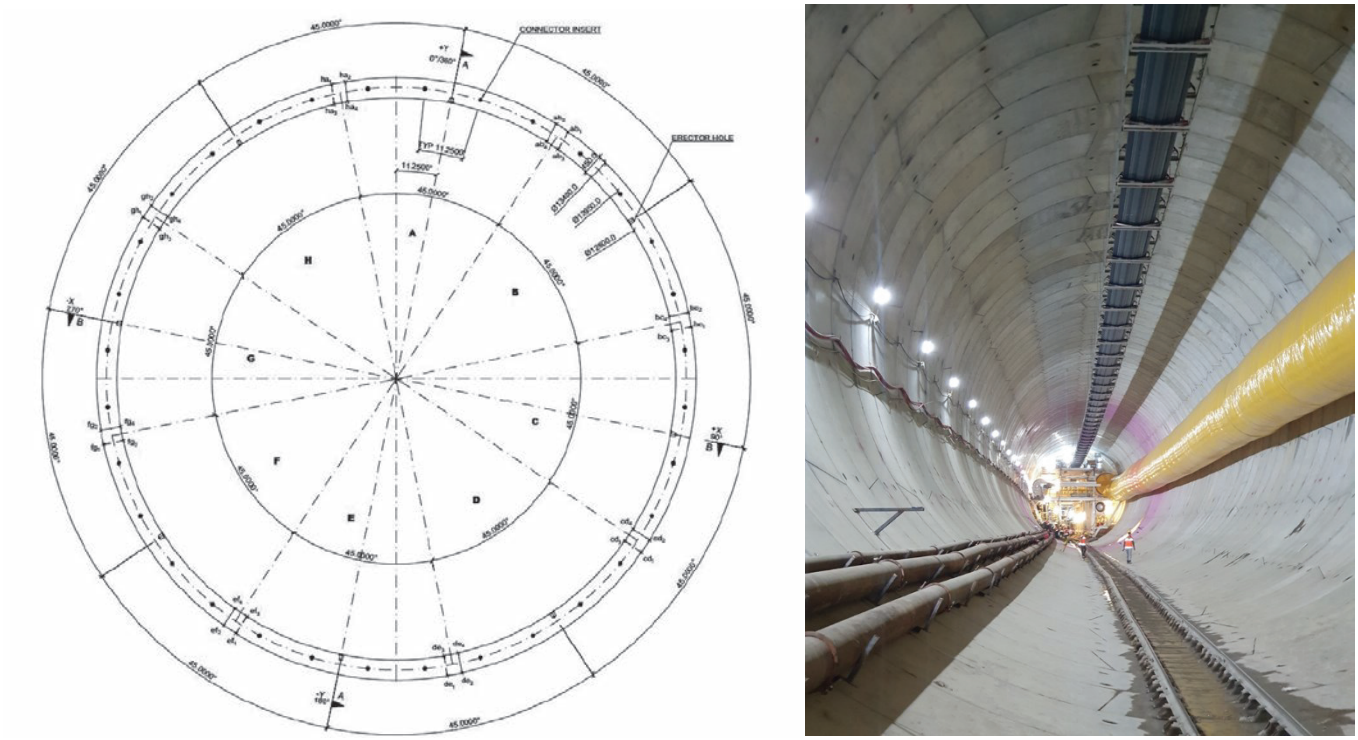


Figure 4. Ring geometry

Table 2. Ring main features

Ring type	Universal, 8+0
Inner diameter (D_{Int})	12.500mm
External diameter (D_{Ext})	13.400mm
Thickness	450mm
Average length	1.800mm
Ring taper (t/2)	±35mm
Available erecting positions	16
Concrete Class (EC2)	C50/60
Connections between segments (radial joint)	Not Used
Connections between rings (circumferential joint)	32 connectors (Type ASR84-46-274)
Water tightness	Sealing gaskets 26mm (Type FIP T143-005), 1 row on each joint (longitudinal and circumferential)

In order to assess the adequacy of the segment thickness in this early project stage a 2 step process was followed in the feasibility study. Firstly, by comparing with similar projects Worldwinde (Valle et al., 2016). Mentioned study shows how a strong linear relationship exists between the lining wall thickness and tunnel's internal diameter and suitability of chosen segment thickness. Accordingly, as shown in following Figure 5, a 500 mm thickness was initially assesses in line with past experience worldwide.

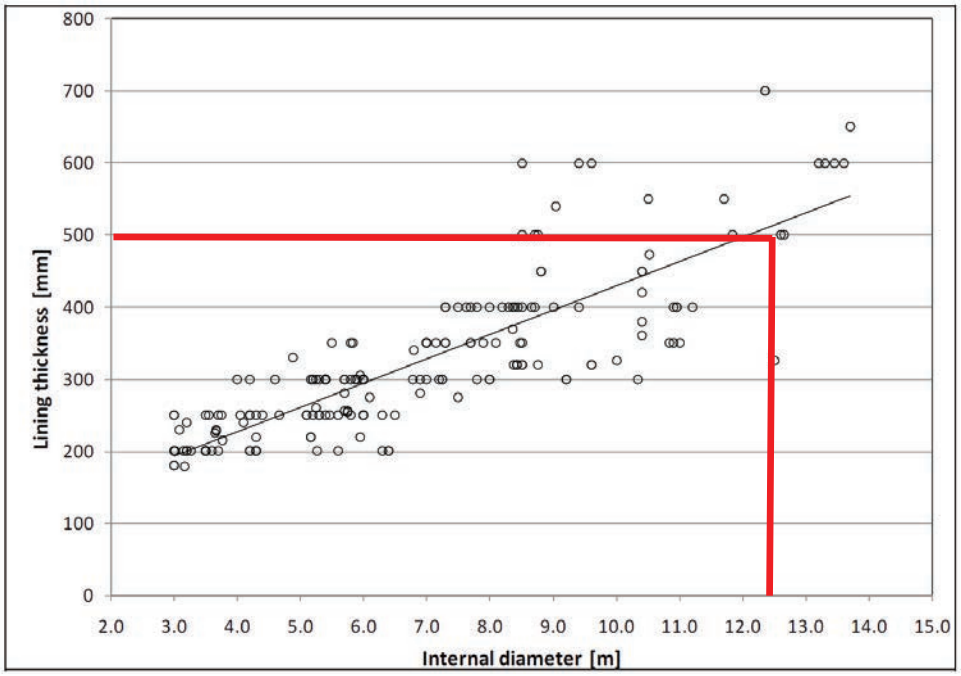


Figure 5. Lining thickness as a function of Internal Diameter

In the subsequent analysis stage, a quick calculation was performed using a closed form solution formula (Duddeck et al., 1982) in order to fine-tune the segment thickness. The results indicated that a thickness of 450mm would be sufficient, and a minimum concrete class of C50/60 would be appropriate for the majority of the alignment. Heavy reinforced segments would be necessary only along portal areas, emergency exit locations, low overburden slope sections and poor geotechnical parameters stretches.

3 TUNNEL SECTION GEOMETRY ANALYSIS (NATM VS TBM)

3.1 Construction Speed Comparative

In terms of construction speed comparison, the expected conventional excavation advance speed, which takes into account simultaneous excavation from two portals, two daily shifts, and a 1.5 meter advance per shift, was estimated to be 6 meters per day.

Excavation by means of the proposed TBM, based on past experience, was expected to achieve maximum values of 450 meters per month, equivalent to 15 meters per day. These values are approximately 2 to 3 times higher than the expected advance rates for NATM, with the obvious beneficial impact on the project construction schedule.

Kolin Insaat excellent performance with Robbins Crossover XRE TBM exceeded expectations. The machine broke all three records, finalizing the excavation in only 6 months setting new world records for best day (32.4m), week (196.2 m) and month (730.8m) advance rates for the 13 to 14m TBM diameter range.

3.2 Safety Comparative

NATM Tunnel section was a 1 radius geometry conventional tunnel and thus the logical approach was to keep that same radius for TBM Tunnel. As a result, as can be seen in next Figures 6 & 7, the inner clearance was kept almost same (NATM 84.1 m^2 vs 86 m^2 for TBM) and thus both options to be considered as equivalent in terms of ventilation and operation.

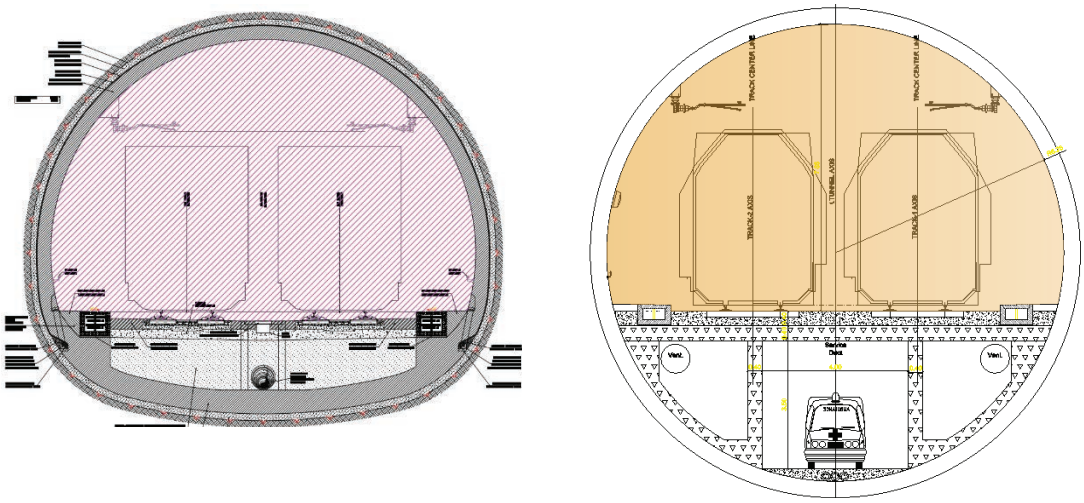


Figure 6. T1 Tunnel Tender Section and proposed TBM Section alternative

Figure 7. T1 Inner Deck design and construction

In view of figure above it can be seen main difference between both options is TBM offers the chance to use the available extra area under the track level for utilities but especially for emergency exit which was proofed compliant with NFPA and UIC guidelines.

The evacuation infrastructure design followed recommendations specified in the UIC 779-9 “Safety in railway tunnels”. The main escape features for single and twin tunnels are summarized as:

- One walkway at each side of the tunnel with a minimum width of 70 cm.
- Evacuation routes can be based on emergency exits or a parallel tunnel. The distance between emergency exits (to the surface) must be 1.000 m and the distance for cross passages to a parallel tube 500 m.
- Emergency exists can be vertical or lateral accesses. Vertical exits from the tunnel should be less than 30 m, width of stairs of about 1.2 m. And lateral exits should

accommodate a cross section of 2.25 m x 2.25 m and have a maximum length of about 150 m.

- The provision of a service and safety tunnel parallel to the main tunnel means that the tunnel is kept free of smoke and provides a safe place in the event of fire and other accidents. Its cross section is recommended 3.5 m x 3.5 m as a guideline, accessible by road vehicles, with the possibility to reverse and pass. Independent ventilation system (or similar installation) should be installed in the parallel tunnel in order to keep the safety tunnel free of smoke. A parallel tunnel should be the result of an evaluation of the optimal system. Not recommended as general solution.

The NATM tunnels were designed to include evacuation routes spaced approximately every 1,000 meters, providing travelers with a means of self-rescue in the event of an emergency. However, with the TBM Tunnel section, it became possible to eliminate the need for additional tunnels and instead include emergency exits below track level (as shown in Figure 8), thereby increasing tunnel safety and reducing the distance to exit areas to just 500 meters. Furthermore, the TBM tube tunnel alternative was proposed following above-mentioned criteria, with all the necessary emergency equipment and activities centralized in main tunnel portals which are faster to access and for which maintenance works are easier.

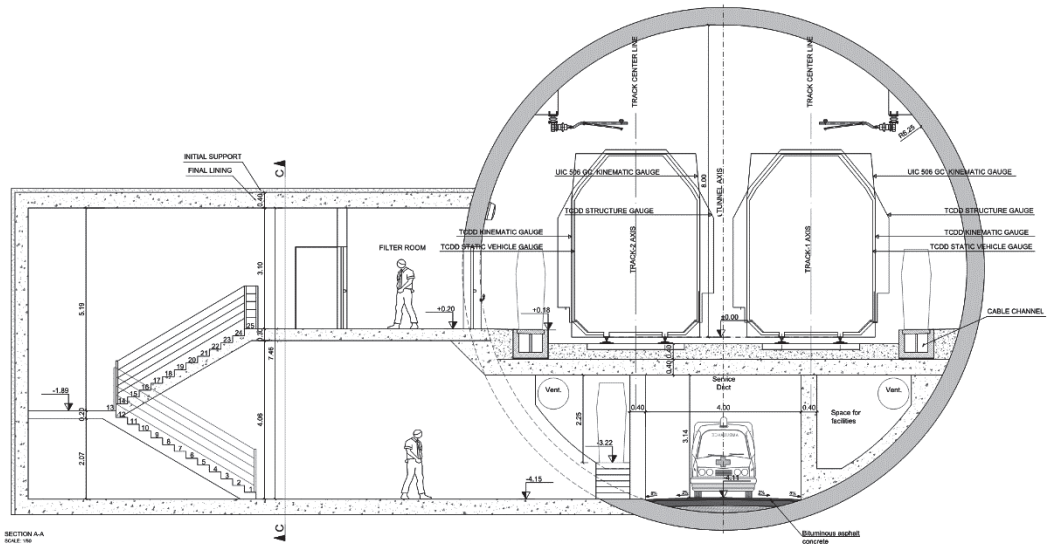


Figure 8. T1 Emergency connecting Passages.

In emergency connecting passage locations the tunnel segmental lining is opened to accommodate to excavate the conventional tunnel connecting top and bottom level and all necessary safety equipment. In such situation the circular section is interrupted, thus developing higher bending moments with lower axial stress until the moment in which the excavation, lining and collar are completed.

As a result, in order to safely open up segments of the lining, shear keys were designed and successfully implemented on site as a more efficient and convenient alternative to conventional inner steel bracing supports. These shear keys were applied prior to the ring opening, which allowed for partial demolition of the segments and provided support for the opened rings while the conventional tunnel and permanent collar were completed. Figure 9 illustrates a crosspassage opening achieved through the use of shear keys during construction.

Figure 9. T1 Emergency connecting Passages Crosspassage Opening by means of Shear Key.

4 CONCLUSIONS

The T-1 Tunnel in the Esme-Salihli section of the Ankara-Izmir High-Speed Railway Project is a prime example of how good planning in the early stages of a project can lead to a successful outcome that exceeds initial goals.

Originally an NATM tunnel was planned, however due to challenging geology and tight construction schedule plan was changed to a TBM tunnel, which retained the same inner clear section, but offered a range of safety and operational advantages compared to conventional excavation methods. These advantages include:

- Better lining quality and durability.
- Smoother tunnel lining, which enhances ventilation
- Reduced soil disturbance, resulting in fewer risks in portal and geotechnical critical sections.
- And last, but not least, the construction speed. The Crossover TBM surpassed all previous performance rates by a machine in its size range, setting new world records for best day, week, and month in the 13 to 14m diameter range.

REFERENCES

Ates, U., Bilgin N., Copur, H. 2014. *"Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunnelling projects"*, Tunneling and Underground Space Technology 40, City, page interval 46-63.

Duddeck, H.; Erdmann, J. 1982. "*Structural design models for tunnels*."

German Committee for Underground Construction (DAUB) – Shield Statics Working Group. 2005. "Recommendations for static Analysis of Shield Tunnelling Machines".

NFPA - National Fire Protection Association. 2007. *"NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems"*

UIC - Union Internationale des Chemins de fer. 2003. *"UIC-Codex-779-9 Safety in Railway Tunnels"*

Valle, N.D., Salas, R. 2016 *"Segmental lining thickness vs internal diameter ratio: A pespective approach for lining dimensioning"*, World Tunnelling Congress, Brazil.

Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Seçim Kriterleri; Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Tüneli Örneği

Full Scale Tunnel Boring Machines Selection Criteria; Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Subway Tunnel Case

S. Dündar, N. Bilim
Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya

C. Avşar
İBB Raylı Sistemler Şube Müdürlüğü, İstanbul

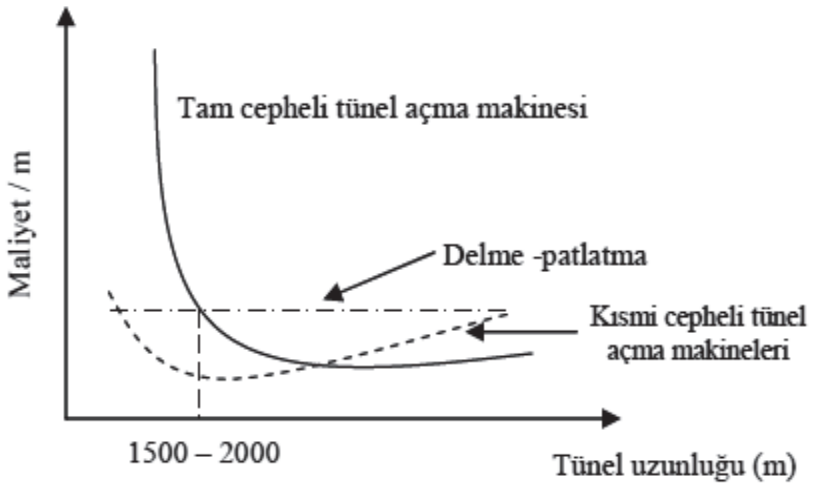
ÖZET: Tünel açma faaliyetleri tarih boyunca insanlar tarafından sıklıkla kullanılmıştır. Tüneller su nakliyesi, demiryolu ve karayolu taşımacılığı, yeraltı şehirleri ve depolarının inşası ve şehirlerin alt yapı hizmetlerinin sağlanması için çok sık olarak kullanılmıştır. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte tünel açma faaliyetlerinde de kullanılan makineler gelişmiştir. Günümüzde tam mekanize kazı sistemleri olan tam cepheli tünel açma makineleri hem ekonomik olmaları hem de iş sağlığı ve güvenliği açısından daha avantajlı olmaları sebebi ile sık sık tercih edilmektedirler. Bir tünel projesinin planlaması ve maliyet analizleri çok büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla kullanılacak olan tam cepheli tünel açma makinesinin doğru bir şekilde seçilmesi ve proje boyunca verimli bir şekilde çalışması çok önemlidir. Yapılan çalışma kapsamında açılacak olan bir tünelde tam cepheli tünel açma makinesi seçiminde göz önünde bulundurulması gereken parametreler incelenmiştir. Ayrıca İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından yapılan Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesinde kullanılan tam cepheli tünel açma makinesinin uygunluğu tartışılmıştır.

ABSTRACT: Tunneling is often applied by humans in history. Tunnels are used for water transportation, railroad and road transportation, underground cities and storage and city infrastructure services. With the advancement of technology, the machines used in tunneling activities have also developed. Nowadays, tunnel boring machines with fully mechanized excavation systems are frequently preferred because they are both economical and more advantageous in terms of occupational health and safety. Therefore, it is very important that the tunnel boring machine to be used is selected correctly and that it works efficiently throughout the project. The scope of the study, the parameters to be considered in selection of a tunnel boring machine in a tunnel project, were examined. The suitability of tunnel boring machine used in Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Project made by Istanbul Metropolitan Municipality was discussed.

1 GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesi ile birlikte inşaat ve madencilik sektörlerinde yeraltı yapıları giderek önem kazanmıştır. Tünelcilik faaliyetleri günümüzde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeraltı depolarının inşaatı, karayolu ve demiryolu tünelleri, su iletim tünelleri ve metro inşaatlarında tünelcilik faaliyetleri sık sık yürütülmektedir.

Tünel açma faaliyetleri delme-patlatma veya mekanize yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Mekanize kazı yöntemlerinde, mikro tünel açma makinesi ve tam cepheli tünel açma makinesi (TBM), sürekli kazı makineleri, kollu galeri açma makineleri, hidrolik kırıcı vb. makineler kullanılarak tünel aynasının kazı işlemi yapılmaktadır. Tünel aynasının kazısı kısmı (parçalı) ve tek seferli olmak üzere kazılabilmektedir. Tam cepheli tünel açma makinesi ve mikro tünel açma makinesi ile tünel aynası tek seferde kazılarak ilerleme sağlanabilmektedir. Delme-patlatma ve mekanize kazı yöntemlerinin farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tünel uzunluğunu ve maliyeti göz önünde bulundurularak bir kıyaslama yapıldığında ise Şekil 1'de belirtilen bir durum söz konusu olmaktadır.



Şekil 1. Tünelcilik faaliyetlerinde kullanılan yöntemlerin tünel uzunluğu ve maliyet açısından incelenmesi (Pakes, 1991)

Şekil 1'den de görüldüğü üzere tünel uzunluğu arttıkça mekanize kazı yöntemlerinden olan tam cepheli tünel açma makineleri daha avantajlı hale gelmektedir. Ayrıca günümüzde gelişen teknoloji mekanize kazıları daha hızlı ve daha güvenli hale getirmektedir. Özellikle tam cepheli tünel açma makineleri çevreye olan olumsuz etkinin en az olduğu kazı şekli olduğundan dolayı en iyi tünel açma yöntemi kabul edilmektedir.

2 TAM CEPHELİ TÜNEL AÇMA MAKİNELERİ (TBM) VE SEÇİM KRİTERLERİ

1800'lü yılların başında endüstride dünya genelinde meydana gelen hızlı gelişme, artan nüfus ve kırsaldan şehre gerçekleşen göç nedeniyle şehirlerdeki ulaşım ve alt yapı hizmetlerinde birçok tünele ihtiyaç duyulmuştur (Maidl vd. 2008). Bu kapsamda dikkati çeken ilk tünel projesi İngiltere'nin Londra şehrinde 1825 yılında Thames nehri altında Rotherhithe ile Wapping arasında açılmış olan tünel projesidir (King, 2000).

Tünel açma makineleri (Tunnel Boring Machine-TBM), klasik metotlarla açılamayan ve yüksek ilerleme hızı beklenen projelerde daha çok tercih edilmektedir. TBM ile yapılan tünel açma işlemi, tünel çapı ile aynı çapa sahip TBM ile tünel ekseni boyunca kazı yapılarak yürütülmektedir (Tüysüz, 2012).

İlk yatırım maliyeti yüksek olan TBM'ler tasman oluşumunu önleme, sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışma özellikleri sebebiyle günümüzde sıkça tercih edilen kazı makineleri olmuştur. Sert formasyonlardan akıcı formasyonlara kadar her türlü kazı ortamına uygun dizayn edilebilen kesici kafa ve keski tipleri, makine dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, pasa taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir (Tunçdemir, 1998).

Tam cepheli tünel açma makineleri kazılacak formasyonun jeolojik ve jeoteknik özelliklerine göre kalkanlı ve kalkansız TBM'ler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır (Çizelge 1). Kalkansız TBM'ler çok sert, aşındırıcı, az su geliri olan masif veya az kırıklı çatlaklı kaya koşullarında

kullanılmaktadır (RMR=80-100). Kalkanlı TBM'ler ise kalkanlı sert kaya TBM'leri ve kalkanlı yumuşak zemin TBM'leri olarak iki gruba ayrılır. Kalkanlı sert kaya TBM'leri kırıklı çatlaklı, bloklu, kuru veya az su geliri olan kaya koşulları ve orta derecede sıkışan kil formasyonlarında kullanılmaktadır (RMR=30-80). Kalkanlı sert kaya TBM'leri jeolojik ve jeoteknik özelliklere göre tek kalkanlı, teleskopik kalkanlı veya sadece kesici kafa bölgesi kalkanlı TBM'ler olarak alt gruplara ayrılmaktadır. Kalkanlı yumuşak zemin TBM'leri; çamur basınçlı TBM'ler, pasa basınçlı TBM'ler, hava basınçlı TBM'ler, kombine TBM'ler ve özel TBM'ler olarak alt gruplara ayrılmaktadır (Tümaç, 2010).

Zeminin jeolojik ve jeoteknik özellikleri tünel açılması için en önemli parametrelerdir. Zemin kaya ise süreksizlikler ve bu süreksizlikleri dolduran malzemenin dayanımı; zemin toprak ise tane boyu, kohezyon gibi parametreler makinanın verimini, kazının ilerleyişini doğrudan etkileyen faktörlerdir (Tüysüz, 2012).

Çizelge 1. TBM'lerin Sınıflandırılması

TBM Sınıflandırılması		
Kalkansız TBM'ler	**Kalkanlı TBM'ler**	
	Sert Kaya TBM'leri	**Yumuşak Kaya TBM'leri**
• Alttan Destekli Bir Çift Pabuçlu Önden Motorlu TBM'ler	• Tek Kalkanlı TBM'ler	• Çamur Basınçlı TBM'ler
• Alttan Desteksiz Bir Çift Pabuçlu Önden Motorlu TBM'ler	• Teleskopik Kalkanlı TBM'ler	• Pasa Basınçlı TBM'ler
• İki Çift Pabuçlu Arkadan Motorlu TBM'ler	• Sadece Kesici Kafa Bölgesi Kalkanlı TBM'ler	• Hava Basınçlı TBM'ler
		• Kombine TBM'ler
		• Özel TBM'ler

TBM'ler proje bazlı üretildikleri için çeşitli tip ve özelliklerde mevcuttur. Proje parametrelerine uygun olarak üretici firmadan sipariş verilir ve tasarlanır. Açılacak yeraltı boşluğunda geçilen formasyon TBM seçiminde en önemli faktörlerdendir (Tunçdemir, 1998).

Bieniawski vd. 2008 yılında TBM seçimi ve performans tahmini için bir araştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmada TBM seçimi için RME ve kayacın tek eksenli basıncını göz önünde bulundurmuşlardır.

Bilgin vd. (2008) TBM performans tahmini ve seçimi için tam boyutlu bir kesme deneyi uygulamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda tam cepheli tünel açma makinesinin seçimi, tasarımı ve performans tahmini yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında performans tahmini gerçek kazı değerlerine yakın değerler vermiş ve böylelikle tam cepheli tünel açma makinesinin seçimi ve tasarımının iyi bir şekilde yapıldığı görülmüştür.

Tripathi vd. (2019) yaptıkları çalışmada bir TBM seçimi için expert sistem adında bilgisayar yazılımı kullanmışlardır. Yapılan çalışmada TBM seçimi için kullanılan parametreler; tek eksenli basınç dayanımı, kayaç kalite derecesi (RQD), süreksizlikler arası mesafe, ayna durumu ve yeraltı su durumudur.

Duhme ve Lee (2021) yaptıkları çalışmada TBM seçiminde pek çok parametrenin ve projenin özelliklerinin TBM seçimine etkisi olduğunu söylemektedir. Ayrıca Alman Tünel Komitesi (DAUB) tarafından geliştirilen TBM seçme kılavuzu, projenin jeolojik özelliklerine göre adım adım TBM seçimi için büyük faydalar sağlamaktadır.

Alman Tünel Komitesi önerilerine göre pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinesi ve çamur basınçlı tünel açma makinesi seçme kriterleri tavsiye olarak belirlenmiştir. Bu kriterler Çizelge 2 ve Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 2. Alman Tünel Komitesi tarafından EPB-TBM kullanım kriterleri

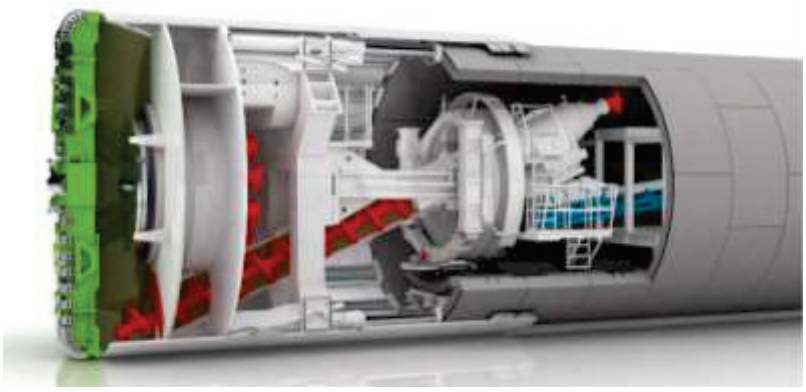
Uygulanabilir Özellik					
Tane Boyun Dağılımı <0.6 mm	%5 Tercih edilmez	%5-15 Modifikasyon	%15-40 Üst sınıra yaklaştıkça kullanılır	>%40 Kullanılır	
Permabilite k (m/s)	$>10^{-2}$ Çok yüksek permabilite Tercih edilmez	$10^{-2};10^{-4}$ Yüksek permabilite Tercih edilmez	$10^{-4};10^{-6}$ Orta derece Permabilite Modifikasyon ile olabilir	10^{-6} küçük Düşük permabilite Kullanılabilir	
Süreklilik	Akışkan 0-0,5	Yumuşak 0.5-0.75	Sıkışık 0.75-1.0	Yarı Akışkan 1.0-1.25	Sert 1.25-1.5
Şişme	Modifikasyon İle Hiç Kullanılabilir	Kullanılabilir Az Kullanılabilir	Kullanılabilir Orta Modifikasyon	Modifikasyon Yüksek Uygun Değil	Modifikasyon
Aşındırıcılık LCPC İndeks	Çok Düşük Aşındırıcılık 0-500 Kullanılabilir	Düşük Aşındırıcılık 500-1000 Kullanılabilir	Orta Aşındırıcı 1000-1500 Modifikasyon	Yüksek Aşındırıcı 1500-2000 Modifikasyon	Çok Yüksek Aşındırıcılık >2000 Uygun Olmayabilir
Kırılabilirlik LCPC İndeks	Çok düşük 0-25 Kullanılabilir	Düşük 25-50 Kullanılabilir	Orta 50-75 Modifikasyon	Yüksek 75-100 Modifikasyon	Çok Yüksek >100 Uygun olmayabilir
Sert Kayaçlar					
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	0-5 Kullanılabilir	5-25 Modifikasyon	25-50 Modifikasyon	50-100 Uygun olmayabilir	100-250 Uygun olmayabilir
RQD	Çok Zayıf 0-25 Kullanılabilir	Zayıf 25-50 Modifikasyon	Orta 50-75 Modifikasyon	İyi 75-90 Uygun olmayabilir	Çok iyi 90-100 Uygun olmayabilir
RMR	Çok zayıf >20 (ters) Kullanılabilir	Zayıf 21-40 Modifikasyon	Orta 41-60 Modifikasyon	İyi 61-80 Uygun değil	Çok iyi 81-100 Uygun değil
10 m tünel için su geliri	0 Modifikasyon	0-10 Modifikasyon	10-25 Modifikasyon	25-125 Modifikasyon	>125 Modifikasyon
Aşındırıcılık (CAI)	Çok az aşındırıcı 0,3-0,5 Kullanılabilir	Az Aşındırıcı 0,5-1 Kullanılabilir	Aşındırıcı 1-2 Modifikasyon	Çok aşındırıcı 2-4 Modifikasyon	Çok fazla Aşındırıcı 4-6 Uygun değil
Şişme	Hiç Kullanılabilir	Düşük Kullanılabilir	Orta Modifikasyon	Yüksek Uygun değil	

Çizelge 3. Alman Tünel Komitesi tarafından çamur basınçlı TBM kullanım kriterleri

Uygulanabilir Özellik					
	%5	%5-15	%15-40	>%40	
Tane Boyun Dağılımı <0.6 mm	Kullanılabilir	Kullanılabilir	Kullanılabilir	Modifikasyon ile kullanılabilir	
Permabilite k (m/s)	$>10^{-2}$ Çok yüksek permabilite	$10^{-2};10^{-4}$ Yüksek permabilite	$10^{-4};10^{-6}$ Orta derece Permabilite	$<10^{-6}$ Düşük permabilite	
Süreklilik	Tercih edilmez Akışkan 0-0.5 Alt sınır yakını kullanılmaz sonra modifikasyon	Modifikasyon Yumuşak 0.5-0.75 Modifikasyon	Kullanılır Sıkışık 0.75-1.0 Modifikasyon	Modifikasyon Yarı Akışkan 1.0-1.25 Modifikasyon	Sert 1.25-15 Modifikasyon
Şişme	Hiç	Az	Orta	Yüksek	
Aşındırıcılık LCPC İndeks	Kullanılabilir Çok Düşük Aşındırıcılık 0-500	Kullanılabilir Düşük Aşındırıcılık 500-1000	Modifikasyon Orta Aşındırıcı 1000-1500	Uygun Değil Yüksek Aşındırıcı 1500-2000	Çok Yüksek Aşındırıcılık >2000
Kırılabilirlik LCPC İndeks	Kullanılabilir Çok düşük 0-25 Modifikasyon	Kullanılabilir Düşük 25-50 Kullanılabilir	Kullanılabilir Orta 50-75 Kullanılabilir	Modifikasyon Yüksek 75-100 Kullanılabilir	Modifikasyon Çok Yüksek >100 Modifikasyon
Sert Kayaçlar					
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	0-5 Modifikasyon	5-25 Modifikasyon	25-50 Modifikasyon	50-100 Modifikasyon	100-250 Modifikasyon
RQD	Çok Zayıf 0-25 Modifikasyon	Zayıf 25-50 Modifikasyon	Orta 50-75 Modifikasyon	İyi 75-90 Modifikasyon	Çok iyi 90-100 Modifikasyon
RMR	Çok zayıf >20 (ters) Modifikasyon	Zayıf 21-40 Modifikasyon	Orta 41-60 Modifikasyon	İyi 61-80 Modifikasyon	Çok iyi 81-100 Modifikasyon
10 m tünel için su geliri	0 Modifikasyon	0-10 Modifikasyon	10-25 Modifikasyon	25-125 Modifikasyon	>125 Modifikasyon
Aşındırıcılık (CAI)	Çok az aşındırıcı 0.3-0.5 Kullanılabilir	Az Aşındırıcı 0.5-1 Kullanılabilir	Aşındırıcı 1-2 Modifikasyon	Çok aşındırıcı 2-4 Modifikasyon	Çok fazla Aşındırıcı 4-6 Uygun değil
Şişme	Hiç Kullanılabilir	Düşük Kullanılabilir	Orta Modifikasyon	Yüksek Uygun değil	

2.1 Pasa Basınçlı Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri (EPB-TBM)

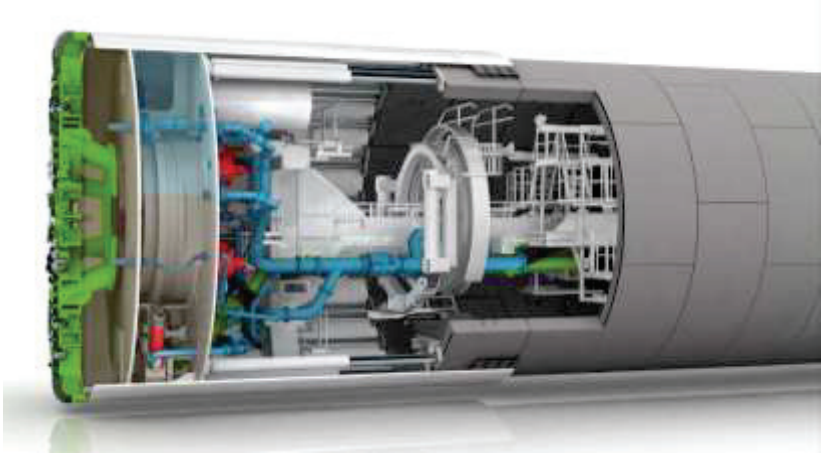
TBM'lerin (EPB-TBM) ana çalışma mekanizması su gelirini veya aynada oluşan akmaların kontrol edilmesini sağlamak için, arazi ve içindeki su basıncı etkisiyle kesici kafada ve ayna boşluğunda doğal bir basınç oluşturularak kazı yapmasıdır. Bir diğer ifade ile kazılan malzemenin kesici kafanın arkasında bulunan kazı odasının içine dolmasını sağlayarak yüzeye destek vermesidir. Kazılan malzeme ise helezonik konveyör ile TBM'in arka kısmında bulunan bant konveyöre ardından da yeryüzüne taşınması sağlanmaktadır. Şekil 2'de bir EPB-TBM kesiti görülmektedir. Çamur basınçlı TBM'lere göre daha basit çalışma sistemlerinin olması ve geniş uygulama alanı olduğundan dolayı daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 2. Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinesinin kesit görünümü (URL 1)

2.2 Çamur Basınçlı Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri (SBM-TBM)

İlk olarak 1959 yılında kullanılmıştır. Çamur basınçlı TBM'ler yeraltı suyunun fazla olduğu çakıl, iri ve orta taneli kum formasyonlarının kazı işlemlerinde kullanılmaktadır. Çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makinelerinin temel çalışma prensipleri su gelirinin ve aynada oluşan akmaların kontrol edilmesi için aynanın bentonit ile desteklenerek dengenin sağlanmasıdır. Kazılan malzeme kademeli olarak yer üstüne taşınır. Burada tesiste bentonit çamuru ve pasanın ayrılması sağlanarak geri kazanılan bentonit çamuru yeniden kullanılmaktadır (Tümaç, 2010). Şekil 3'te bir SPM-TBM kesiti görülmektedir.



Şekil 3. Çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makinesinin kesit görünümü (URL 2)

Çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makinelerinde ayna basıncının dengelenmesi için bentonit çamuru kullanılmasından dolayı ayna basıncının ayarlanması için pasanın bir önemi yoktur. Dolayısıyla EPB-TBM ile ayna basıncının daha zor dengelendiği durumlarda çamur basınçlı tam cepheli tünel açma makineleri ile daha kolay yapılabilmektedir. Fakat pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinelerine göre daha karmaşık bir çalışma sistemi olduğundan ve bentonit çamurunun temizlenip tekrar sisteme verilebilmesi için yer üstünde bir ayrıştırma tesisi olması gerekmektedir.

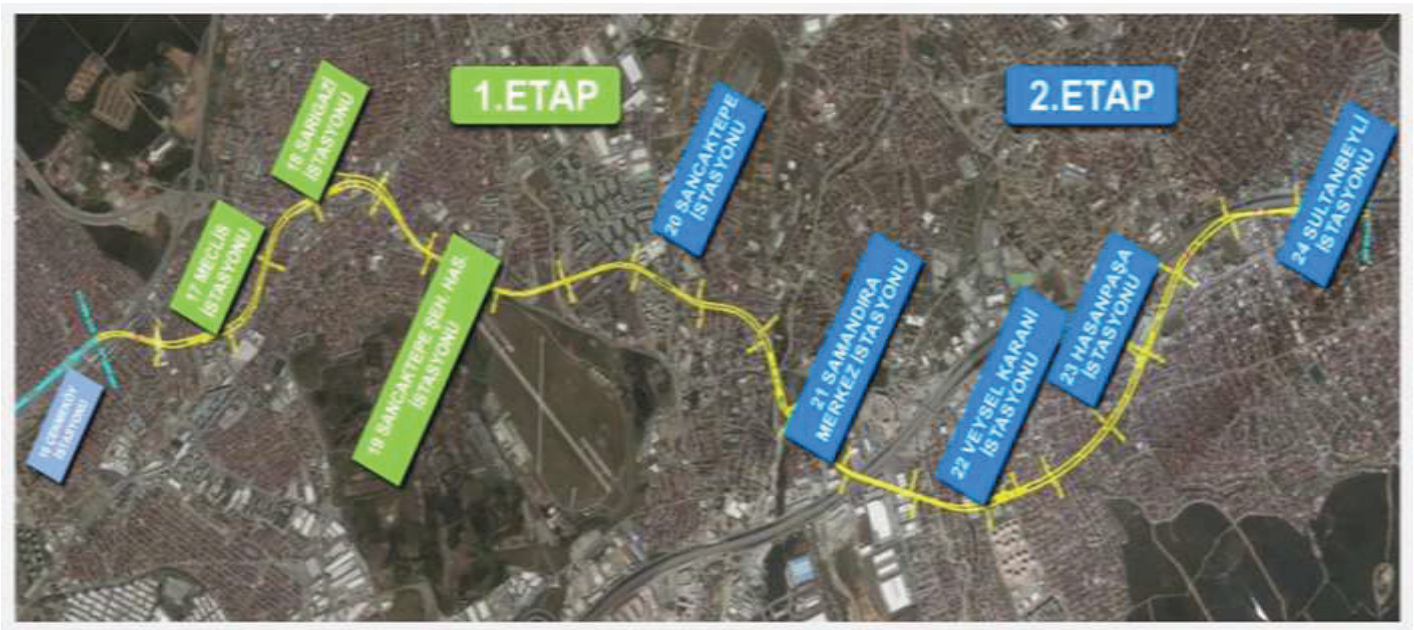
3 ÇEKMEKÖY-SANCAKTEPE-SULTANBEYLİ METRO HATTI İNŞAATI

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro hattı inşaatı İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından projelendirilmiş ve yapımına başlanmıştır. Projenin ihalesi 03.03.2017 tarihinde yapılmıştır. İhaleyi Doğuş İnş. ve Tic. A.Ş.-Özaltın İnş. Tic. ve San. A.Ş- Yapı Merkezi İnş. ve San. A.Ş. iş ortaklığı alarak 28.04.2017 tarihinde projeye başlamışlardır. Çekmeköy-

Sancaktepe-Sultanbeyli Metro hattı projesi yaklaşık 11 km uzunluğunda çift tüp ana hat tünelleri şeklinde açılmaktadır (Şekil 4).

Şekil 4. Hasanpaşa İstasyonu çift tüp tünel geçişi (URL 3)

Güzergâhta hatlar arası mesafe 10 m ile 33 m arasında değişmektedir. Metro hattı boyunca; Meclis İstasyonu, Sarıgazi İstasyonu, Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu, Sancaktepe İstasyonu, Samandıra Merkez İstasyonu, Veysel Karani İstasyonu, Hasanpaşa İstasyonu ve Sultanbeyli İstasyonu olmak üzere toplam 8 istasyon bulunmaktadır (Şekil 5) (URL 4).



Şekil 5. Tünel güzergahı ve istasyon noktaları (URL 5)

Yapılan jeolojik ve jeoteknik incelemeler sonucunda İBB temek geoteknik raporunda belirtilen formasyonlar ve kısaltmaları Çizelge 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Temel geoteknik rapora göre güzergâh boyunca karşılaşılacak formasyonlar ve formasyon tanımlamaları ve kısaltmaları

Formasyon Adı	Formasyon Tanımlaması	Kısaltması
Sultanbeyli Formasyonu Tuğlacıbaşı Üyesi	Konsolide Kum ve Çakıl	Tst
Sultanbeyli Formasyonu Dudullu Üyesi	Kil	Tsd
Pendik Formasyonu Kartal Üyesi	Koyu Renkli Volkanosedimanter Birimler ve Şeyl	Dpk
Pendik Formasyonu Kartal Üyesi	Tamamen Ayrışmış Koyu Renkli Volkanosedimanter Birimler ve Şeyl	Dpk-W5
Pelitli Formasyonu Soğanlık Üyesi	Kireçtaşı – Kiltaşı Ardalanması	SDpsg
Pelitli Formasyonu Soğanlık Üyesi	Tamamen Ayrışmış Kireçtaşı – Kiltaşı Ardalanması	SDpsg-W5
Pelitli Formasyonu	Kireçtaşı	SDp
Pelitli Formasyonu	Tamamen Ayrışmış Kireçtaşı	SDp-W5
Kurtköy Formasyonu	Kumtaşı – Kiltaşı	Opk
Kurtköy Formasyonu Süreyyapaşa Üyesi	Tamamen Ayrışmış Kumtaşı - Kiltaşı	Opk-W5

İBB temel geoteknik raporundan alınan bilgilere göre tünel güzergâhının %22'si zemin özelliği gösteren birimlerden, %58'i sert kaya birimlerinden ve %20'si ise karışık formasyonlardan oluşmaktadır. Tünel güzergâhının büyük bir kısmını sert kayaç formasyonları oluşturmaktadır. Zemin özelliği gösteren %22'lik kısım Tst, Tsd, SDpsg-W5 ve Dpk-W5 birimlerinden oluşmaktadır. Tünel güzergâhının büyük bir kısmını oluşturan kaya kütle birimleri ise SDp, SDpsg, Opk ve Dpk olarak tanımlanan birimlerdir ve yaklaşık %58'lik bir kısmı oluşturmaktadır. Tünel güzergâhının kalan yaklaşık%20'lik kısmını ise karışık koşullar oluşturmaktadır. Karışık koşullar; kaya üyelerinin tünel derinliklerinde, tamamen farklı dayanım ve / veya deformabilite özelliklerine sahip başka bir jeolojik birimle eşzamanlı olarak karşılaşıldığı durumları içerir. Tünel güzergâhında karşılaşılan karışık koşullar ise; Dpk&SDpsg, SDpsg-W5,Dpk, SDp&Dpk-W5, Dpk-W5&Dpk, Tsd&Dpk-W5, Tst&Tsd, Tst&SDp, Tsd&SDp, SDp&Opk-W5&Opk, Opk-W5&Opk birimlerinin oluşturduğu kazı aynalarıdır. Zemin özelliği gösteren geoteknik özellikleri Çizelge 5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Zemin birimleri için geoteknik özellikler

Zemin Özelliği	Birimi	Tsd	Tst	SDp-W5	SDpsg-W5	Dpk-W5	Opk-W5
Jeolojik Tanımı		Kil	Kumlu Kil	Rezidüel Zemin	Rezidüel Zemin	Rezidüel Zemin	Rezidüel Zemin
Nem İçeriği	%	20	16	23	25	15	13
Yoğunluk	gr/cm^3	1.85	1.98	2.24	2.24	2.24	2.24
Plastiklik İndeksi	%	21	19	23	23	23	19
Plastik Limit	%	20	17	20	21	23	21
Likit Limit	%	41	36	43	44	46	26
Permabilite	m/s	4.1×10^{-7}	5.2×10^{-7}	8.3×10^{-7}	3.7×10^{-7}	2.2×10^{-7}	1.4×10^{-6}
Drenajsız Kohezyon	kPa	140-240	160-285	120-170	160-370	200-300	200-350
Efektif Kohezyon	kPa	15-25	15-30	15-20	15-40	20-30	20-35
Young Modülü	MPa	40-100	50-100	80-280	80-280	80-280	80-280
Poisson Oranı		0.3-0.36	0.3-0.35	0.25-0.35	0.25-0.35	0.25-0.35	0.25-0.35

Tünel güzergâhının yaklaşık %58'lik kısmını oluşturan sert kayaç formasyonlarının geoteknik özellikleri Çizelge 6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Sert formasyonlar için jeoteknik özellikleri

Kayaç Özelliği	Birimi	Dpk	Opk	SDp	SDpsg
Jeolojik Tanımı		Kumtaşı Arakatkılı Şeyl ve Silttaşı	Kumtaşı ve Kiltaşı	Kireçtaşı	Kireçtaşı
Permabilite	m/s	2.2×10^{-7}	1.4×10^{-6}	8.3×10^{-7}	3.7×10^{-7}
Nem İçeriği	%	14.7	12.7	23.3	25
Yoğunluk	gr/cm^3	2.63	2.55	2.61	2.65
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	MPa	25.0	19.8	36.5	27.3
Deformasyon Modülü	GPa	9.1	6.0	15.7	126
Nokta Yükleme Dayanımı	MPa	2,1	2.2	2.5	2.4
Cerchar İndeksi		1.17	0.99	0.8	.86
Ortalama GSI		51	51	52	46

Ayrıca tünel güzergâhının RMR değerleri bakımından yüzde olarak dağılımları verilmiştir ve Çizelge 7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7. Tünel güzergahının RMR değerlerinin gösterimi

RMR Sınıfı	15-30	30-50	50-70	70-100
Tünel Güzergahındaki Oranı (%)	7.6	71.2	21.2	0

Çizelge 7'de görüldüğü üzere tünelin %1.2'lik kısmının RMR değeri 30-50 arasındadır. %21,2'lik kısmının RMR değeri 50-70 aralığında ve %7.6'lık kısmı da 15-30 RMR arasındadır. RMR sınıflamasına göre tünel güzergâhının büyük kısmı zayıf kaya özellikleri göstermektedir ve %21,2'lik kısmı orta derece dayanıklı kaya özellikleri gösterirken en az orana sahip olan (%7.6) kısım ise çok zayıf kaya özellikleri göstermektedir.

4 SONUÇLAR

İBB tarafından hazırlanan temel geoteknik raporda yer alan bilgilere göre açılacak olan tünel için en uygun TBM türleri çamur basınçlı tünel açma makinesi ve pasa basınçlı tünel açma makinesi olduğu görülmektedir. İBB genel geoteknik raporunda görüldüğü üzere zemin özelliği gösteren formasyonlarda permabilite değeri 10^{-6} değerinden daha küçük değerlerdedir ve Alman Tünel Komitesinin önerilerine göre bu şartlar için pasa basınçlı tünel açma makinesinin kullanımı daha uygundur. Ayrıca sert zemin özelliği gösteren formasyonlar için tek eksenli basınç dayanımının her iki makine için de benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Aynı şekilde RMR değeri için de iki makine de benzer özellikler göstermektedir fakat pasa basınçlı tünel açma makineleri daha düşük değerlerde daha kullanışlı olmaktadır. Tünel güzergahında çok yüksek değerler olmaması sebebi ile pasa basınçlı tünel açma makinelerinin kullanımının daha uygun olduğu görülmektedir. Sert formasyonlar için Cerchar Aşındırıcılık İndeksi 0,8-1.17 arasında değişmektedir ve her iki tür tünel açma makinesi de bu koşullar için önerilmektedir.

Geoteknik rapordan elde edilen veriler ışığında çamur basınçlı tünel açma makineleri ile pasa basınçlı tünel açma makineleri kıyaslandığında benzer özellikler göstermelerine ve ikisinin de tercih edilebilmesine rağmen çamur basınçlı tünel açma makinelerinin ilk yatırım maliyetlerinin daha yüksek olması ve yeryüzünde kurulması gereken bentonit çamuru ve pasanın ayırma tesisi

maliyeti arttırmakta ve daha fazla alan işgal etmektedir bu sebeplerden dolayı pasa basınçlı tünel açma makinesinin seçimi daha doğru olmaktadır.

Pasa basınçlı tünel açma makinelerinin ilk yatırım maliyetlerinin daha düşük olması ve işletme maliyetlerinin de daha düşük olması sebebiyle tercih edilmesi çok daha doğrudur. Ayrıca su gelirinin çok fazla olmadığı için çamur basınçlı tünel açma makinesine gerek kalmamaktadır.

KAYNAKLAR

Aydın, D., 2019. Zor Koşullarda TBM İle Açılan Tünellerin Performans Analizi: Silvan Ve Nurdağı Tünelleri. Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 246.

Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M., & Tardáguila, I., 2008. New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance. ITA World Tunneling Congress, s. 1618-1628, Agra, India.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Akgul, M., & Yuksel, A., 2008. The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels. ITA World Tunneling Congress, s. 1509-1517, Agra, India.

DAUB, https://www.daub-ita.de/en/start, 2011.

Duhme, R., Lee, J., 2021. Latest Developments in Shield TBM Selections & Design for Mechanized Tunneling. World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics . Seoul, Korea.

King, J. 2000. Our century of tunnelling and where we go now, British Tunnel Society, The 2000 Harding Lecture, Tunnels And Tunnelling International.

Maidl, B., Schmid, L. and Ritz, W., Herrenknecht, M. 2008. Hard Rock Tunnel Boring Machines, Ernst & Sohn, Berlin.

Pakes, G., 1991. Selection of Methods, World Tunneling, Vol.4., s. 399-403.

Tripathi, B. N., Agrawal, A. K., Ray, D., & Chattopadhyaya, S., 2019. Expert system to select tunnel boring machine (TBM). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 691 p. 012012 . India.

Tunçdemir, H., 1998. Arazi Basıncının Dengelenmesi Esasına Göre Çalışan Tam Cephe Tünel Açma Makinelerinin Kazı Performansını Etkileyen Zemin Özellikleri ve İzmir Metrosu Örneği. 4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, s. 22-23. Zonguldak, Türkiye.

Tümaç. D., 2010. Değişik Kayaç ve Disk Keskilerin Kayaç Kazılabilirliği Üzerine Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 356.

Tüysüz, L. 2012. İstanbul'da açılacak metro tünellerinde TBM (Tünel Açma Makinesi) performansını tahmin etmek için yeni bir yaklaşım. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 101.

URL1;https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produkte/01_Tunnelling/07_EPB-Schild/03_ImageMap/01_imagemap_epb_1.png, (Erişim Tarihi 11.01.2023).

URL2;https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produkte/01_Tunnelling/08_Mixschild/03_ImageMap/01_imagemap_mixschild_1.jpg, (Erişim Tarihi: 11.01.2023).

URL3; http://cssmetrosu.com/gorseller.html#s7-4, (Erişim Tarihi: 24.12.2022).

URL4; http://cssmetrosu.com/hakkinda.html, (Erişim Tarihi: 24.12.2022).

URL5; http://cssmetrosu.com/guzergah.html, (Erişim Tarihi: 24.12.2022).

A New Technology of Readily Biodegradable Soil Conditioning Foaming Agents

M. A. Sposetti
Underground Construction, Master Builders Solution UAE - Group part of Sika AG

ABSTRACT: Thanks to new extended borders of engineering, the TBM industry is fast paced moving to a direction where the excavation diameter of the modern machines and the length of tunnels is constantly increasing, making today possible to excavate deeper but also shallower tunnels than few years back. In order to cope with this technological development, it becomes clear that conventional foaming agents for soil conditioning in EPB machines, based only on SLES (Old Technology), do not represent a reliable solution anymore. This is particularly applicable in heterogeneous grounds with large range of permeability, where the face stabilization is the greatest challenge to control safety and performance. This is the reason why a new technology of readily biodegradable foaming agents has been developed, that not only ensures safety of the excavation but also optimizes performance and reduces consumption, impacting positively on the overall TBM excavation cycle.

1 INTRODUCTION

The industry of EPB TBMs experiences an unprecedent exploit in projects with cohesionless grounds below the groundwater table. Foaming agents encompassing a higher stability are needed to contribute to stabilize the excavation pressure, increase front face stability and favor the extraction of the spoil outside the tunnel.

In such conditions, contractors need more robust foaming agents able to control the rheology of the soil in a planned manner over time, without increasing the consumption of foam significantly.

Time indeed, today represents a new vital factor that must be taken in consideration when conditioning the soil during TBM mining. The longer the foam remains stable, the higher the quality of soil conditioning, the less the consumption.

The New Technology of foaming agents, that are based not only on SLES, today represents a new way to manage the plasticity of the soil, ensure safety and proper extraction; thanks to a richer chemistry that makes them stronger than conventional foams (Old Technology), these new agents boast a more durable surface tension on the bubbles that ensures longer stability over time. In this way, not only the foam shall work longer but consumption shall be reduced when compared to conventional foams.

Thanks to the above, it is now possible to work with higher FER and lower FIR without reducing the quality of the foam and, at the same time, increase its stability over time. With the New Technology, the TBM excavation cycle is optimized, contributing to the overall schedule to complete a tunnel.

2 BASIC OF SOIL CONDITIONING – OLD TECHNOLOGY

A soil conditioner is a chemical product which is added to a soil to improve the soil's physical and mechanical properties. Soil conditioning is the process to achieve this, and heavily depends on the generation of foam and the quality of the foaming system used.

The generation of foam, whether done in laboratory or in TBM, is divisible in two separate steps:

a) Step 1: the surfactant is mixed with water at a certain concentration rate (Cf), creating the foaming agent.
b) Step 2: the foaming agent is then mixed with air to create the foam.

The standard foams in the TBM industry are based on a surfactant, or tensioactive, called Sodium Lauryl Ether Sulfate (commercial name is SLES). SLES is an ionic tensioactive that, when enters in contact with water, its molecules work like an emulsifier, bonding the water with its chemical structure. Absorption of SLES when mixed with water is shown in Figure 1.

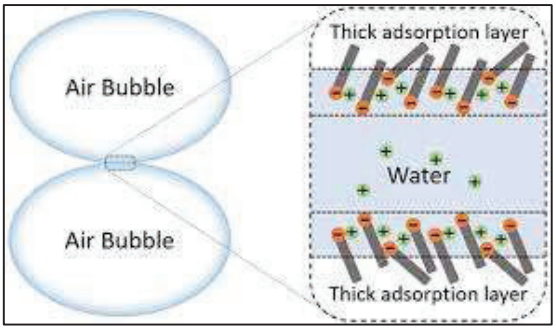


Figure 1. Thick adsorption layers of SLES mixing with water, acting on air bubbles.

SLES works on the surface of the bubbles favoring the stabilization of the air-liquid interface by developing the surface tension that allows the air bubbles to be generated. Initially once the foam is generated, bubbles are in small size but, with the passing of time, these tend to increase in their size in a simultaneous effect with the reduction of the surface tension applied on the external layer of the air bubbles.

The reduction of the surface tension on the external layer of the air bubble results at a certain point in the air bubble to pop, which effect is detrimental to the stability of the foam and its ability to work when mixed with soil.

Therefore, the concept of time, until now not properly addressed by the industry, is now a vital parameter that must be taken into consideration when we condition a soil in a TBM.

2.1 Foam parameters

Foams are generated and used through the control of these three essential parameters:

a) Concentration (Cf), expressed in percentage as the rate of SLES inside the foaming agent; the higher the Cf, the stronger the foam from the chemical and mechanical point of view.
b) Foam Expansion Rate (FER), as the ratio between the volume of the foam and the volume of the liquid; the higher the FER, the drier the foam; FER is the indication of quality of the foam and the indication of how much air is trapped inside the bubbles; as a matter of example, a foaming agent foamed at FER 10 means that it expands its volume ten times. Figure 2 below shows how FER impacts on volume of the foam.

Figure 2. Example of one foam at same Cf expanded at three different FER.

c) Foam Injection Rate (FIR), expressed in percentage as the ratio between the volume of the foam and the volume of the soil; the higher the FIR, the higher the volume of the foam injected into the ground and, therefore, higher the consumption. Figure 3 below shows the total volumes in play when a foam is added to a soil at FIR 30%.

Figure 3. Example of FIR 30%. The total volume is 1300 liters.

2.2 Quality Control

Since the beginning of the EPB TBM tunnelling, the industry has followed the use soil conditioners based only on SLES as main chemical constituent plus water (Old Technology), which has now become anachronistic for modern TBM operational standards.

When it comes to the TBM operating parameters for optimum soil conditioning (Cf, FER & FIR) through heterogeneous soft ground conditions with variable range of permeability, this technology alone has shown its limitation.

The Old Technology has been stretched to a point that, after the non-stability has been reached (FER above 10), the performance of these agents flattens, thus forcing contractors to increase foam consumption to ensure workability of the excavated soil and control of its rheology inside the excavation chamber. This is also demonstrated by the quality control carried out on foams in laboratory. The internationally recognized standard test named as Half Life Time (HLT) follows the provisions of the "Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and hard Rock" by EFNARC (April 2005) to determine the drainage stability of a foam.

The test measures the time when 80gr of foam, generated at a certain Cf and FER, placed into a beaker over a synthetic fleece and a digital scale, located vertically on top of a graduated cylinder, drains 40ml, which are equal to half of its liquid content. The foam is generated with a foam gun that is like the ones available in TBMs. The test determines the drainage stability of the foam, named Half-Life Time (HLT). Figure 4 below shows a schematic diagram of the Half-Life Test.

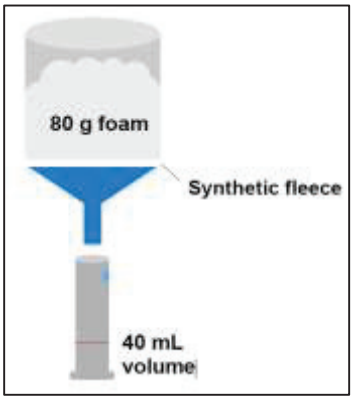


Figure 4. Schematic diagram of the Half-Life Time test (EFNARC, April 2005)

With the Old Technology of soil conditioners, based only on SLES and water, depending on Cf and FER values the measured time is approximately ranging in 5 to 6 minutes. This indicates that with the Old Technology, the drainage stability above FER 10 is flattened out and non-performant; the optimum benefit of a foam can be utilised up to FER 10, limiting the control of the performance of the foam but also highlighting the inability to use foaming agents to their full potential and, ultimately, ease tunnelling operations in large variety of soft ground strata. The results of Old and New Technology Half-Life Time are displayed in Figure 6 below.

Another interesting non-standardized laboratory test used by Master Builders Solutions is the Mechanical Resistance test, where the concept of time is again fundamental. The test measures the time a water-filled ping-pong ball needs to penetrate, from top to bottom, through a foam placed into a vertical cylinder. Also in this case, the foam is generated with a foam gun that is like the ones available in TBMs (please see Figure 5 with a schematic diagram of the Mechanical Resistance Test).

The test measures the time when a ping pong ball 18g weight vertically crosses a foam placed into a plastic cylinder, from top to bottom. The measure of time gives the indication of the mechanical resistance the foam applies to the vertical scroll of the ball, at a certain Cf and FER, indicating the mechanical structure & strength of the foam itself.

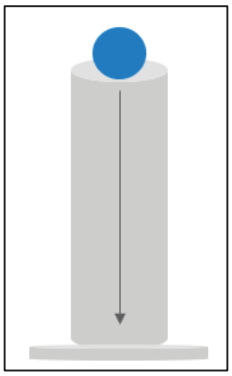


Figure 5. Schematic diagram of the Mechanical Resistance test

3 NEW TECHNOLOGY OF FOAMING AGENTS

MasterRoc SLF 325, SLF 419, SLF 543

With our innovation in soil conditioning foaming agents, we have broken the FER 10 psychological barrier, providing more flexibility in terms of handling the foam generation and obtain the most effective soil conditioning result.

The New Technology MasterRoc SLF 325 for example, still based on SLES as main constituents, is now chemically enriched with some new other constituents that contribute to a stronger foaming agent, more stable over time, ensuring at the same time to be readily biodegradable as per OECD norms.

Working with the very same steps for foam generation mentioned in Chapter 1, and the very same standard parameters Cf, FER and FIR, and with the very same foaming systems installed in TBMs, with the New Technology is now possible to generate highly stable foams above FER 10 with excellent results in terms of drainage stability and overall performance. The foam stability increases with FER, the air bubbles maintain a durable surface tension on the external layer over a prolonged period, thus ensuring a longer control of the rheology of the soil during TBM mining.

When compared to conventional Old Technology, the technical and operational benefits of New Technology are multiple:

- Increased drainage stability over prolonged time.
- Due to the high foaming capacity, it is now possible to work with high FER values avoiding the collapse of the foam, compared to standard foaming agents.
- Work with lower FIR values to obtain the desired soil rheology, compared to standard foaming agents.
- Creation of a highly stable foam to hold the face pressure and maintain the rheology of the excavated ground longer than conventional foaming agents.
- MasterRoc SLF 325 guarantees a new improved foam stability that guarantees proper EPB counter pressure; its improved foam properties ensure better control of the ground pressure, reducing the risk of additional ground settlement at the surface and over excavation.
- Improved soil behaviour.
- Reduced soil permeability.
- Creation of plastic deformation properties in the soil, which increases face stability.
- Lower inner friction and lower abrasiveness of the soil at the cutterhead and shield.
- Reduction of the stickiness of soils with high fines contents (i.e. <0.063 mm), which would lead otherwise to clogging, blockage problems.

The results of Old and New Technology Mechanical Resistance Time are displayed in Figures 6 and 7 below.

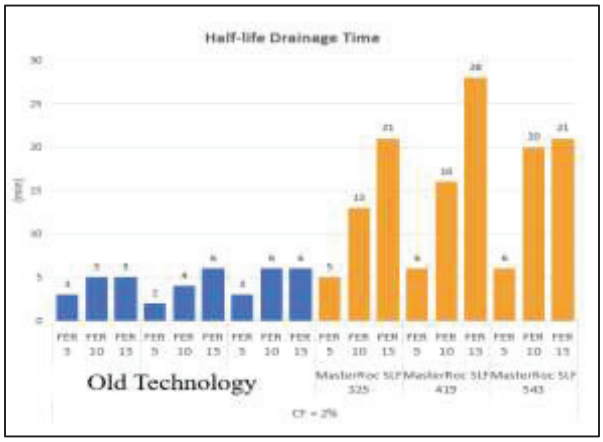


Figure 6. Old and New Technology comparison HLT at Cf 2%.

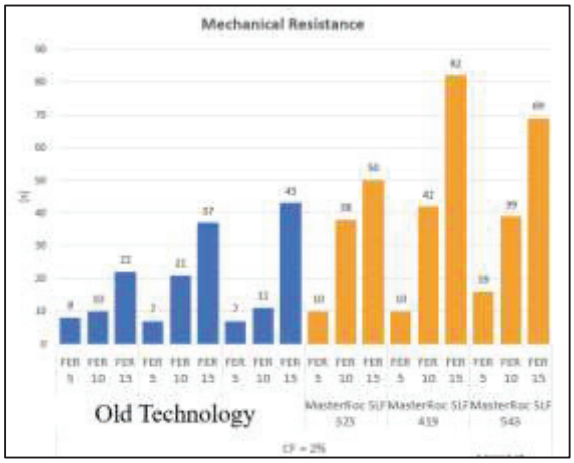


Figure 7. Old and New Technology comparison Mechanical Resistance at Cf 2%.

4 INTERPRETATION OF RESULTS

The most effective way to provide a reliable scientific interpretation of the Half-Life Time and Mechanical Resistance tests carried out on our New Technology of foaming agents is the execution of high-level technical benchmarks that include other similar foaming agents available in the TBM industry. This benchmark allows to verify the validity of the New Technology of foaming agents, erecting an unbridgeable void with the Old Technology in terms of performance and stability.

In 2020, the Department of Structural and Geotechnical Engineering and the Department of Chemical Engineering Materials Environment, La Sapienza University of Rome (Italy), have developed a new classification of foams based on the stability of the generated foam; the new classification has arisen five classes of foaming agents, where Class I is the strongest (more stable, more performing and durable over time) and Class V is the weakest. In this scientific work, they have plotted all the Old Technology of foaming agents available on the market by displaying HLT (at Cf 2% - Y axis) vs FER (FER 10 – X axis), as shown in Figure 8 with dark dots. The same departments in 2021 have added Master Builders Solutions' New Technology of foaming agents, MasterRoc SLF 325, SLF 419 and SLF 543, de facto being obliged to create a new superior class. The results of this scientific work are displayed in Figure 8 below.

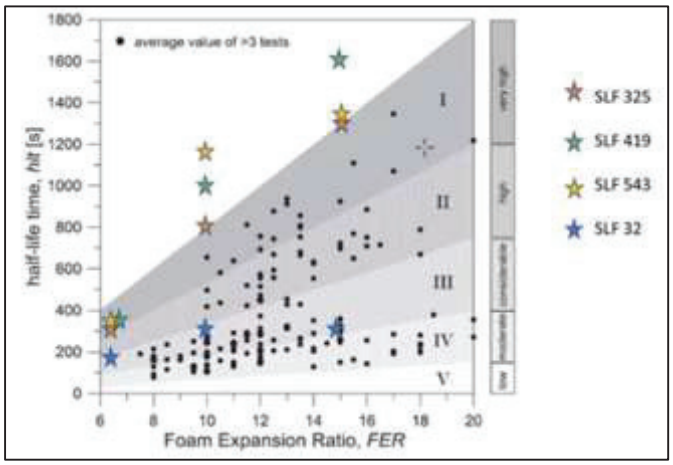


Figure 8. Foaming products classification based on the stability of the generated foam.

It worth mentioning that also our Old Technology MasterRoc SLF 32 is displayed, belonging to Class III "Considerable Stability". The results displayed in Figure 8 are reinforced by our own internal benchmarking, where Half-Life Time and Mechanical Resistance tests results of our MasterRoc SLF New Technology (in orange) and Old Technology (in blue) are shown with

two other foaming agents available on the market (in red) in Figures 9 and 10 below at three different concentration levels (Cf 1-3%).

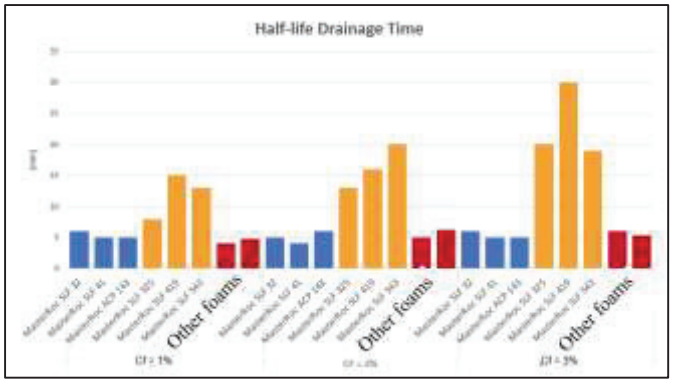


Figure 9. Half-Life Time benchmark.

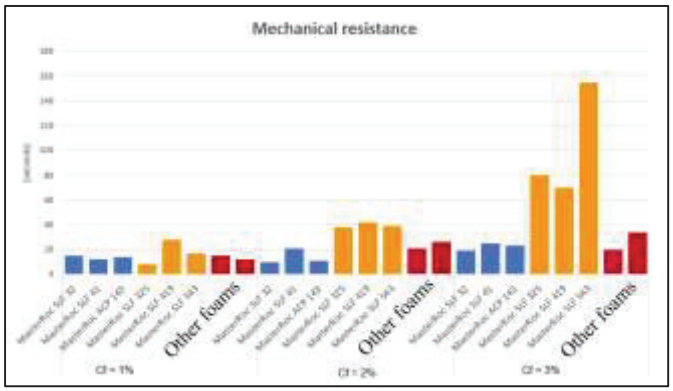


Figure 10. Mechanical Resistance benchmark.

The conclusion we can derive is that, not only our New Technology has higher drainage stability, but the same stability increases with the increase of FER; plus, no other foaming agents currently in the industry perform equally.

5 ENVIRONMENTAL ASSESSMENT

5.1 Biodegradability Tests Description

The biodegradation tests were performed using the BOD VELP system (Figure 11 below).

Figure 11. BOD VELP system.

The BOD (Biochemical Oxygen Demand) test investigates on the biodegradation characteristics of a specific sample, i.e. its tendency to be oxidized by environmental microorganisms to water, carbon dioxide, inorganic salts and partially oxidized carbon compounds. The BOD system allows to measure the oxygen really used by the bacteria inoculum added into the sample present in the BOD bottles that are closed with a pressure gauge stopper.

During the biodegradation process the bacteria population growth through the oxidation of carbon sources present in the sample, that are transformed in other products (water, inorganic salts, carbon dioxide and partial oxidized compounds). Basing on the rate of biodegradation and the size of the lag-phase (i.e. the period that bacteria population requires to acclimate in the medium and to start the oxidation of the carbon sources) it is possible to understand if there are toxic compounds, or compounds difficult to be oxidize, or if the carbon sources is present in too large quantity that may inhibit the beginning of the process.

The analyzed sample is diluted in the selected concentration in a mineral medium (prepared according to OECD 301D guidelines) and added in the BOD bottle with a soil bacteria inoculum (extracted according to IRSA-CNR 5120 procedure from a commercial soil humus Altea Natural Humus: Composition of the dry product is Nitrogen (N) content 2% and Organic (C) content 26%). Then a magnetic stirrer bar is added in the bottle to let the mixing of the medium and the bottle is closed with the pressure gauge stopper. Below the pressure gauge stopper a carbon dioxide trap is present, to capture the gas and to let the pressure gauge to read the pressure variation, that is converted in mg of oxygen consumed by microorganisms per L of solution in the bottle. The bottles are covered and placed in a thermostat refrigerator with a specific temperature set point (22°C), to avoid photolytic processes and possible variation in the biodegradation rate due to environmental temperature oscillation. Every day the pressure values are measured through the stopper. According to OECD 301 guidelines, the substance studied can be classified as “readily biodegradable” if the BOD/COD0 at 28 days is larger than 0.6.

5.2 Biodegradability Tests Results

The test was conducted according to the OECD Guideline n. 301D.

The product MasterRoc SLF 325 was diluted at 0.1 % (wt) in the mineral medium and inoculated. For the estimation of degradation rate and to evaluate the removal of oxidizable compounds from the sample, the BOD data are usually reported normalized with respect to the initial COD value. The initial value of COD is as follows:

- MasterRoc SLF 325: 176.95±31.07 mg/L
- MasterRoc SLF 419: 351.64±26.36 mg/L
- MasterRoc SLF 543: 349.71±32.63 mg/L

Figures 12 (a), 12 (b) and 12 (c) below displays the BOD curves at 28 days of the three products at 0.1% concentration.

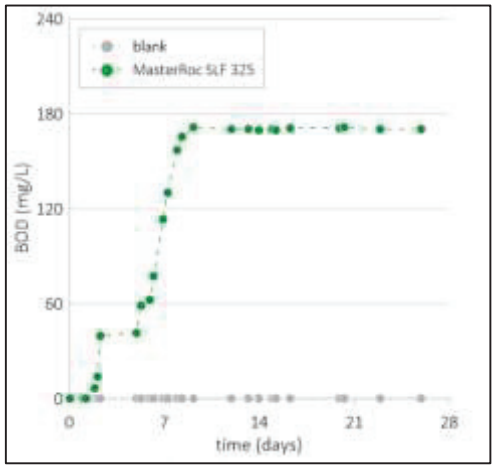


Figure 12 (a). BOD curve of the product MasterRoc SLF 325 at 0.1%.

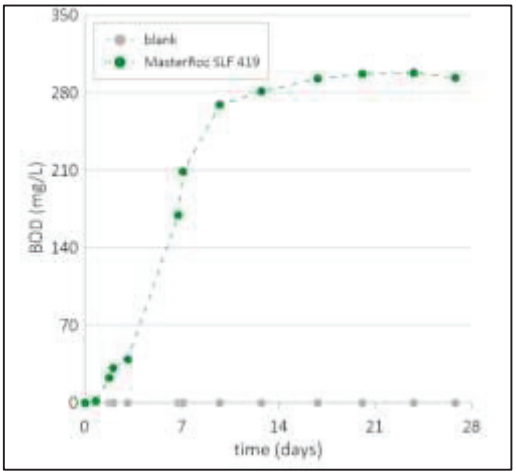


Figure 12 (b). BOD curve of the product MasterRoc SLF 419 at 0.1%.

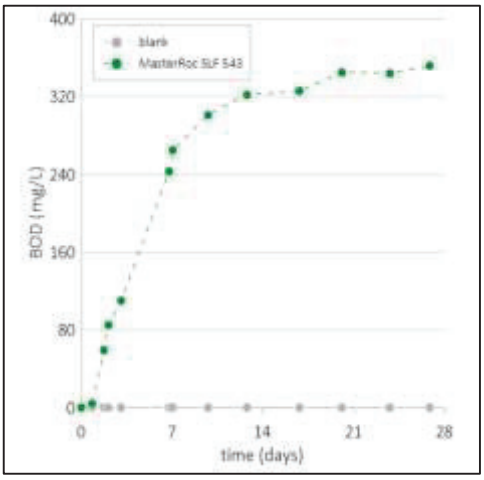


Figure 12 (c). BOD curve of the product MasterRoc SLF 543 at 0.1%.

Figures 13 (a), 13 (b) and 13 (c) shows the relative degradation curves, i.e. BOD/COD0 values over the time.

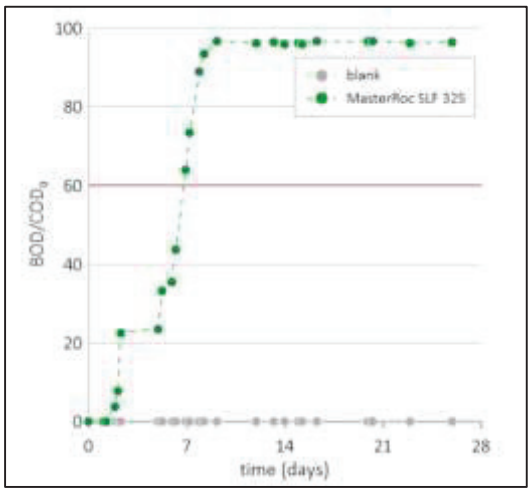


Figure 13 (a). Degradation curve of the product MasterRoc SLF 325.

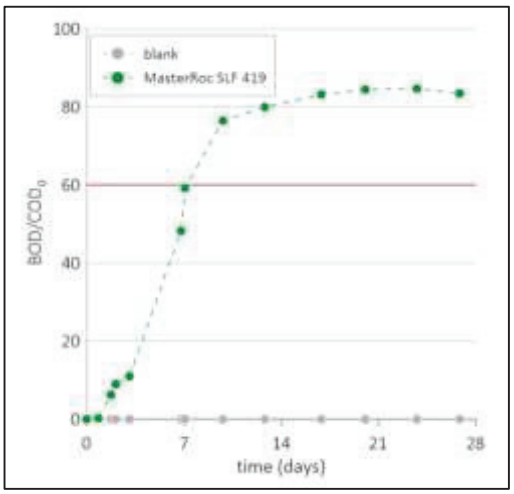


Figure 13 (b). Degradation curve of the product MasterRoc SLF 419.

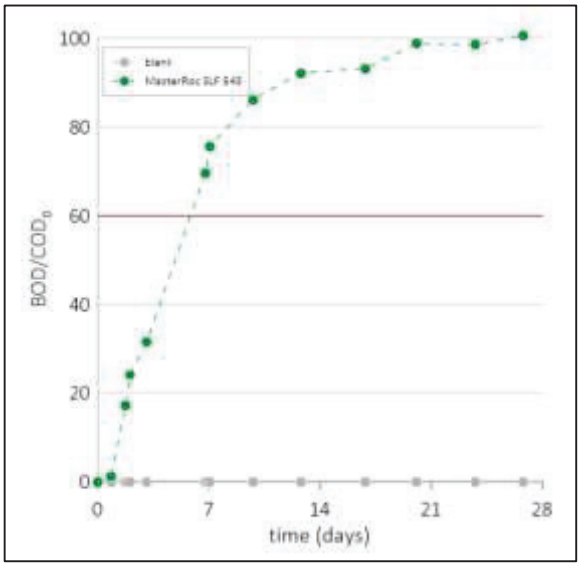


Figure 13 (c). Degradation curve of the product MasterRoc SLF 543.

After the biodegradation test the following parameters were determined (According to the OECD Guideline n. 301D):

- Lag phase, defined as the period from inoculation in a die-away test until the degradation percentage has increased to about 10%.
- Degradation phase, representing the interval time from the end of the lag period to the time when 90% of the maximum level of degradation has been reached.
- 10-d window, defined as the 10 days immediately following the attainment of 10% biodegradation.

The following Table 1 displays the results for the products:

Table 1. Lag phase, degradation phase and 10-d window results for the three products.

	Lag Phase (Days)	Degradation Phase (Days)	10-d window (Days)
MasterRoc SLF 325	2.1	7.8	12.1
MasterRoc SLF 419	2.5	9.8	12.5
MasterRoc SLF 543	1.3	12.3	11.3

5.3 Study of biodegradation kinetic

The biodegradation rate of the three products was analyzed according to a pseudo-first order kinetics whose equations are shown below:

$$\frac{d(C)}{dt} = -k\,C$$

$$C(t) = C_0\, e^{-kt}$$

$$BOD_{(t)} = BODu\,(1 - e^{-kt})$$

where, BOD(t) is the oxygen consumption at time t (mg/L), k is the pseudo-first-order constant (d-1) and BODu (mg/L) is the oxygen necessary for the degradation of all the biodegradable components present in the surfactant tested.

MasterRoc SLF 325

From the non-linear regression (Figure 14 below) of the experimental data a kinetic constant equal to 0.154 d-1 was obtained. Basing on the obtained results, it is also possible to estimate a half-life time of the product biodegradation as t1/2=ln(2)/k=4.50 d, according to a pseudo-first order kinetic model.

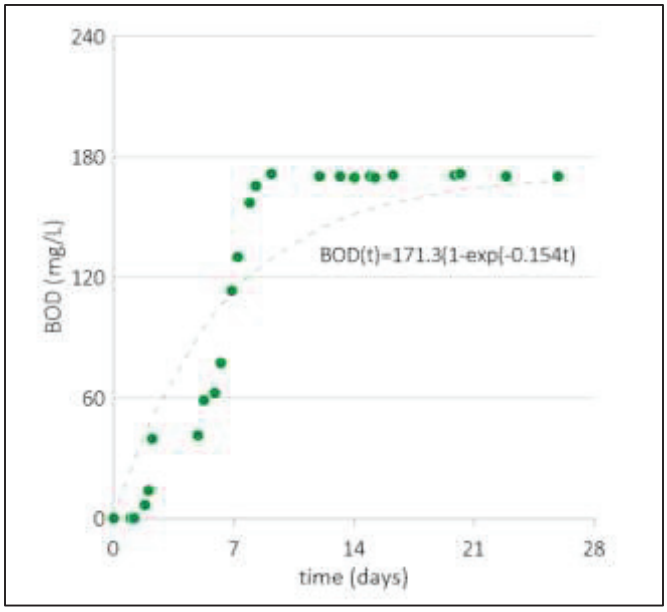


Figure 14. Comparisons of experimental data with kinetic model (non-linear data fitting) for MasterRoc SLF 325

MasterRoc SLF 419

From the non-linear regression (Figure 15 below) of the experimental data a kinetic constant equal to 0.139 d-1 was obtained. Basing on the obtained results, it is also possible to estimate a half-life time of the product biodegradation as t1/2=ln(2)/k=5 d, according to a pseudo-first order kinetic model.

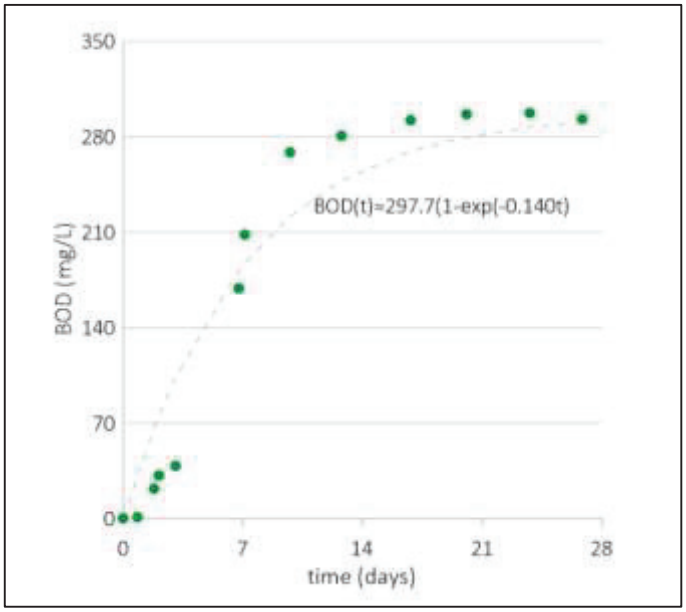


Figure 15. Comparisons of experimental data with kinetic model (non-linear data fitting) for MasterRoc SLF 419.

MasterRoc SLF 543

From the non-linear regression (Figure 16 below) of the experimental data a kinetic constant equal to 0.165 d-1 was obtained. Basing on the obtained results, it is also possible to estimate an half-life time of the product biodegradation as t1/2=ln(2)/k=4.20 d, according to a pseudo-first order kinetic model.

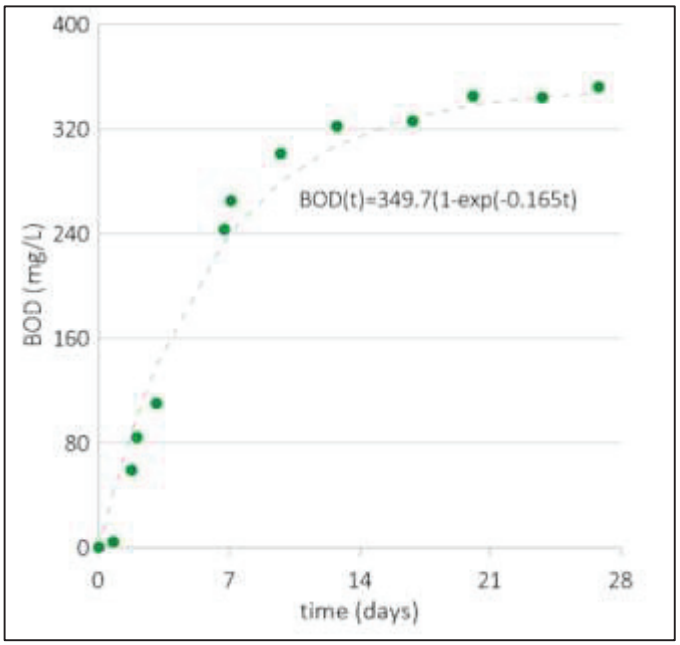


Figure 16. Comparisons of experimental data with kinetic model (non-linear data fitting) for MasterRoc SLF 543.

According to the obtained results it is possible to define that all the three products are readily biodegradable (BOD28/COD0>0.6).

6 CASE STUDY

Łódź Railway Node (Poland) – November 2021

- No.1 EPB TBM with excavation diameter 8.78m is currently excavating no.4 x 1.15km/each tunnel.
- Geology is sand and clay with mixt areas containing gravel and big boulders.
- Not much water in the ground.

Challenges encountered at arrival in TBM

- Very high torque (over 9MNm), as shown in Figure 11 below.
- Excessive temperature in central plate of the cutterhead (picks over 50°C) and at the screw conveyor.
- EPB loss during the pause between excavation sessions (over 0.2 bar variation).
- High water absorption in the soil and low conditioning grade of the soil.
- Inability by the contractor to fill properly the main chamber with homogeneous muck.
- Current usage of a competitor's foam with 145 L/ring consumption.
- Foaming with Cf 1.5%, FER 10, FIR 100.

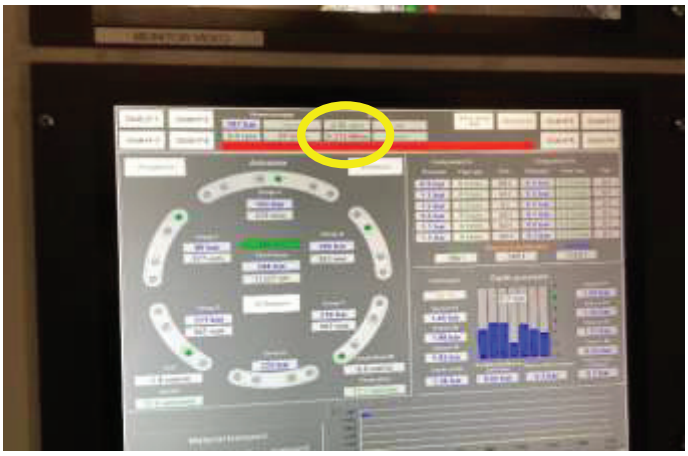


Figure 17. PLC screen displaying the high torque (9.214MNm)

Trial achievement using MasterRoc SLF 419

Proposed a solution plan in 2 steps:

- STEP 1: aggressive approach to resolve the issue of torque and temperature
  - To start foaming MasterRoc SLF 419 with Cf 2%, FER 6-8, FIR 60-80%
- STEP 2: once the problem is resolved, going to a more normal soil conditioning regime
  - A view to consumption and optimization of parameters

STEP 1

- Used the recommended soil conditioning parameters for 2 rings until a change in torque and temperature was recorded.
- Achievements:
  - Foam consumption 120 litres/ring.
  - Reduction of torque to 4.6MNm, as shown in Figure 12 below.
  - Reduction of temperature in central plate of the cutterhead and at the screw conveyor.
  - No EPB losses.

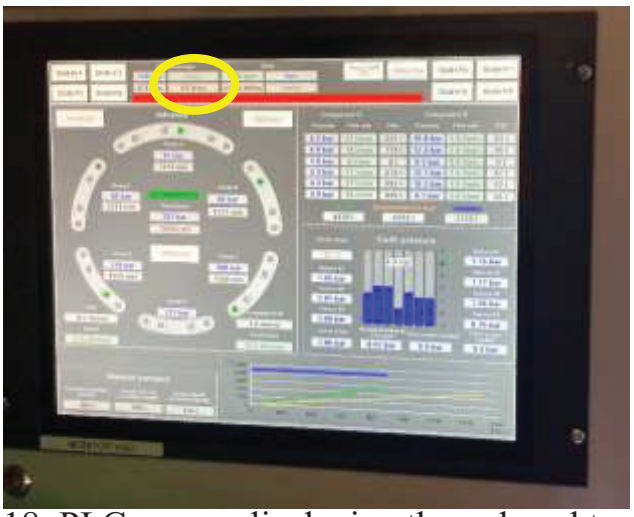


Figure 18. PLC screen displaying the reduced torque (4.656MNm)

STEP 2

- Applied less aggressive parameters with lower quality foam.
- Achievements:
  - Foam consumption 75 litres/ring.
  - Reduction of torque to 4.6MNm.

- No EPB losses.
- Soil much better conditioned.
- Improved face stability and change in rheology were recorded.
- Achieved stable EPB lowering the risk of surface settlements.

Case Study Achievements

- Reduction of torque from 9.2MNm to 4.6MNm
- Reduction of temperature from >50°C to 31°C at central plate and screw conveyor
- All achieved in only 2 rings (3.8m)
- Next 9 rings: foam consumption dropped to 75 L/ring
- Total 11 rings excavated with 1 IBC
- Good feedback from the TBM drivers
- Site trial has confirmed the Lab data

7 CONCLUSIONS

The New Technology of foaming agents presented in this article is a brand-new revolutionary series of products, designed specifically for the TBM industry in matter of soil conditioning during EPB TBM mining.

With these new foaming agents, it is now possible to control the rheology of the soil over longer time, avoiding the continuing pumping of extra low-HLT foams in the excavation chamber, thus resulting in a drastic reduction of foam consumption carried with all its economic benefits that it entails.

The benefits are particularly advantageous in heterogeneous soils with variable range of permeability in TBMs of diameters above six meters.

Also, the overall TBM excavation cycle strongly benefits from it, ensuring constant stabilization of the face during mining and reducing downtimes; the muck extracted from the TBM contains now less readily biodegradable chemicals and therefore is less harmful to the environment when compared to the Old Technology of foams.

The advantages of the New Technology of foaming agents have been described in Chapter 2 above; the constant increase of the diameter of final tunnels (tunnel ID) leads to a corresponding increase of TBM excavation diameters, the volume of soil to be excavated for each stroke and, therefore, to the time the TBM needs to build up the required EPB pressure to ensure stabilization of the excavation face during mining and ring building.

It is the time factor indeed, the new parameter to take in consideration to eases the control of the plasticity of the excavated soil in its function of supporting medium for EPB counterpressure, by drastically reducing the overall consumption of foams than traditional Old Technology.

Contractors have now a new way to approach the soil conditioning: with the New Technology of foaming agents, they are now able to plan the soil conditioning in advance, estimate performance and consumption of foams and properly evaluate the overall cost of the work by operating with higher FER and lower FIR when compared to conventional Old Technology.

REFERENCES

EFNARC, (April 2005) - *"Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and hard Rock"*.

Diego Sebastiani, Giorgio Vilardi, Irene Bavasso, Luca Di Palma, Salvatore Miliziano, Department of Structural and Geotechnical Engineering, La Sapienza University of Rome and Department of Chemical Engineering Materials Environment, La Sapienza University of Rome (2020) – *"Classification of foam and foaming products for EPB mechanized tunnelling based on half-life time"*.

GEEG (February 2022) – *"Biodegradability Tests Report on MasterRoc SLF 325, MasterRoc SLF 419 and MasterRoc SLF 543"*.

Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metro İnşaatında, Günlük Veriler Kullanılarak TBM Performansının Artırılması

Increasing TBM Performance Using Daily Data in Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metro Construction

İ. Güney
Yüksel Proje A. Ş., İstanbul

A. Akpınar
Doğuş İnşaat Tic. A. Ş., İstanbul

ÖZET: İstanbul gibi büyük metropollerde, şehir içi yolcu taşımacılığında raylı sistemlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Metro projelerinin en kısa zamanda hayata geçirilmesi ve işletmeye açılması, şehir içi trafik yoğunluğunu azaltmaktadır. Zamanı daha iyi kullanmak amacıyla, metro imalatlarında en son teknolojiye sahip makinalar kullanılmaktadır. Özellikle yeni metro tünellerinin kazı ve desteklemelerinde TBM'lerin kullanımı ve performansları hedeflenen iş programlarını yakalamak adına önem kazanmaktadır.

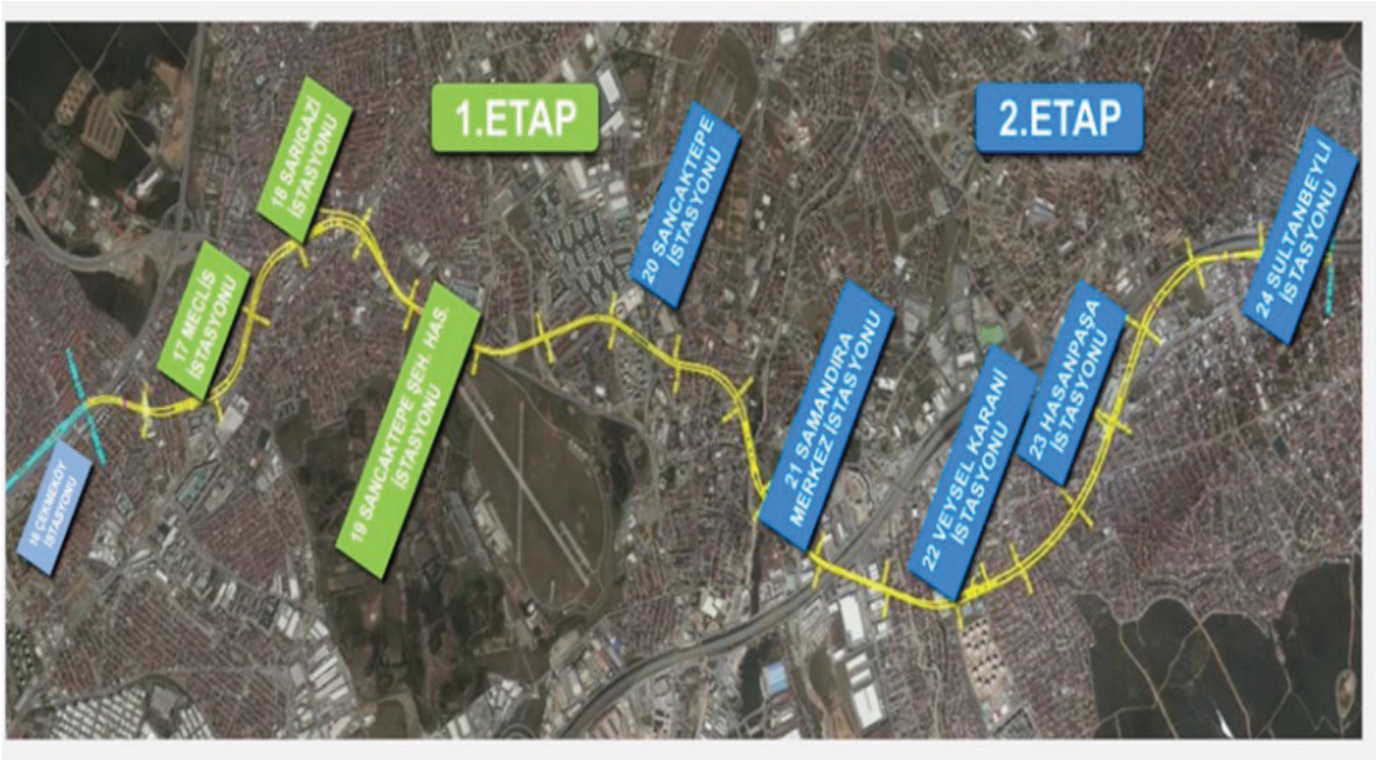
Bu çalışmada günlük veriler incelenerek TBM'lerin daha verimli halde nasıl işletilebileceği ve litoloji kaynaklı sorunlar sebebi ile istasyon yapısının gecikmesi sonucunda alınan özel önlemler, istasyon geçişinin nasıl gerçekleştirildiği anlatılacaktır.

ABSTRACT: In big metropolises such as Istanbul, the importance of rail systems in urban passenger transportation is increasing day by day. The realization and operation of subway projects as soon as possible reduces the inner-city traffic density. In order to use time better, machines with the latest technology are used in subway constructions. The use and performance of TBMs, especially in the excavation and support of new subway tunnels, gain importance in order to achieve the targeted work schedule.

In this study, it will be explained how to operate the TBMs more efficiently by examining the daily data and how the station transition was carried out thanks to the special precautions taken as a result of the delay of the station structure due to lithology-related problems.

1 GİRİŞ

Şehrimizin ulaşım sistemlerinin bir bütün olarak çözülmesi ve ulaşım yolları modları arasındaki uyum ve işlerliğin, teknik anlamda şehir içi ulaşım probleminin çözüm ortağı kabul edildiği raylı sistem hatları, günümüzde büyük önem arz etmektedir. Bunun yanında, raylı toplu taşıma sistemleri, şehrin arazi kullanımını ve ulaşım yapısını etkileyen, yüksek maliyetli büyük yatırımlardır. Ulaşım ana planı öngörüleri doğrultusunda yapılan önemli hatlarımızdan biri de Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli metro hattı, hat güzergahı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çekmeköy - Sancaktepe - Sultanbeyli metro hattı güzergahı (ARUP Yüksel Proje, 2015)

2 PROJE YAPIMI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Yaklaşık 16 km uzunluğunda ve 8 istasyonlu olan hat, 3 ilçeyi birbirine bağlamakta olup, inşaatı 2 etap halinde devam etmektedir. 1. Etap TBM çalışmaları Çizelge 1'de görüldüğü üzere 4 istasyondan oluşmakta olup, uzunluğu 3.5 km dir. Sancaktepe – Çekmeköy arası kazı, ön kalkan çapı 6557 mm olan 2 adet TBM ile yapılmıştır.

Çizelge 1. Etap 1 istasyonları

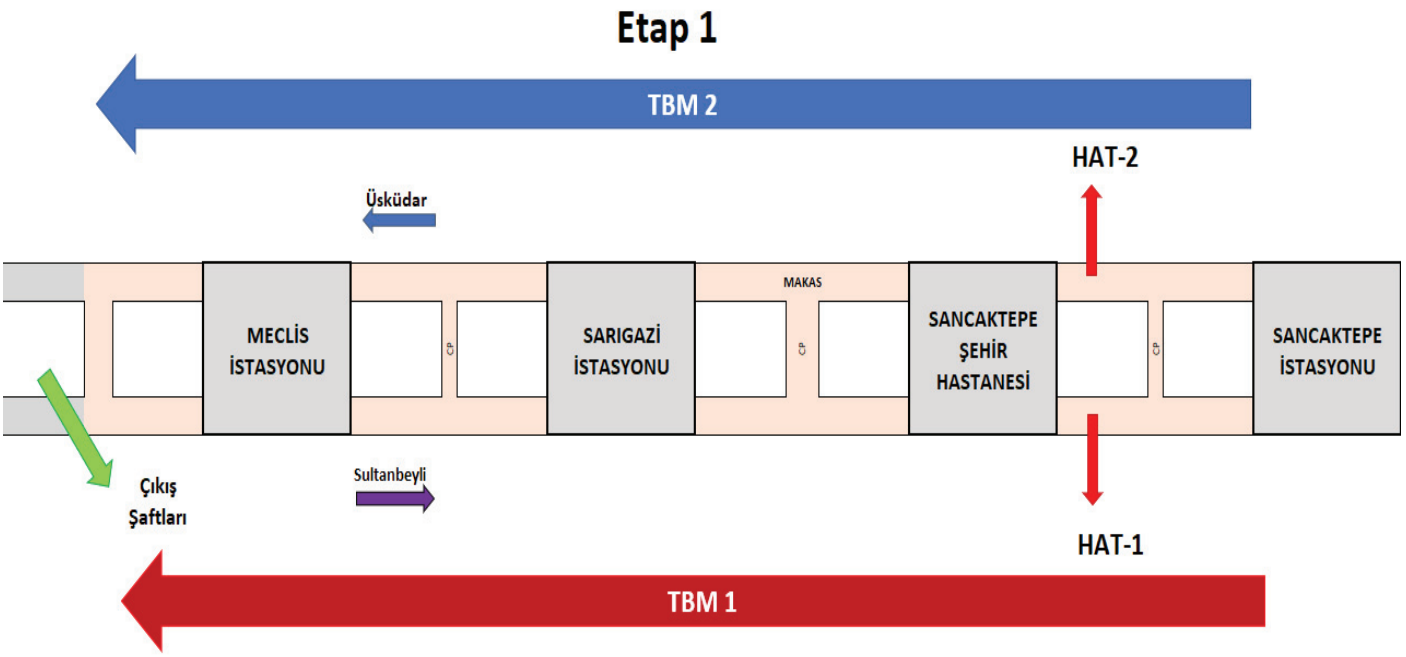
İstasyonlar	Km	Mesafe (m)
SANCAKTEPE	21+618.99	0
ŞEHİR HASTANESİ	20+027.37	1284
SARIGAZİ	18+960.53	844
MECLİS	17+711.13	1022
S17A-B(Çıkış Şaftları)	17+326.11	385

2.Etap, TBM çalışmalarında, yaklaşık 4.5 km uzunluğundaki Sancaktepe - Sultanbeyli arasında, zor zemin koşullarındaki Samandıra Merkez İstasyonu peron tünellerinin yapımının gecikmesi ön görülerek, 4 adet TBM ile çalışılmasına karar verilmiştir. Bunun içinde Çizelge 2 'de gösterilen istasyonlardan, Sultanbeyli'de TBM'lerin indirilmesi için aç-kapa yapısı oluşturulmuştur. 2 adet TBM'in Sancaktepe - Veysel Karani İstasyonu yönünde, diğer 2 TBM'in ise Sultanbeyli - Veysel Karani yönünde çalıştırılması kararlaştırılmıştır.

Çizelge 2. Etap-2 istasyonları

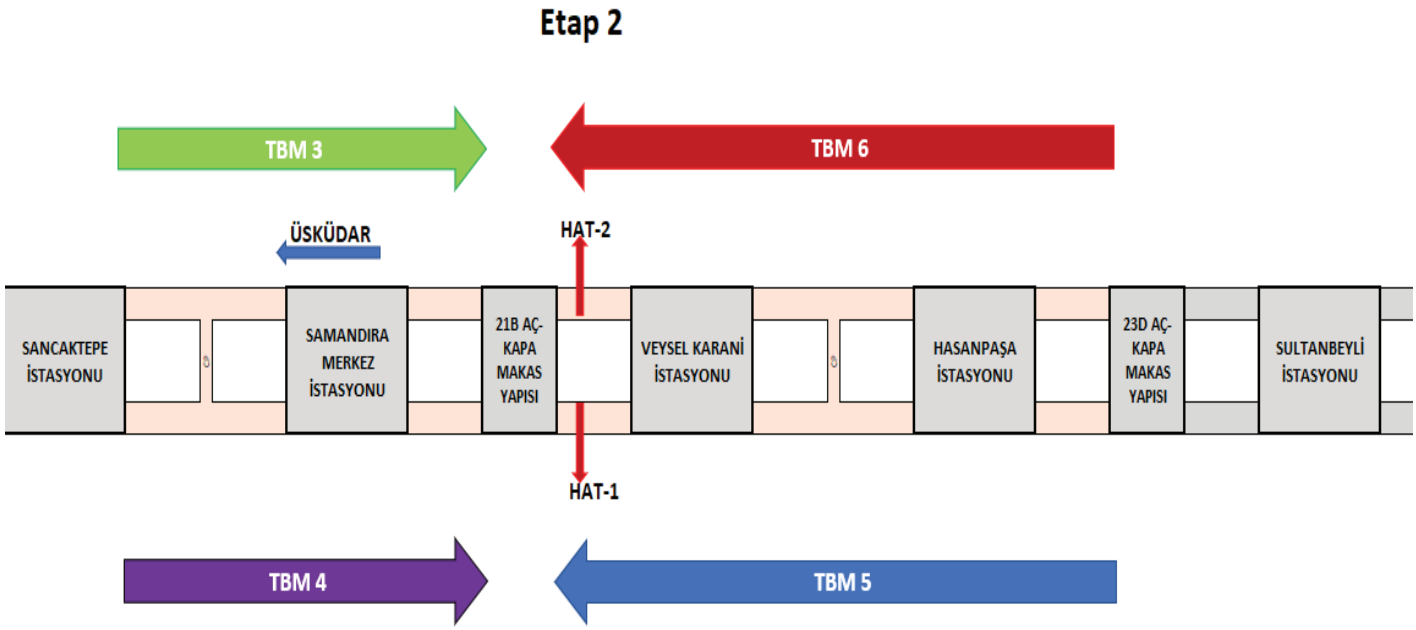
İstasyonlar	Km	Mesafe (m)
SANCAKTEPE	21+769.19	0
SAMANDIRA	22+827.33	804
MAKAS S21B	23+584.12	670
VEYSEL KARANİ	24+820.58	1051
HASANPAŞA	26+186.17	1134
SULTANBEYLİ MAKAS	27+130.01	944

İlk aşamada, TBM-1 ve TBM-2, Sancaktepe İstasyonu'ndan (S20) kazılarına başlayarak, Şehir Hastanesi İstasyonu (S19), Makas Yapısı (18C), Sarıgazi İstasyonu (S18), Meclis İstasyonundan (S17) geçip iki adet TBM çıkış şaftından (S17A-S17B) çıkarak kazılarını tamamlamıştır. Bu kilometre itibari ile NATM tünel imalatı ile Üsküdar – Çekmeköy hattına bağlanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Etap 1'in TBM işletmeleri

Proje yapımının ikinci aşamasında, TBM-3 ve TBM-4 Sancaktepe İstasyonu'ndan (S20) kazılarına başlayarak, Samandıra İstasyonundan (S21) geçip Makas Yapısın da (S21B) kazılarını tamamlamıştır. TBM-5 ve TBM-6, S23D Aç-kapa/pilot tünelinden kazılarına başlayarak, Hasanpaşa İstasyonu (S23), Veysel Karani İstasyonu (S22) ve Makas Yapısın da (S21B) kazılarını tamamlayacaktır (Şekil 3).

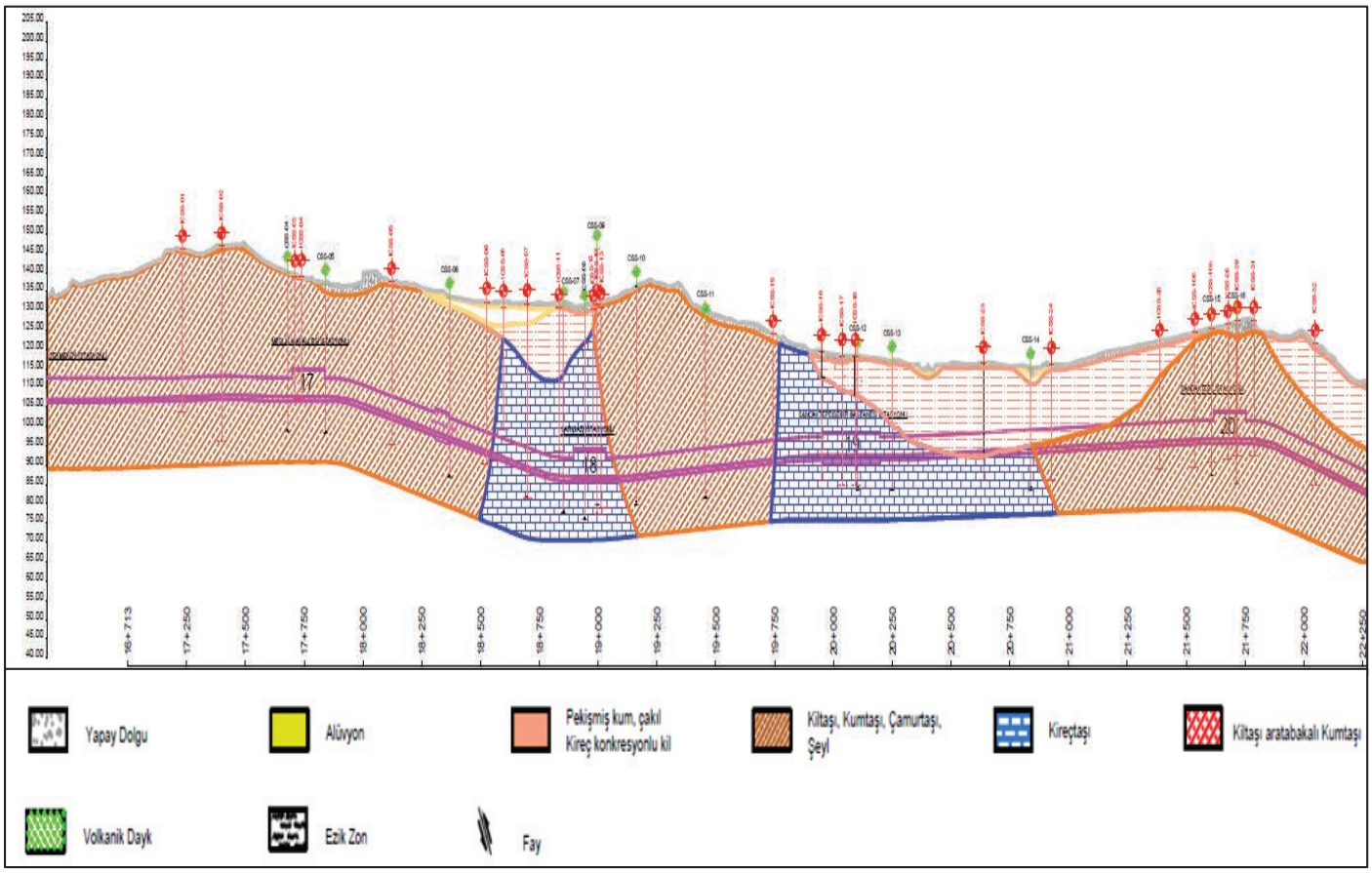


Şekil 3. Etap 2'nin TBM işletmeleri

2.1 Hat Güzergahının Jeolojik Profili

Etap 1 olarak tariflenen kısımda, Sancaktepe ve Meclis Mahallesi istasyonları arasında 3 farklı formasyonda kazı yapılmıştır. Etap 1 TBM tünel güzergahındaki hakim olan jeolojik formasyon kiltaşı–kireçtaşı ardalanmasıdır.

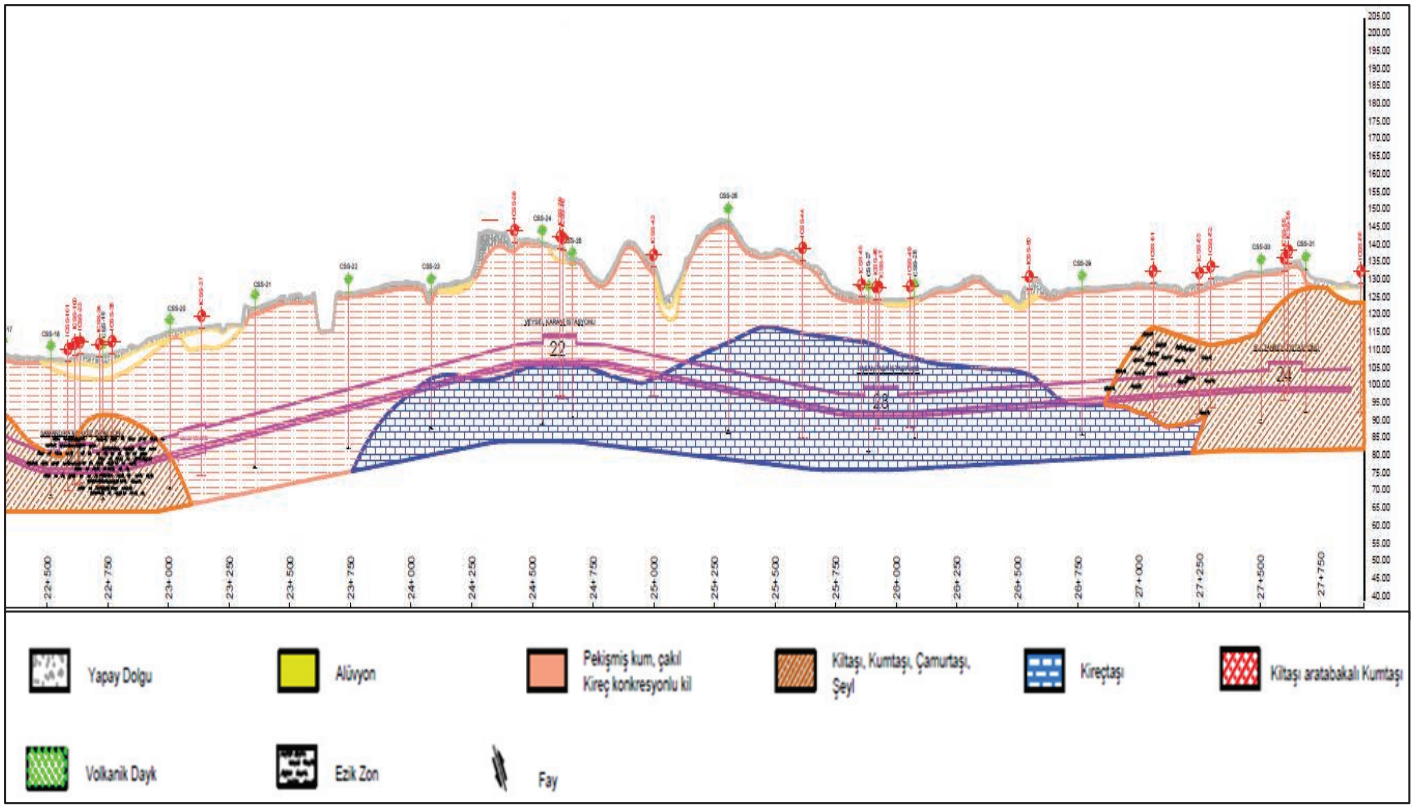
Özellikle Sancaktepe İstasyonu tünel güzergahındaki kiltaşı birimleri, yağlı ve tabakalanması düzensiz haldedir. Sancaktepe Şehir Hastanesi'nden sonra ve Sarıgazi İstasyonu ve Meclis



Şekil 4. Etap 1'in jeolojik kesiti (ARUP Yüksel Proje, 2015)

İstasyonları arasında, Pendik formasyonu olarak tariflenen kireçtaşı biriminin içerisinde kazılarını gerçekleştirmiştir. Bu bölgelerde yeraltı su seviyesinin de yüksek olması, kazıların oldukça zor şartlar altında yapılmasına sebebiyet vermiştir (Şekil 4).

Etap 2 olarak ifade edilen projenin ikinci kısmında, Sultanbeyli istasyonundan sonra gelen Makas yapısından, Samandıra Makas yapısına kadar TBM kazı faaliyetleri yürütülmektedir. Bu bölgedeki jeolojik formasyon, Hasanpaşa istasyonunda kireçtaşı, Veysel Karani istasyonundan Makas yapısına kadar yumuşak kil ve şeyllerden oluşan Sultanbeyli Formasyonuna ait Dudullu üyesinden oluşmaktadır (Şekil 5). Tüm güzergahın km bazlı jeolojik litolojisi ise Çizelge 3'de gözükmektedir.



Şekil 5. Etap 2'nin jeolojik kesiti (ARUP Yüksel Proje, 2015)

Çizelge 3. Güzergahın litolojisi (ARUP Yüksel Proje, 2015)

Başlama Km	Bitiş Km	Esas Formasyon (üye)	Tali Formasyon (üye)
27+137	26+540	Sultanbeyli Formasyonu (Tst)	Orhanlı Üyesi (Tst)
26+540	25+320	Pelitli Formasyonu (SDp)	Soğanlık Üyesi (SDpsg /W5)
25+320	23+500	Sultanbeyli Formasyonu (Tst)	Orhanlı Üyesi (Tst)
23+500	21+740	Pelitli Formasyonu (SDpsg/W5)	Soğanlık Üyesi (SDpsg /W5)
21+618	21+320	Pendik Formasyonu (Dpk)	Kartal Üyesi (Dpk)
21+320	20+540	Sultanbeyli Formasyonu (Tst)	Orhan Üyesi (Tst)
20+540	19+820	Pelitli Formasyonu (SDpsg)	Soğanlık Üyesi (SDpsg)
19+820	19+200	Pendik Formasyonu (Dpk)	Kartal Üyesi (Dpk)
19+200	18+980	Pelitli Formasyonu (SDpsg/W5)	Soğanlık Üyesi (SDpsg)
18+980	17+326	Pendik Formasyonu (Dpk)	Kartal Üyesi (Dpk)

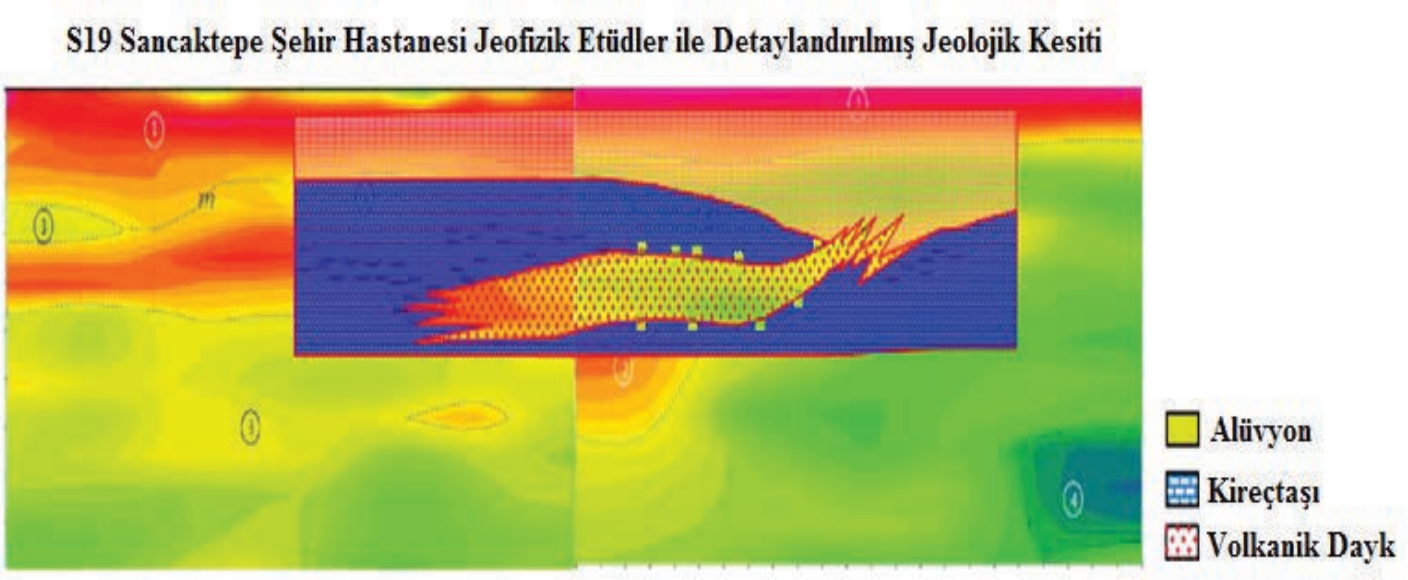
2.1.1 Şehir Hastanesi İstasyonu (Aç-Kapa) Jeolojik Profili

Şehir Hastanesi İstasyonu (S19) içerisinde Pendik Formasyonu (Dp); kırıklı,çatlaklı, parçalı, zayıf - orta kaliteli kireçtaşı izlenmiştir. Pendik Formasyonu büyük bölümüyle kil-mil ince kum boyu ince gereçli, bol mika pullu kırıntılı kayaçlardan oluşur. Orta ve üst düzeylerinde değişen kalınlıkta kireçtaşı ara düzeylerini kapsar. Formasyon bu incelemede, Kartal Üyesi ve Kozyatağı Kireçtaşı Üyesi olmak üzere iki üyeye ayrılmıştır.

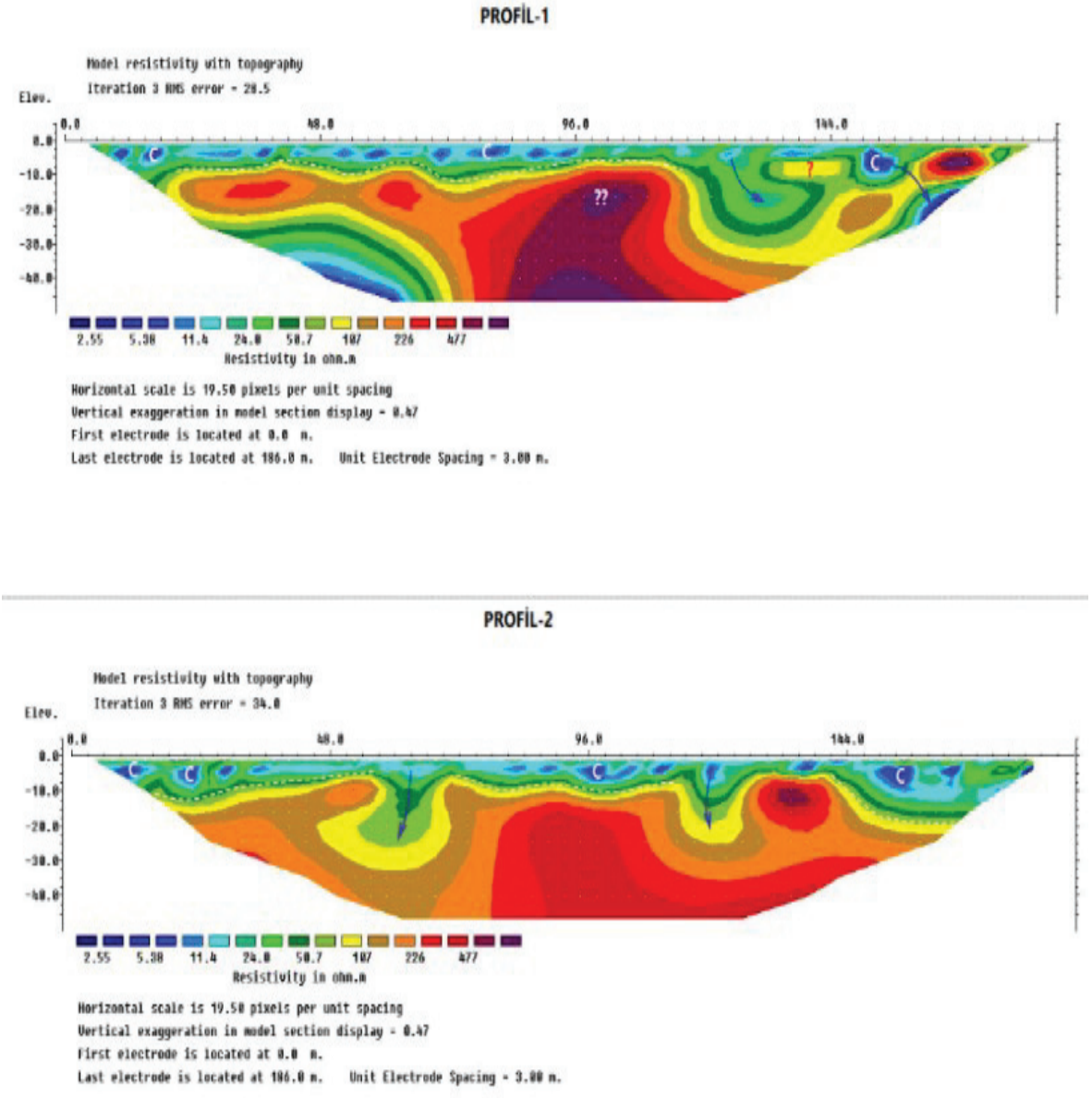
Kartal Üyesi (Dpk) başlıca kara-koyu külrengi, yer yer koyu yeşilimsi, ayrışmış boz-açık kahverengi, bol mikalı ince kırıntılılardan oluşan Kartal Üyesi, günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan anlamıyla, Pendik Formasyonu'nun Kozyatağı Kireçtaşı Üyesi'nin dışında kalan tüm kırıntılılarını kapsar. Kara-koyu kül rengi, bozunmuşu kahverengi, boz, ince kum-mil boyu kuvars, az oranda feldispat, volkanik ve mafik tane ile killi ve yer yer kireçli hamur kapsar; kuvarsvake türü miltaşı ve kiltaşı egemendir. Dış etmenlere açık yüzeylerinde levhamsı ayrışma gösterdiğinden genellikle şeyl özelliği kazanmıştır. Seyrek olarak, kalınlığı 5-10 cm arasında değişen, mikalı kumtaşı ara düzeylerini kapsar. Formasyon iyi korunmuş bol makrofosil (brakyopod, trilobit, krinoid vd) kapsayışı ve ince gereçli oluşuyla benzer kayastratigrafi birimlerinin, örneğin Trakya ve Yayalar formasyonlarının, benzer özellikteki kırıntılı kayaçlarından sahada kolayca ayırtedilebilir. Kartal Üyesi seyrek olarak kireçtaşı ara katkılıdır. Kireçtaşı 3-5 santimetreden 1-2 metreye değin değişen kalınlıkta, bol makrofosil kavkı kırıntılıdır (İlmaz, 2017).

Kozyatağı Üyesi (Dpkz). Pendik Formasyonu, üst yarısında önceki araştırmalarda "Kozyatağı Formasyonu" ya da "Kozyatağı Üyesi" adlarıyla tanımlanmış olan kireçtaşı arakatkılı düzeyi kapsar. Haas (1968)'ın inceleme alanı dışında Kurtdoğmuş köyü dolayında "Kurtdoğmuş Tabakaları" (Kurtdoğmuş-schichten) adıyla incelediği krinoidli kireçtaşı ara katkılı kireçli şeyl düzeyine karşılık gelir. Kozyatağı Üyesi değişen oranda kireçli kiltaşı-killi kireçtaşı-kireçtaşından oluşur. Kil-kireç oranı yerden yere değişir, kireçli kiltaşı-killi kireçtaşı arasında sürekli geçişler görülür. Açıklı koyulu kül rengi, ince-orta-kalın katmanlı ya da som, yer yer laminalı, birkaç metreden onlarca metreye değin değişen kalınlıkta, genellikle ince dokulu, mikrit türü kireçtaşı egemendir. Kozyatağı Üyesi Kartal Üyesi'nin şeylleriyle yanal ve düşey geçişlidir. Arazinin daha detaylı anlaşılması adına bir dizi jeofizik sismik etütler yapılmış, ardından deneme forajları ile de detay çalışmalar oluşturulmuştur (Şekil 6) Karstik oluşumların da modellenebilmesi adına Jeofizik Multi Elektrot ve Sismik yöntemi ile arazi 3 boyutta modellenmiştir (Şekil 7). Jeolojik yapının detaylandırılmasına yönelik yapılan çalışmalar neticesinde özellikle istasyon ve makas aç-kapa yapısının oldukça değişken bir jeolojik yapı içerisinde olacağı belirlenmiştir (Tank vd., 2020a; 2020b).

Kazı öncesi yapılan detaylandırma çalışmalarında, beklenen duruma paralel oldukça değişken bir jeolojik yapı ile karşılaşılmıştır. Kireçtaşları yer yer diyabazlar ile kesilerek oldukça zayıf dayanımlarda, yer yer zemin formunda izlenmişlerdir. Yapılan sondaj çalışmalarında da yer yer 10 m derinliklerde zemin formu kazanmış kireçtaşları izlenmiştir. Yine yer yer kireçtaşlarının içerdiği düzensiz karstik boşluklar ve içerisinde kil dolgulu yapılar da izlenmiştir. Ayrıca kireçtaşlarının diyabazlardan etkilenmemiş kesimlerinde oldukça yüksek dayanımlarda (62-82 MPa arası tek eksenli sıkışma dayanımı) oldukları izlenmiştir. Yine diyabazların da altere olmamış bölümlerinde oldukça yüksek (100 MPa' ya ulaşan) dayanımda oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 6. Jeofizik Multi Elektrot Yöntemi ile Olası Karstik Boşlukların Modellenmesi



Şekil 7. Jeofizik sismik etüt ile detaylandırılmış jeolojik kesit

2.2 TBM Özellikleri

Bu projede, Herrenknecht marka. TBM'ler (S360, S363, S366) ve CRCHI (Çin) DZ-498 Marka 4 adet TBM kullanılmıştır. TBM'lerin özellikleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge. 4 TBM'lerin özellikleri

TBM Özellikleri	Herrenknecht	CRCHI
Kazı Modu	EPB	EPB
Kazı Çapı	6570 mm	6570 mm
Kesici Kafa Motorları	Hidrolik	Elektrik
Güç	4x315 kW	7x160 kW
Maksimum İtme Basıncı	42574 kN	44598 kW
Max Tork	6356 kNm	6500 kNm
Kesici Kafa Hızı	0-5,5 dev/dak	0- 4 dev/dak
Disk Sayısı Ve Çapı	38 x 17 inç	38 x 17 inç

3 TBM'LERİN PROJE GENELİNDEKİ KAZI PERFORMANSLARI

İş programına bağlı olarak istenilen hızın sağlanabilmesi için, TBM içerisindeki sistemlerin birbirleriyle uyumlu, arkada iş bırakmadan çalışması sağlanması gerekmektedir. Sistem içerisinde,

- Kazı ve pasa nakli
- Enjeksiyon-segment nakli ve montajı
- Segment arkalarının doldurulası (Kuyruk ve Kontak enjeksiyonları)

İşlemlerinin birlikte yapılması zorunludur. Aksamaların gözlemlenmesi, tanının doğru konması amacıyla günlük imalat raporları titizlikle çıkarılmalıdır. Günlük imalat raporlarının verileri çerçevesinde aksayan kısımları revizyonlarla giderilmiştir. TBM sisteminin kurulması, işletme veriminin istenilen seviyeye ulaşması için personelin sistemi tanıma ve alışma süresi mümkün olduğunca kısaltılmıştır. Uygulama sırasında, TBM'in ilerleme hızını etkileyen faktörleri şöyle sıralayabiliriz;

1) İşletme sistemi, montaj veya uygunluk hatalarının sonucu oluşan duraklamalar
2) Tünel zemininde beklenmedik değişiklikler.
3) Kaya dirençlerindeki beklenmedik değişiklikler
4) TBM işletim sisteminde meydana gelen arızalar
5) İstasyon ve peron yapılarının imalatından kaynaklanan gecikmelerin, TBM'leri etkilemesi

TBM performanslarının, iş programına uygun şekilde çalıştırılması için günlük olarak tutulan vardiya raporlarından, kazı süreleri, ring montaj süreleri, arızalar, enjeksiyonlar, bakım süreleri vb. durumlar dakika bazlı olarak incelenmiş, bu doğrultuda oluşturulan tablolara göre TBM'lerin hangi kazı ve montaj miktarınla ne kadar zaman harcadıkları yüzdesel olarak ortaya konmuştur.

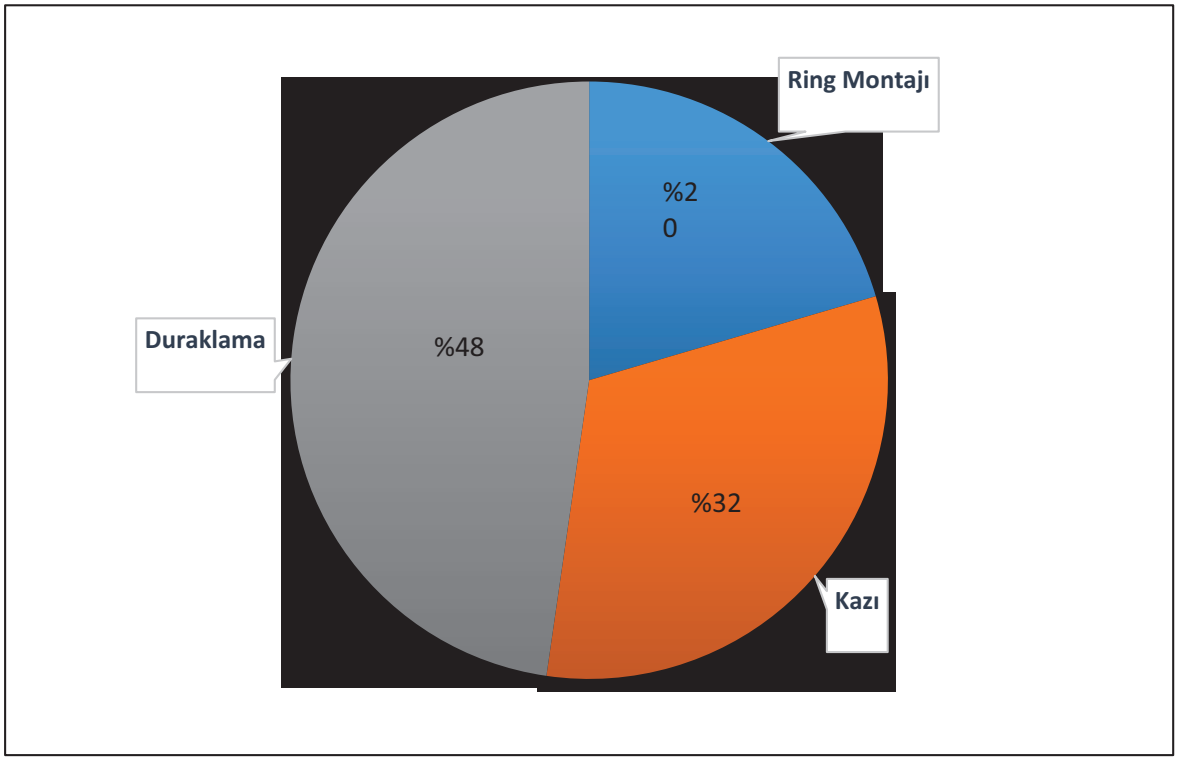
Bu veriler titizlikle incelenmiş; günlük, haftalık, aylık raporlar halinde kayıt altına alınmış, nerelerde aksamalar yaşandığı tespit edilerek bu doğrultuda gerekli önlemler alınmıştır. Her ay farklı durumlar için yaşanılan sorunlar giderilerek, hedeflenen iş programı gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Tüm bu veriler her bir TBM için yapılmış olup, ayrı ayrı çözümler üretilmiştir. Bu çalışmada sadece TBM-1 verileri incelenmiştir.

Çalışma yapılırken, TBM'lerin istasyon geçişleri göz ardı edilmiştir, yalnızca tünel kazıları ve süreleri göz önünde bulundurulmuştur. Her istasyonun kendi içerisinde geçiş özellikleri mevcut olmakla beraber, özellikle Şehir Hastanesi istasyonu geçişi ilerleyen bölümlerde özel olarak ele alınacaktır.

Tünel yapım esnasında karşılaşılan çeşitli duraklamaların nedenleri, bakım süreleri, makine kullanım süreleri ay bazında Çizelge 5'de gösterilmektedir. Makine kullanım oranı bir vardiya içerisinde kazıya ayrılan zamanın yüzdesidir. Diğer zamanlarda çeşitli nedenlerle (planlı bakım ve plansız arıza) duraklamalar olmaktadır. Şekil 8'de görüldüğü üzere, makine kullanım oranı(kazı) %32, Ring montajı yüzdesi %20, Duraklama %48 olarak gerçekleşmiştir.

Hat-1 boyunca; (istasyon geçişleri hariç) TBM-1 7726 saat çalışma yapmıştır. Bunun 2459 saati Kazı, 1581 saati Ring montajı ve 3686 saati Duraklama olarak gerçekleşmiştir.

21+618.99 – 17+326.11 km arasında planlanan ve gerçekleşen aylık kazı ve destekleme imalatları Çizelge 6'da özetlenmektedir. Ortalama aylık ilerleme hızları 2020 Kasım ayında 127 metrelerde iken 2021 Haziran ayında 421 metreye ulaştığı görülmektedir. Ortalama aylık ilerleme hızı 360m/ay olarak gerçekleşmiştir. Ortalama günlük ilerleme hızları, 4.53 metrelerden 15.03 metrelere ulaşmıştır. Etap ortalaması 9.66 m/gün olarak gerçekleşmiştir. Toplamda Hat-1 boyunca, 2352 ring montajı yapılmış olup, en iyi aylık ring montajı 2021 haziran ayında, 281 ring olarak gerçekleşmiştir. Yaklaşık olarak, günlük ortalama 10 ring/gün dür.



Şekil 8. Hat-1/TBM-1' in çalışma grafiği

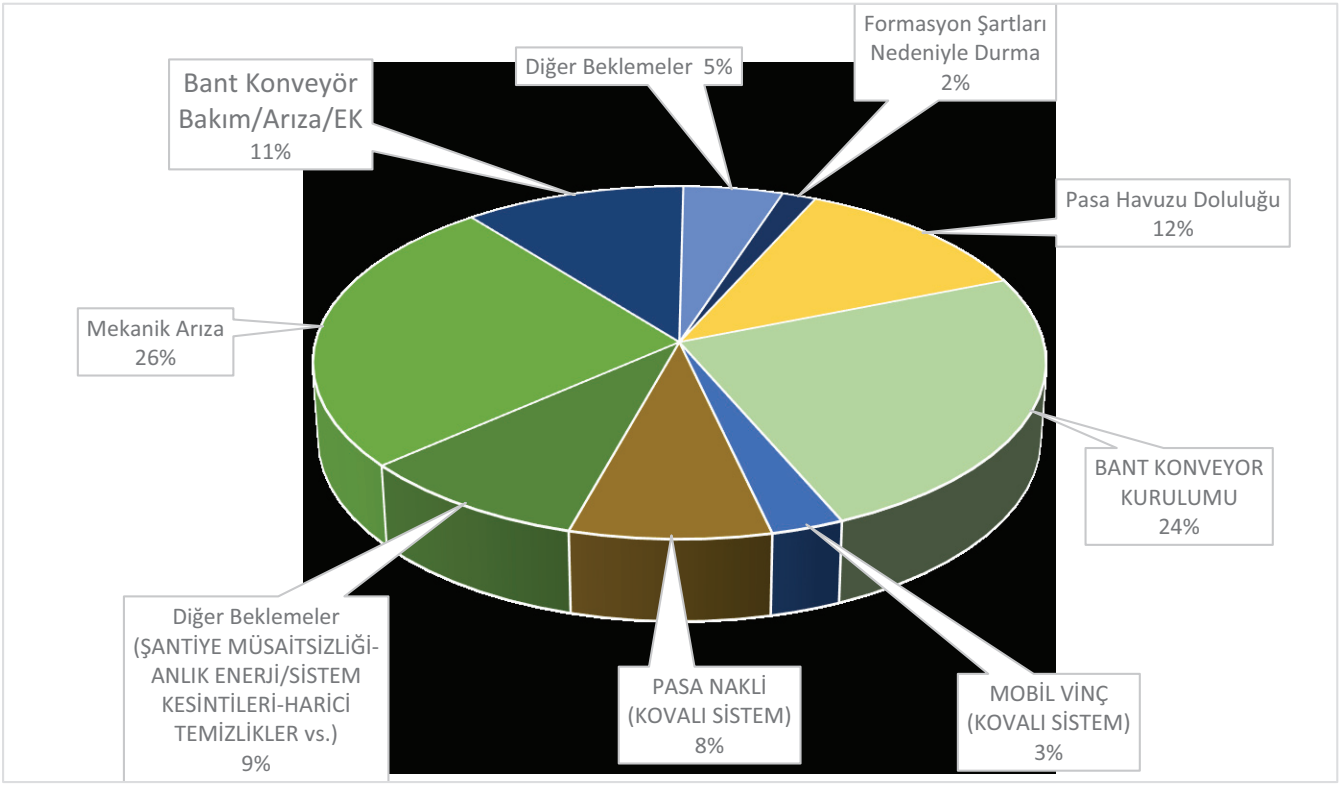
Çizelge 5. Hat-1/TBM-1'in Çalışma Performans Verileri

ZAMAN	HAT 1/TBM-1 ÇALIŞMA PERFORMANSI		Kazı ve Destekleme Yapılan Zaman		Kazı			Ring Montajı		
	Kazı ve Destekleme Yapılan Toplam Zaman (saat)	Kazı ve Destekleme Yapılamayan Toplam Zaman (saat)	Saat	%	Saat	m/saat	%	Saat	adet/saat	%
Kasım 20	**198**	**418**	198	32,20%	113	**0,8**	57,14%	85	1,07	42,86%
Aralık 20	274	309	274	47,03%	181	1,18	66,12%	93	2,33	33,88%
Ocak 21	127	533	127	19,30%	73	1,15	57,27%	54	2,00	42,73%
Şubat 21	376	218	376	63,34%	222	1,54	59,00%	154	1,48	41,00%
Mart 21	416	222	416	65,27%	207	1,57	49,69%	210	1,02	50,31%
Nisan 21	231	385	231	37,49%	128	1,31	55,54%	103	1,02	44,46%
Mayıs 21	319	261	319	55,05%	200	1,11	62,78%	119	1,48	37,22%
Haziran 21	450	166	450	73,13%	278	1,54	61,81%	172	1,65	38,19%
Temmuz 21	322	364	322	46,87%	193	0,96	59,98%	129	1,06	40,02%
Ağustos 21	94	148	94	38,77%	57	1,58	61,19%	36	1,4	38,81%
Eylül 21	296	137	296	68,44%	192	1,08	64,96%	104	1,3	35,04%
Ekim 21	390	226	390	63,31%	243	1,43	62,16%	148	1,78	37,84%
Kasım 21	402	148	402	73,17%	268	1,23	66,62%	134	1,65	33,38%
Aralık 21	197	77	197	71,91%	123	1,71	62,21%	74	1,84	37,79%
Ocak 22	143	77	143	65,19%	93	1,65	64,50%	51	1,98	35,50%
TOPLAM	4238	3686	4238	56,31%	2459	ort 1,36	60,99%	1581	ort 1,57	39,01%

Çizelge 6. Hat-1/TBM-1'in İmalatlar

HAT KODU	BAŞLANGIÇ İSTASYON/ALAN	BİTİŞ İSTASYON/ALAN		KAZI(m)	RİNG (ADET)	GROUT(m³)	KM BAŞLANGIÇ	KM BİTİŞ	TBM TÜNEL UZUNLUĞU	TOPLAM TÜNEL UZUNLUĞU	BAŞLANGIÇ TARİHİ	BİTİŞ TARİHİ	ÇALIŞILAN GÜN SAYISI	ORTALAMA HIZ	ORTALAMA HIZ
									m				gün	m/gün	m/gün
TBM-1 (S360)															
HAT - 1															
	SANCAKTEPE İSTASYONU (S20)	ŞEHİR HASTANESİ İSTASYONU (S19)	Ekim 20	27,00	18,00	81,00	21+618.99	20+335.57	1.283,42 m	3534.18 m	22.10.2020	21.04.2021	181 gün	7.09 m/gün	9.66 m/gün
			Kasım 20	127,50	85,00	364,50									
			Aralık 20	213,00	142,00	639,00									
			Ocak 21	111,00	74,00	333,00									
			Şubat 21	334,50	223,00	1003,50									
			Mart 21	336,00	224,00	1008,00									
			Nisan 21	133,50	89,00	395,20									
	ŞEHİR HASTANESİ GEÇİŞ		NİSAN 2021 MAYIS 2021					300,00 m							
	ŞEHİR HASTANESİ İSTASYONU (S19)	SARIGAZİ İSTASYONU (S18)	Mayıs 21	18.00	12.00	60,00	20+027.37	19+183.03	844.34 m		29.05.2021	12.08.2021	75 gün	11.26 m/gün	
			Haziran 21	421.50	281.00	1262.50									
			Temmuz 21	315.00	210.00	954.50									
			Ağustos 21	91.50	61.00	284.00									
	SARIGAZİ İSTASYON GEÇİŞ		AĞUSTOS 2021/ EYLÜL 2021					220,00 m							
	SARIGAZİ	MECLİS	Eylül 21	243.00	162.00	712.50	18+960.53	17+939.13	1.021.40 m		11.09.2021	29.11.2021	79 gün	12.93 m/gün	
			Ekim 21	400.50	267.00	1208.50									
			Kasım 21	370.50	247.00	1236.50									
	MECLİS İSTASYONU GEÇİŞ		KASIM2021 / ARALIK 2021					220,00 m							
	MECLİS	ÇIKIŞ ŞAFTI	Aralık 21	207.00	138.00	675.75	17+711.13	17+326.11	385.02 m		18.12.2021	18.01.2022	31 gün	12.42 m/gün	
			Ocak 22	178.50	119.00	428.50									
	DEMONTAJ														

TBM-1 istasyon geçişi hariç, performansı etkileyen ilk dört başlığa baktığımızda, %26 Mekanik Arıza, %24 Bant Konveyör Kurulum, %12 Döküm sahası problemi, %11 Back-up sistemidir (Şekil 9).



Şekil 9. Hat-1/TBM-1 Gerçekleşen duraklamalar dağılımı

3.1 TBM' lerin Şehir Hastanesi İstasyonu Geçişi Sırasında Karşılaşılan Durumlar

Şehir Hastanesi İstasyonu ve Makas Yapısı birleştirilerek 300 m uzunluğunda, 25 m genişliğinde ve 30 m derinliğinde planlanarak ihaleye doküman olarak konmuştur. İdealize zemin koşullarına göre oluşturulan iksa sistemine göre çalışmalara başlanmıştır. Yapılan fore kazık imalatlarında kaya kotunun kabul edilenden daha derinde (10-20 m arasında değişken) olduğu saptanmıştır. İstasyonda mevcut da sekiz adet sondaja ilave olarak otuz adet deneme delgisi yapılmış, bölgenin değişken jeolojisi sebebi ile jeofizik çalışmaların yapılmasına da gereksinim duyulmuştur. Yapılan jeofizik çalışmalar neticesinde (Elektrik ve Sismik yöntemler) volkanik sokulumlar, karstik boşluklar ve sağlam kaya değişkenliği teyit edilmiş olup kazı destek analizleri kademeli olarak revize edilmiştir. Kademeli olarak tasarlanan kazı destek sistemi sonucunda istasyon açık kazı kısa kenarda 25 metreden 40 metreye çıkmış ve bu durum imalat kalemlerinde önemli artışlara neden olmuştur. Toplamda kazı miktarı (312.000 m^3), çeşitli çaplarda fore kazık (734 adet), mini kazık (839 adet) zemin çivisi (1432 adet), ankraj imalatı (2846 adet) olarak gerçekleşmiştir. Miktarlardaki bu artışlar, iş programını olumsuz bir etki olarak yansımıştır.

Bölüm 2.1.1'de detaylı olarak jeolojisi anlatılan Şehir Hastanesi İstasyonu, iksa işleri yapılırken, zemin formasyonunun ani değişkenlikler göstermesi nedeniyle kazı ve ankraj işlerindeki imalat verimliliği ciddi oranda düşmüş ve kazı-iksa işlerinde gecikmeler meydana gelmiştir. Bu kapsamda, TBM kazı senaryosunda gecikme yaşanmaması ve 1.Etap açılış hedeflerinin sağlanabilmesi adına, iksanın kazı taban kotuna inilmesi beklenmeden projesel olarak belirlenen bir kottan itibaren kazıya devam edilmemiş olup, TBM'lerin yarı-açık kazı yaparak geçmesine karar verilmiştir (Şekil 10).

Şekil 10. Şehir Hastanesi geçiş kazıları

İstasyon kazısı içerisinde TBM geçişlerinin sağlanabilmesi adına, 400 adet geçici segment ring üretimi yapılmıştır. Her ring dışından iki sıra çelik kuşak (50x0.5x20000)mm, içten ve dıştan 10x400x20 mm ebadında çelik plakalardan, 6-8 adet kullanılarak, metrik 20x16 çelik dübeller ile sabitlenmiştir (Şekil 11).

Şekil 11. Tahkimatı yapılmış ringler

4 SONUÇLAR

Projede hedef sürelerine ulaşabilmek amacı ile bazı durumlarda pro-aktif önlemler alınması gerekmektedir. Bu amaçla, Çekmeköy - Sancaktepe - Sultanbeyli metro çalışmalarında günlük çalışma saatlerinden, makine kullanımı ile ilgili bilgiler analiz edilerek haftalık ve aylık performanslar ortaya konmuştur. Bu projede gerçekleşen performanslar, Kazı %32, Ring montajı %20 ve Duraklama %48 olarak gerçekleşmiştir. Duraklama süreleri irdelendiğinde, %26 mekanik arıza, %24 konveyör bant kurulumu, %12 döküm sahası problemi, %11 back-up sistemi arızası olarak ortaya konmuştur. Mekanik arızalar ile ilgili, ekip sayısı artırılmış ve çok arıza gösteren parçalar yedeklenmiştir. Konveyör bant kurulumu planlanan iş programının gerisinde kalınmıştır. Döküm sahası problemi için, sahada 1000 m3' lük havuz oluşturulmuştur. Back-up sistemi ile ilgili, olarak, çok arızalanan ekipmanların yedeklenmesi yapılarak çözüm oluşturulmuştur. Çalışma verimi yapılırken, Kazı ve Ring montajı birlikte göz önüne aldığımızda, TBM-1'in performansı %52 olarak gerçekleşmiştir. Bunun yanında, öngörülemeyen, litolojik değişkenliklerden dolayı "Şehir Hastanesi İstasyon Yapısı" kazı ve betonarme imalatlarının TBM geçişi için tamamlanamamasından dolayı, iş programının hedeflenen süreleri içerisinde kalabilmek için yarı-açık kazı yapılarak geçilebileceği gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

Tüm proje süreçlerinde emeği geçen İşveren İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü'ne, Müşavir Firma Yüksel Proje A.Ş.'ye, Yüklenici Firma Doğuş İnşaat ve Tic. San. A.Ş.'ye olmak üzere projeye sağladıkları katkılar sebebi ile Tekfen Mühendislik Geoteknik Grubu çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

ARUP, Yüksel Proje, 2015. Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro Hattı Kesin Proje Jeolojik-Jeoteknik Araştırma Raporu İBB, Temmuz 2015.

İlmaz, G., 2017. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane)-Taşdelen-Yenidoğan Metrosu İnşaatı Jeoteknik Veri Raporu (1), Çekmeköy-Meclis Mahallesi-Sarıgazi-Samandıra (Sancaktepe Şehir Hastanesi) İstasyonları, Esay Mühendislik, s.6-14.

Tank, S., Gençman, L., Salcı, B., 2020a,. Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi – Taşdelen – Yenidoğan Metrosu İnşaatı 103- Samandıra İstasyonu Mevkii (Sancaktepe Şehir Hastanesi) Sismik Araştırma Raporu, Rumeli Zemin İnşaat Mühendislik, s.8-13.

Tank, S., Gençman, L., Salcı, B., 2020b. Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi – Taşdelen – Yenidoğan Metrosu İnşaatı 103- Samandıra İstasyonu Mevkii (Sancaktepe Şehir Hastanesi) Multielekrot Özdirenç (Rezistivite) Araştırma Raporu, Rumeli Zemin İnşaat Mühendislik, s.7.

Application of Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels in Bulgaria

N. Kostadinova, D. Makedonska, B. Vladkova
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Bulgaria

ABSTRACT: Tunnel accidents represent an actual problem, requiring their safety improvement, which in turn calls for complex solutions. Republic of Bulgaria is a member of the EU and has obligations towards the construction of a modern, balanced and integrated transport structure along the main and extended TEN-T. Road tunnels in Bulgaria must be brought into line with the requirements of Directive 2004/54/EC on the minimum safety requirements for tunnels from the trans-European road network.

The regulatory framework in Bulgaria does not include a special requirements for the design and construction of firefighting systems in tunnels. The fire incident analysis in Bulgaria shows that, if such fire protection systems had been built in the tunnels, they would have contained the fire at a low energy level. The present paper analyzes the increase in fire safety in tunnels over 500 m length as a result of fire protection system implementation.

1 INTRODUCTION

The challenges facing the construction of new road and railway tunnels as well as the modernization and rehabilitation of existing facilities are many, but the main priority is to ensure safety during their operation. This is an aspiration of most European countries to effectively manage assessed risks. According to Ordinance No. RD-02-20-2, 2015: Road tunnel is defined as a horizontally or inclined covered man-made facility for underground or underwater passage of a road under an obstacle, the length of which usually significantly exceeds its transverse dimensions.

1.1 Tunnel Construction in Bulgaria

The construction of road tunnels in Bulgaria began in the 1970s. 34 road tunnels were built with a total length of 11.416 m, distributed by road type as presented in Table 1. The most significant road tunnel facilities in Bulgaria are listed in Table 2. Some of them have been repaired and modernized in accordance with Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels of the Trans-European Transport Network (TEN-T).

Table 1. Road tunnels construction distributed by road type

Road Type	Motorway	Class I	Class II	Class III
	10 tunnels (29%)	8 tunnels (24%)	10 tunnels (29%)	6 tunnels (18%)
Total number:	34 road tunnels			

The state of all road tunnels along the national road network in Bulgaria was in-depth inspected and assessed by state authorities in 2017. An analysis has been carried out according to the Methodology for Risk Analysis in Road Tunnels on a 5-level scale, and the results were presented in a report (Dimitrov, 2017) The road tunnels were listed and rated in Table 2.

Table 2. The most significant road tunnel facilities in Bulgaria

Tunnel Name	Length, m	Year Commissioned	Risk analysis	Need of repair and rehabilitation
RT "Vitinya"-Hemus Motorway	1195 m	1980	Significant risk	Yes
RT "Topli Dol"- Hemus Motorway	883 m	1985	Significant risk	Yes
RT "Praveshki Hanove"- Hemus Motorway	834 m	1990	Low risk	No
RT "Echemishka"- Hemus Motorway	820 m	1984	Significant risk	Yes
RT "Trayanovi Vrata"-Trakia Motorway"	685 m	1985	Significant risk	Yes

1.2 Rehabilitation of Road Tunnel Network in Bulgaria

Actions have been taken to reduce the risk and increase safety in the operation of these tunnels, due to their importance for the TEN-T. The repair, rehabilitation and modernization activities of the Vitinya and Echemishka tunnels have been going on for over 5 years. Those included replacement of cladding, waterproofing, drainage system and asphalt (Bassan, 2016; Popivanov and Hrischev, 2010). Video surveillance, fire alarm, ventilation, traffic lights and lighting systems were installed. Additionally, traffic guidance system for safe passage and for quick response in the event of an accident was installed. In the Vitinya tunnel, 7 pairs of reversible jet fans, sized according to the ventilation standards, were installed (Vlasseva and Dinchev, 2015). In accordance with the European Tunnel Safety Directive, three cross galleries were constructed to connect the two tubes. All this turns the Vitinya tunnel into a complex network facility. In the event of accident in one of the tubes, these connections serve for evacuation of people and cars, as well as for access of special vehicles such as ambulances, fire engines, traffic police and control vehicles. Rehabilitation activities of the Topli Dol tunnel are planned to commence in November 2022.

Figure 1 shows the location of said road tunnels (Vitinya, Echemishka, Topli Dol), where rehabilitation and modernization is being carried out. What is specific about them is that they pass through a mountain range and are connected by viaducts of great height and length. This makes them an example of a "Tunnel-Bridge-Tunnel" system (Sun et al., 2021). The system is characterized by high concentration of crashes and road accidents and high risk to safety. Due to the long duration of construction and repair works, organization of road traffic has to be bidirectional. This leads to the following additional risks:

- increased concentration of exhaust gases – Health hazard for passengers
- slow-pace traffic and traffic jams
- increased risk of accidents due to human factors

Figure 1. Tunnel - Bridge (Viaduct) - Tunnel System

2 MAJOR TUNNEL PROJECTS IN BULGARIA

2.1 The Zheleznitsa Tunnel Project

The Zheleznitsa tunnel is a tunnel at km 366+720 of Struma Motorway, Lot 3.1. It will be the longest road tunnel in Bulgaria with a length of approximately 2 km (1979/2003 m) The facility consists of two one-way tubes with gauge AM29 (width of each tube 10.90 m

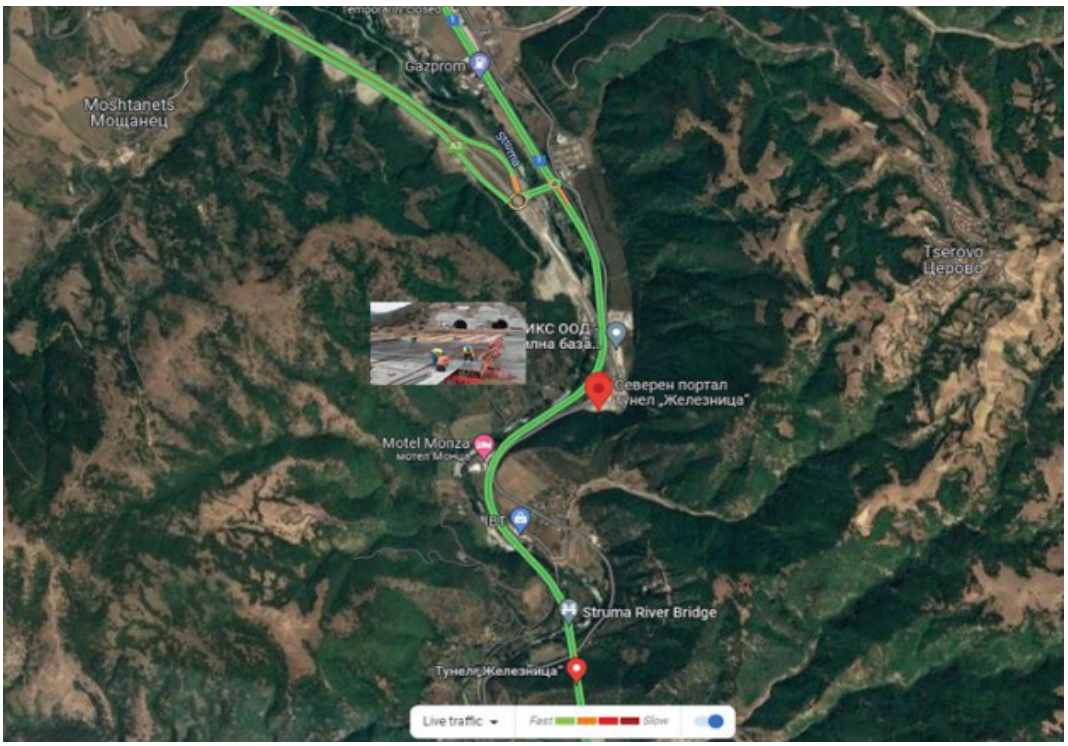


Figure 2. Location of the Zheleznitsa Tunnel

and height 7.35 m) Traffic lane width per tube is 8.50 m. The tunnel is located in the mountain range south of Blagoevgrad and north of the village of Zheleznitsa (Figure 2). The construction requires utilization of advanced and inconvenient blasting methods (Shishkov and Stoycheva, 2021).

The tunnel design provides cross connections between the two tubes, a total of 4 pedestrian galleries and 2 connecting vehicle galleries spaced at 300 m, as well as emergency nooks at every 150 m (Figure 3).

Figure 3. Construction of the Zheleznitsa Tunnel source: Road Infrastructure Agency

2.2 The Shipka Tunnel

The idea of digging a tunnel under Mount Shipka and connecting North and South Bulgaria has over 125 years of history (Figure 4). The overall design of the route began in 2013. Later the project was divided into stages. Stage 1 Bypass of the town of Gabrovo has been completed. Stage 2 Tunnel design and construction was announced under public procurement procedure for a tunnel facility with length of 3.2 km in 2019. The tunnel will be situated 1 km west of Shipka pass and 1 km east of Malusha peak (Figure 5). The northern part of the tunnel will be in Gabrovo District, and the southern part in Stara Zagora District. The entire project also includes four smaller tunnels - 171 m, 240 m, 90 m and 290 m respectively, six bridges and one underpass. Due to the complexity of the project and its location, consideration must be given to the geology of the site (Arsova-Borisova and Christov, 2021). The construction of this type of

tunnel involves the use of heavy machinery. Process modeling can be used in the design phase (Iliev, 2021; Hristova, 2011). The tunnel will be built with one pipe for bidirectional trafic, and one evacuation gallery. The project will implement for first time in Bulgaria FFFS for firefighting along with transversal ventilation system. The FFFS will be with low pressure. According to the project design, the water reserve will be stored in an underground tank under the evacuation gallery. The purpose of using FFFS is to reduce the HRR (heat release rate) of a large fire and relieve the ventilation system. By a fire accident with HRR (5 – 8 MW), the FFFS will be able to directly extinguish it.

Figure 4. Tunnel Shipka, Source © Nadezhda Chipeva

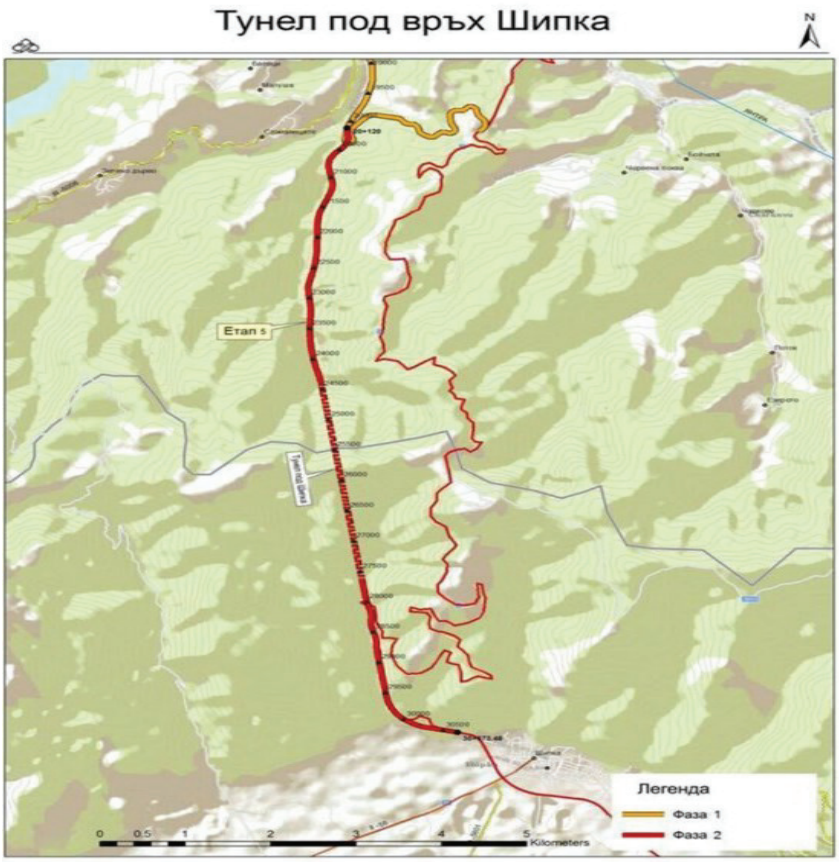


Figure 5. Map of the tunnel under Shipka Source: RIA

2.3 Railway Tunnel Elin Pelin - Kostenets

The first railway tunnels in Bulgaria were built in 1897. Currently, their number is 183 with a total length of 47,930.05 m (ca. 47.9 km). The project for a new railway tunnel with a length of 6.8 km, in the section between Elin Pelin and Vakarel, is part of the major modernization project for the Trakia railway highway from Sofia to Burgas by 2030 (Figure 6). The entire route between Sofia and Plovdiv is with approximate length of 20 km. But the Elin Pelin – Vakarel section is the most complex and difficult to build. The total contract price for the construction of the section amounts to BGN 498,800,012 VAT exl.

Figure 6. Rail tunnel section Elin Pelin – Vakarel Source Lili Granitska

The funds are provided by the EU Operational Programme "Transport". The contract with consortium DZZD Cen-Duy Railway Elin Pelin for nearly BGN 600 mmillion VAT incl. was signed in November 2019. The Turkish companies Cengiz and DUYGU Mühendislik İnşaat participate in the consortium. Cengiz İnşaat has experience in Bulgaria with the construction of the 19-kilometer highway "Lyulin", which is already part of the Struma highway. The project includes the construction of two two-tubes tunnels with a total length of approximately 1.5 km, a road overpass and a road underpass, 8 bridges and trestles, 11 culverts, noise protection facilities with an approximate length of 700 m, drainage facilities, new signaling and telecommunication systems in stations and interstations and construction of new video surveillance and passenger information systems (Tondera et al., 2018). The construction period for the site is 72 months.

3 FIRE INCIDENTS IN ROAD TUNNELS

Fires in road tunnels around the world show that incidents involving fires in vehicles can lead to a significant number of victims and injuries as well as serious material damages (Pireddu and Bruzzone, 2021). Fire damage is sustained, on the one hand, by the supporting and enclosing structures of the tunnels and their equipment, and on the other hand, by the vehicles in the tunnel. Figure 7 presents summary information on road tunnel fires by country for the period (1949-2009).

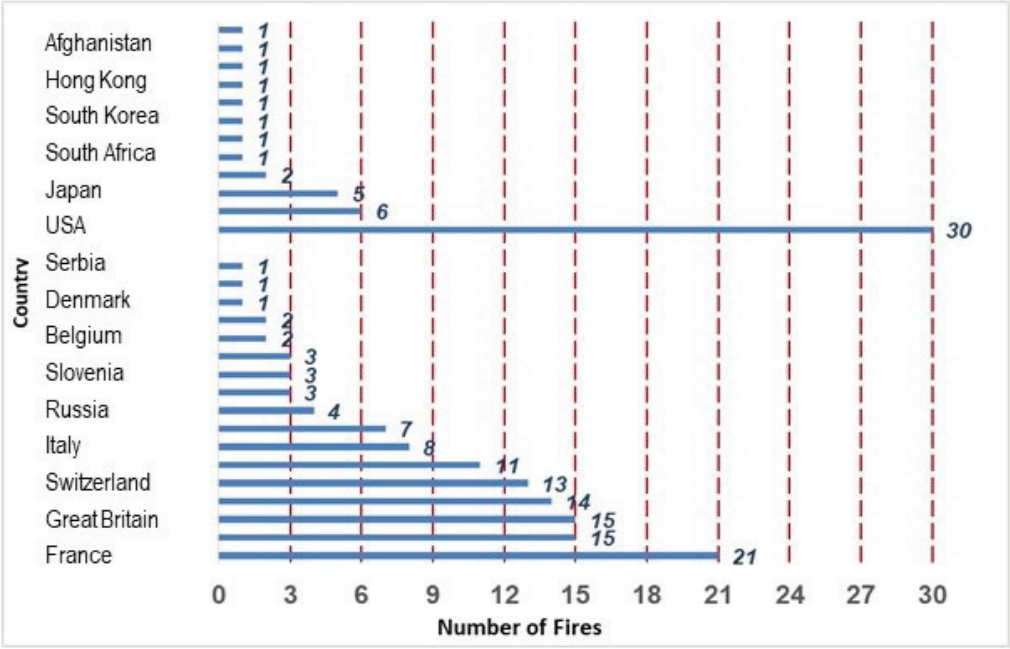


Figure 7. Fires in road tunnels

The situation that is created when a fire occurs in a tunnel requires an extremely difficult intervention for the rescue teams (Cheong, 2009). Firefighting installations, as one of the technical means of fire protection, are used in those cases where fires in their initial stage can develop intensively and cause an explosion, destruction of tunnel structures, disrupt the normal mode of operation of vital systems of the protected object, cause great material losses. The time to detect a fire incident in the tunnel is crucial for the initiation of passenger evacuation and the response of the emergency services. The reaction and movement time of fire trucks for almost all tunnels in Bulgaria is significantly longer than the time for most fires to flare up to max HRR in tunnels.

4 FIRE DETECTION AND ALARM

The time to detect a fire incident in the tunnel is crucial for the initiation of passenger evacuation and the response of the emergency services. Optimal time for fire detection is around 120-150 s. Thermal cables and fire sensors can be used simultaneously when locating the fire because of their reliability and accuracy. In this way, the ventilation system automatically switches to emergency mode and turns on the fire extinguishing system of the drencher type. The use of location-specific fire alarm installations will help to send a signal of an open fire incident in the road tunnel to the responsible rescue services.

A study done on the time required for the response of these services (Makedonska and Mihaylov, 2019) proves the need for extremely fast activation of detection and fire extinguishing systems on site. The increase in reliability is achieved by synchronizing and fine-tuning the operation of various systems, such as a video surveillance system, ventilation, traffic signaling, emergency lighting, etc. The individual specifics of work are taken into account, as well as the materials applicable in fire conditions with different fire power.

5 FIXED FIRE FIGHTING SYSTEMS

FFFS stands for Fixed Fire Fighting Systems and are defined by PIARC, for road tunnels, as “fire fighting equipment permanently attached to the tunnel consisting of a piping system with a fixed supply of water or extinguishing agent which when operated has the intended effect of reducing the heat release and fire growth rates by discharging the water of extinguishing agent directly on the fire” (PIARC, 2008 ; 2016).

Types of FFFS: Sprinkler type; Drencher type with relatively low pressure with water or foam spray system; Water mist system - obtained with medium and high pressure. The foam drencher system is rarely used due to the high costs of building and operating a storage facility for the foaming agent (Häggkvist, 2009).

Water sprinkler installations can mitigate fire resistance requirements for concrete and the level of fire protection of mechanical and electrical equipment in tunnels (Solit, 2012; Promat 2008; Lakkonen and Bremke, 2012). FFFS can control fires by limiting the rate of heat release and keeping the fire at a much lower energy level. Another effect of their application in road tunnels is preservation of the tunnel structure, prevention of linear spread of the fire in the tunnel (Fig. 8).

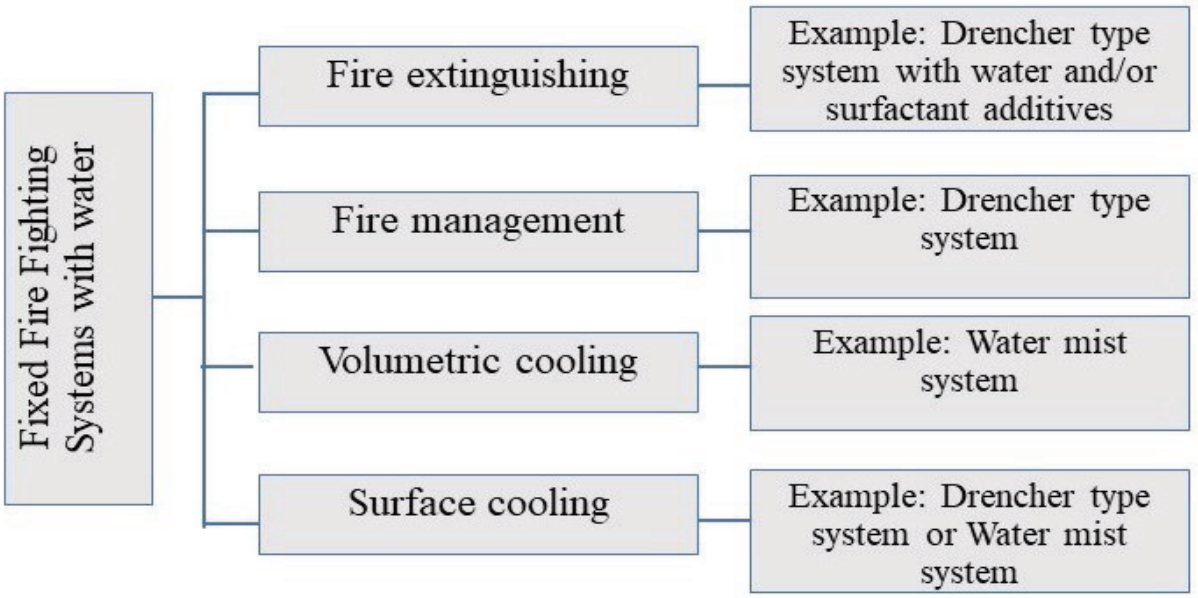


Figure 8. Effects of stationary water extinguishing systems

5.1 Application of FFFS

Worldwide, there are numerous examples of FFFS implementation - Europe, North America, Australia and Japan. In Europe there is no regulation for their installation, such exist in Japan and Australia. Japan is the country with largest application of FFFS in road tunnels. According to NFPA 502 these firefighting systems should be considered as part of the overall fire protection system in road tunnels. An efficiency analysis and a fire risk analysis are necessary. There are several examples of the benefits of using FFFS such as: , the Santa Clarita fire in Newhall, California and the Burnley Tunnel in Australia (Kenneth et al., 2018).

5.2 FFFS with Nozzle Type Bete N5

A system has been developed that combines the advantages of both types of systems - sprinkler and with water mist. Spray nozzles are used allowing for drops of different diameters to be mixed, which will reduce radiant heat and be more effective in extinguishing fires. Experiments were carried out with different types of spray nozzles (Makedonska, 2021). A BETE N5 spray nozzle (Fig. 9) with two spray rings: an outer, wide-angle cone and a narrower inner cone to give a full cone effect (Fig. 10) was chosen to be applied in the FFFS in a road tunnel.

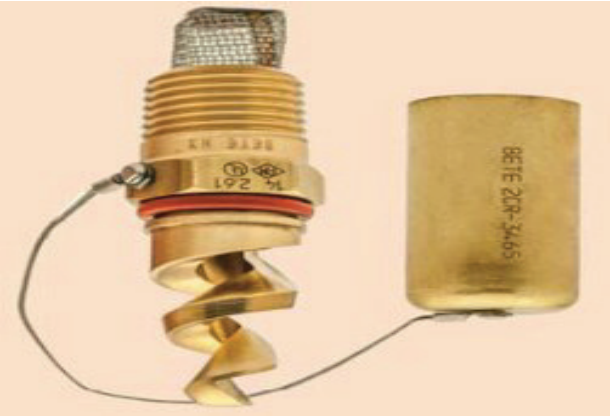


Figure 9 Nozzle with protective cap

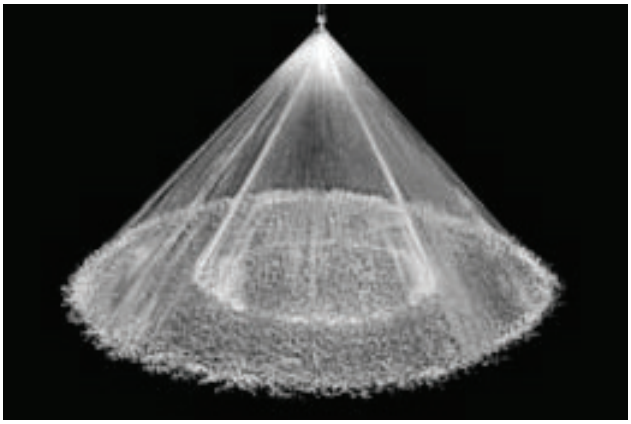


Figure 10. Full cone

The significant characteristics of the spray nozzle are: K – factor; angle at the apex of the cone; operating pressure range P; spatial limitations (Table 3).

Table 3. Bete N5 nozzle characteristics

Conduct	Nozzle №	K Factor	P [bar]	Q – flowrate [l/min]	Orifice [mm]	Dimensions [mm] A	B	Weight [g]
1/2"	N5	75.2	3.45 10.3	139 241	13.5	63.5	22.4	85

All major components of the FFFS must comply with standards (Table 4): NFPA 502:2017, CEN/TS 14816:2008, EN 12845:2004, and include the following components: water supply, piping system, fittings, nozzles, valves and automatic pump set.

Table 4. FFFS components

FFFS Components	
BETE N5 nozzle	full cone
Main conduits	d = 3" (76.2 mm)
Tank	240 m^3
K factor	75.2
Distribution piping	d= 1.5" (38.1mm)
Electric pump model	CR 125-4-2 A-F-A-V-HQQV
Sectional valves to the main water supply line	

Each system covers a section of the tunnel with a length of 25 m. Figure 11 shows model of an installation divided into two subgroups with 6 nozzles each. In the event of emergency (fire), the system is activated manually or automatically (Gorbounov and Chen, 2019). For series-connected installations, the range of action is determined by the severity of the emergency event. This allows also efficient management of water consumption in tunnels located outside urban infrastructures. The considered system may be applied as an auxiliary facility to provide additional fire safety only for the riskiest areas (Liu et al., 2007; Bai et al., 2020) in road tunnels. The water supply must ensure normal operation of the system for:

- 30 minutes - in tunnels with a underground length up to 600 m;
- 40 minutes - in tunnels over 600 m long.

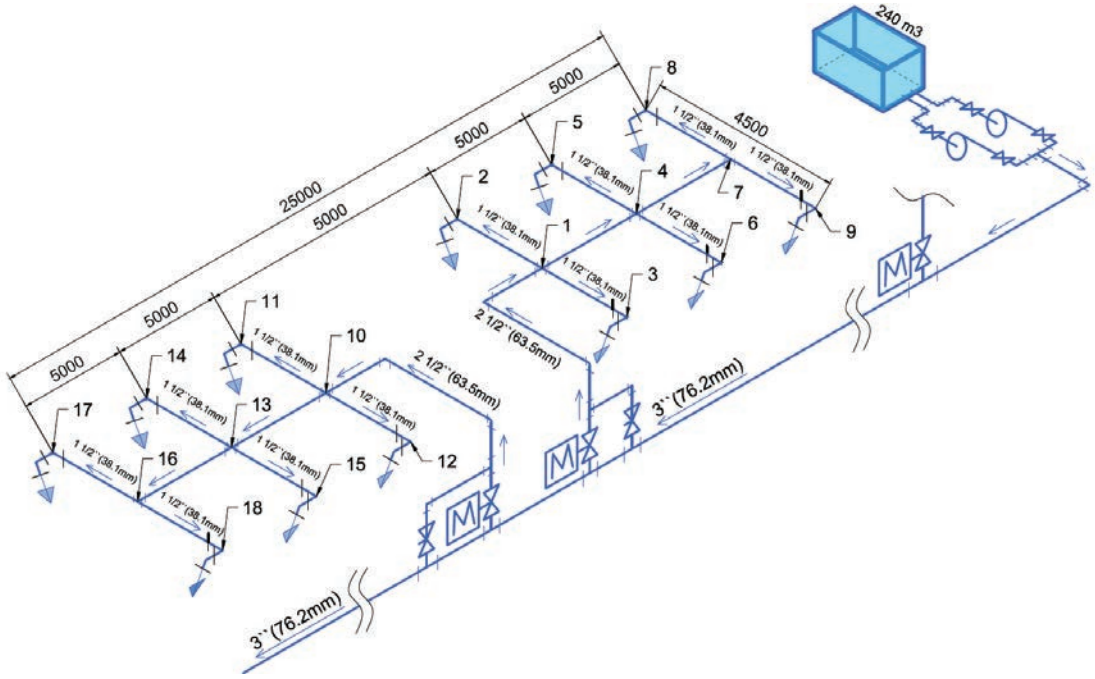


Figure 11. Scheme of the group with independent power supply of the two subgroups and presence of bypass for manual control

For existing tunnels, additional water supply for the firefighting service is allowed through tanks with a useful volume of not less than 15 m^3. The system should only be deactivated by qualified fire service personnel or a tunnel operator who has received special training. Application model of a fixed fire fighting system in a road tunnel is shown in Table 5.

Table 5. Tunnel data

Length	Cross section	Type	Traffic
1000 m	50.4 m^2	road tunnel	Bidirectional

Figure 12 shows modelling of the spraying intensity from 12 spray nozzles in one section of 6 m height. The spreading density is a function of the total flow rate [l/min] and the surface area of the section [m^2] covered by all spray nozzles. The design of such type of FFFS requires calculation of several important parameters:

- **Pressure losses in pipes** are calculated depending on the operating pressure of the system according to BDS EN 12845:2004+A2. For installations with low pressure (up to 12 bar) the Hazen-Williams method is used:

$$\Delta P = \frac{6.05 \times 10^5}{C^{1.85} \times d^{4.87}} \times L \times Q^{1.85} \quad (1)$$

where: ***Δp*** - the pressure losses in the pipe. [bar];

Q - the flow rate through the pipe, [l/min];

D - median internal diameter of the pipe, [mm];

C - constant for the type and condition of the pipe; selected from a table depending on the material and in the range 100-140

L - the equivalent length of the pipe and fittings, [m].

- **Static pressures difference between two connected points** in the installation should be calculated by the formula:

$$P = 0.098 \times h \quad (2)$$

where **p** is the difference in static pressures, [bar].

h is the vertical distance between the two points, in [m].

- **Water flow rate from one spray nozzle:**

$$Q = K\sqrt{P} \quad (3)$$

Where: ***Q*** - Flow rate, [l/min]

K **-** Flow coefficient given by the nozzle manufacturer

P **-** Pressure in front of the nozzle [bar]

The design of this type of FFFS can also applied in urban tunnels as a water curtain that will reduce smoke and soot and thus protect people.

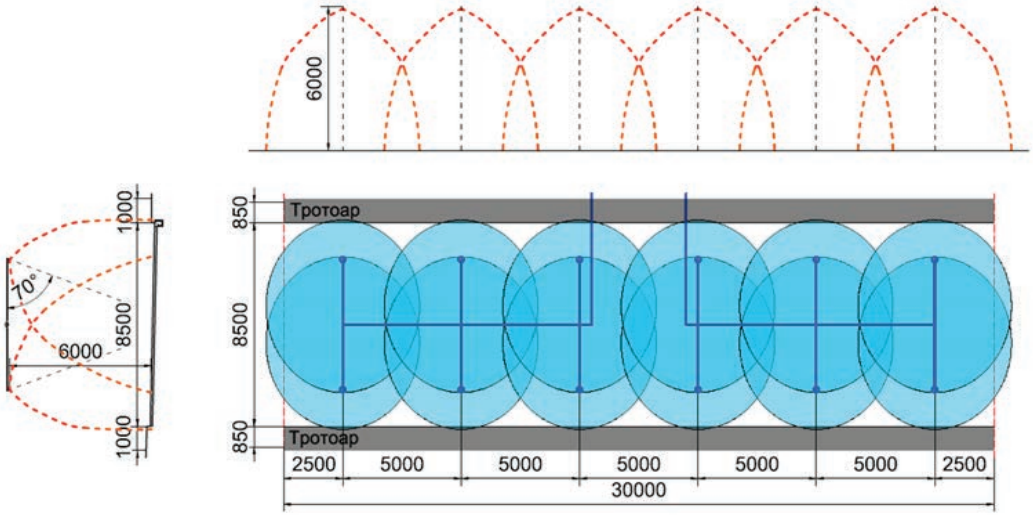


Figure 12. Areas covered by water nozzles at traffic lane level

6 CONCLUSION

Installation of fixed fire-fighting systems in road tunnels in Bulgaria has not yet been legally regulated. FFFS with water spray can be used alone or as a supplement to other fire protection systems. In order to ensure safety in tunnels, additional regulatory requirements should be defined and proposed for the construction of such installations in tunnels of lengths greater than 500 m with heavy traffic and bidirectional traffic, as well as in other tunnels depending on the risk assessment.

REFERENCES

Arsova-Borisova, K., Christov, V., 2021. Deep neural networks applications in the study of geological indicator, Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal, v. 2, 2021, ISSN 2738-7100, pp. 25-27.

Bai, J., Liao, H., Xia, Y., 2020. Study on Fire Accidents in Tunnels, ICRTSR 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (2020) 012095 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/741/1/012095.

Bassan, S., 2016. Overview of traffic safety aspects and design in road tunnels, Amy Metom Engineers. Tel Aviv., Israel IATSS Research 40 (2016) 35–46; https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2016.02.002

CEN/TS 14816:2008 (MAIN) Fixed firefighting systems - Water spray systems - Design, installation and maintenance, 2008..

Cheong, M. K., 2009. Assessment of Vehicle Fire Development in Road Tunnels for Smoke Control Ventilation for Design. Christchurch. New Zealand. August 2009 pp. 298-302.

Dimitrov, V., 2017. State of the tunnels in national transport network in Bulgaria, Report, Road Infrastructure Agency, Institute of Roads and Bridges, February 2017 (in Bulgarian).

EN 12845:2004+A2 Fixed firefighting systems - Automatic sprinkler systems - Design, installation and maintenance..

Gorbounov, Y., Chen, H, 2019. Technological Aspects and Applications of Large Power Switched Reluctance Motors in Mining, Journal of Mining and Geological Sciences, Vol. 62 – III, University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski“, ISSN 2682-9525 (print) ISSN 2683-0027 (online), pp.82-91.

Häggkvist, A., 2009. Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels, An overview of current research, standards and attitudes, Luleå University of Technology, Master thesis, Fire protection engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Sweden, 2009:113 - ISSN: 1402-1552 - ISRN: LTU-DUPP--09/113—SE.

Hristova, T., 2011. Automated system for calculating the elements of the cathodic protection system, Universitatea “Constantin Brâncuşi" din Târgu-Jiu, Nr.3/2011, section –Power and electrical engineering, pp.266-275 ISSN 1842-4856.

Iliev, Zh., 2021. Simulation modal analysis of the driving sprocket of a scraper-chain conveyor, XVI International Conference of the Open and Underwater Mining of Minerals, Varna, Bulgaria. ISNN 2535 – 0854, pp 304-309.

Kenneth J. Harris, Michael C. Macniven, 2018. Expediting implementation of FFFS in road tunnels WSP California USA, Eighth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Borås, Sweden, March 14-16, 2018.

Lakkonen, M., Bremke, T., 2012. Fixed Fire Fighting Systems for Road and Rail Tunnels, Fogtec Fire Protection Cologne/D, Brandschutz Fire Safety Tunnel 1/2012, pp. 40-46.

Liu, Z. G., Kashef, A., Lougheed, G., Kim, A.K., 2007. Challenges for Use of Fixed Fire Suppression Systems in Road Tunnel Fire Protection Suppression & Detection Research Applications – A Technical Working Conference(SUPDET 2007), Orlando, Florida, March 5-8, 2007, pp. 1-10.

Makedonska, D., 2021. Studies on the effectiveness of stationary fire extinguishing installations in road tunnels, PhD-Thesis, University of Mining and Geology, Sofia, Bulgaria, 2021 (in Bulgarian)

Makedonska, D., Mihaylov, M. 2019. Need for fixed fire fighting systems in road tunnels Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" Sofia, Volume: II - 62, 23.10.2019, pp.60-65, ISSN 1312-1820.

NFPA 502 Standard for Road Tunnels. Bridges. and Other Limited Access Highways. 2017.

ORDINANCE No. RD-02-20-2 of December 21, 2015 on technical rules and norms for the design of road tunnels, SG No. No. 8/29.01.2016 (in Bulgarian)..

PIARC, 2008. Technical Committee C3.3 - Road Tunnel Operations, 2008: Road tunnels: an assessment of fixed fire fighting systems. France, 2008, ISBN 2-84060-208-3. p.79.

PIARC, 2016. Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operations of the World Road Association, 2016R03EN, Fixed fire fighting systems in road tunnels: current practices and recoemmendations ISBN 978-2-84060-375-7.

Pireddu, A., Bruzzone, S., 2021. An analysis of the influence of tunnel length and road type on road accident variables, Rivista di statistica ufficiale, N. 2/2021.

Popivanov, H., Hrischev, L. 2010. Individuelle Schutzmittel bei der Verarbeitung der Epoxidharz-Bodenbeläge. 7th International Colloquium Industrial Floors, 14 - 16 December 2010 , Stuttgart, Germany, ISBN 3-924-813-85X , 2010, pp: 319-324.

PROMAT 2008 Tunnel Fire Protection, July 2008. pp.16-23.

Shishkov, P., Stoycheva, N., 2021. Advanced Blasting Solutions with Fast-combusting Energetic Compositions for Extraction of Dimension Stones or Demolition, Proceedings of the 10th International Drilling and Blasting Symposium, 25-26. Nov. 2021, Antalya, Turkey, p.307-316, ISBN 978-605-01-1440-9.

SOLIT 2012. Safety of Life in Tunnels. Engineering guidance for a comprehensive evaluation of tunnels with fixed fire fighting systems, Scientific Final Report of the SOLIT Research Project prepared by the SOLIT² Consortium.

Sun, Z. Y., Liu, S., Tang, J., Wu, P., Tang, B., 2021. Exploring the Impacts of Driving Environment on Crashes in Tunnel–Bridge–Tunnel Groups: An Eight-Zone Analytic Approach, Sustainability 2021, 13, 2272. https://doi.org/10.3390/su13042272.

Tondera, D., Beier, D., Tamaskovics, N., Pavlov, P., Totev, L., 2018. Groundwater impact investigation due to installation of a “LWS” silicate gel sealing sole in the water saturated soil zone. Journal of Mining and Geological Sciences, Vol. 61, Part II, Mining, Technology and Mineral Processing, 2018. ISSN 2535 -1184. C 19-24.

Vlasseva, E., Dinchev Z. 2015. Natural and Mechanical Ventilation Interaction in Road Tunnels Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" Sofia, Volume: II - 58, pp. 67-72; ISSN 1312-1820 (in Bulgarian)

Özdeş İki EPB TBM'in Farklı ve Karmaşık Jeolojilerde Performans Karşılaştırması

Performance Comparison of Two Identical EPB TBMs in Different and Complex Geologies

F. Kara
Kalyon İnşaat, İstanbul, Türkiye

İ.S. Binen
Trakkom Mühendislik, İstanbul, Türkiye

U. Ateş
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

M. Temur, M. Çınar
Kalyon İnşaat, İstanbul, Türkiye

ÖZET: Sürekli olarak nüfusu artarak büyüyen şehirler, düzenli altyapı yatırımlarına ihtiyaç duymaktadır. Mekanize tünelcilik yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde TBM'lerin bu altyapı yatırımlarında kullanılma oranları giderek artmaktadır. Avrupa Bölgesi İçme Suyu Tünel İnşaatı (ABİS) Projesi, gelişen şehrin temiz su ihtiyacının karşılanabilmesi amacıyla İstanbul'un nüfusu yoğun olan bölgelerinden/ilçelerinden geçen 20 km uzunluğunda 4,8 m kazı çapında tüneli içermektedir. Tünel uzunluğu göz önünde bulundurularak, kazının iki adet pasa basınçlı TBM ile yapılmasın karar verilmiştir.

Bu bildiride birbiri ile aynı özelliğe sahip olan TBM 1 ve TBM 2'nin, farklı birimlerdeki performansları karşılaştırılmış olup, performansa etki eden faktörler incelenmiştir. Ayrıca, aşındırıcı birimlerin TBM üzerindeki etkileri, kesici kafa tasarımı ile TBM özelliklerinin ortam koşullarına uygunluğu irdelenmiştir. Bildiride ayrıca aynı özelliklere sahip TBM'lerin kullanılmasının sağladığı avantajlar üzerinde de durulmuştur. Mekanize kazı sistemlerinde, kazı performansı, kazı maliyetinin düşmesi ve makinenin etkin kullanımı gibi düşünceler makine tercihinin önemini artırmaktadır. Bu bildiride irdelenen konular da TBM seçiminde oldukça önemli rol oynamaktadır.

ABSTRACT: Cities that are constantly growing in population need regular infrastructure investments. Thanks to the developments in mechanized tunneling methods, the rate of use of TBMs in these infrastructure investments is increasing. The European Region Drinking Water Tunnel Construction (ABIS) Project includes a 20 km long tunnel with a 4.8 m excavation diameter, passing through the densely populated areas/districts of Istanbul in order to meet the clean water needs of the developing city. Considering the tunnel length, it was decided to excavate with two EPB TBMs.

In this paper, the performances of TBM 1 and TBM 2, which have the same features, in different units were compared and the factors affecting the performance were examined. In addition, the effects of abrasive units on TBM, cutter head design and suitability of TBM properties to ambient conditions were examined. The paper also focused on the advantages of

using TBMs with the same features. In mechanized excavation systems, considerations such as excavation performance, reduction in excavation cost and effective use of the machine increase the importance of machine choice. The issues discussed in this paper also play a very important role in the selection of TBM.

1 GİRİŞ

İstanbul doğu – batı doğrultusunda düz bir hatta uzanmakta olan ve sürekli büyüyerek gelişen metropolitan bir şehirdir. İstanbul'u diğer şehirlerden farklı kılan önemli unsurlar olarak kabul edilebilecek kıtaları birbirine bağlayan İstanbul Boğazı, meşhur siluetini veren tepelerden oluşan yapısı ve her daim canlı olan nüfusu ile insan hareketliliği gibi özellikleri, beraberinde getirmiş olduğu sürekli artan altyapı ihtiyacı ile aynı zamanda önem arz eden sorunları da barındırmaktadır.

Avrupa Bölgesi İçme Suyu Tünel İnşaatı projesi (ABİS) bu büyük şehrin mevcut durumda ve gelecekte oluşacak içme suyu talebini karşılamak ve güvence altına almak amacıyla tasarlanmıştır. Proje, bir ana içme suyu hattı oluşturulmasını ve dağıtım şebekesinin bu vesileyle geliştirilmesini hedeflemektedir. Değişken topoğrafya, yoğun nüfus ve kompleks mevcut altyapı ağı nedeniyle projenin hayata geçirilmesinde mekanize tünelcilik yöntemlerinden faydalanılması en uygun çözüm olarak değerlendirilmiştir. Ana boru hattına ev sahipliği yapacak 20 km uzunluğunda ve 3 metre iç çapa sahip tek hat bir tünel ile bu tünele bağlanan derin servis ve dağıtım şaftları inşa edilmesi planlanmıştır.

Gerek projenin uzunluğu gerek de İstanbul'un yeraltı su havzaları, fay hatları, yumuşak ve stabil olmayan suya doygun zeminler ile sert kaya koşulları gibi daha birçok kompleks jeolojik özellikleri planlama ve inşaat fazlarında dikkate alınmasını gerektirmiştir (Ates vd., 2016; 2017; Kara vd., 2018). Yöntemin ve ekipmanın da yine belirtilmiş olan farklı koşullar ve senaryolarla başa çıkabilecek şekilde seçilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle projede kullanılmak üzere birbiriyle tamamen eş özelliklere sahip 2 adet arazi basıncı dengeleme (EPB) özelliğine sahip tünel açma makinesi (TBM) seçilmiştir. Seçilen TBM'ler kazı aşamasında karşılaşılabilecek tüm olası risklerin üstesinden gelecek şekilde tasarlanmıştır.

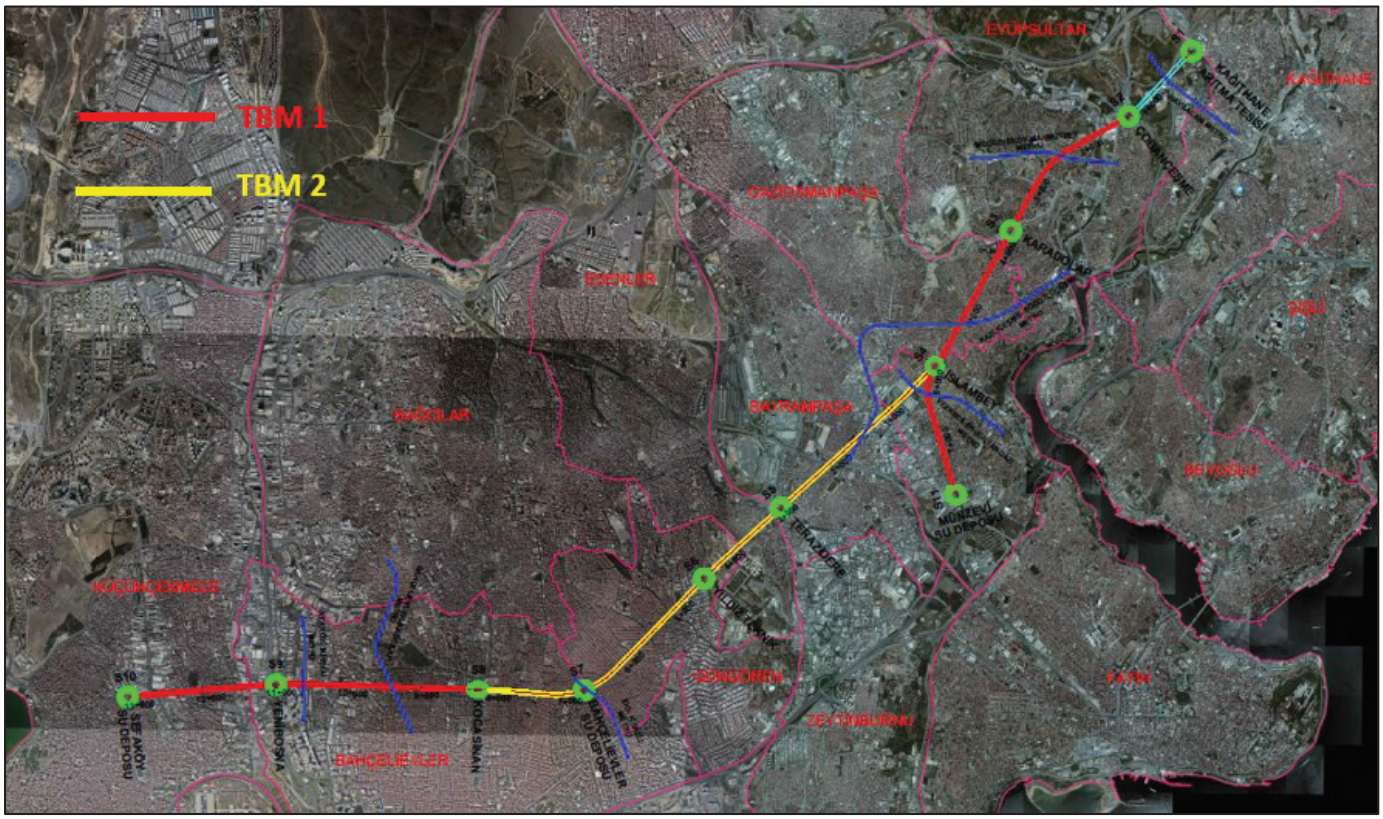
Bu çalışma kapsamında şehir tünelciliğinde, farklı ve değişken jeolojik koşullar altında birbirine tümüyle eş özellikte olan TBM'lerin kullanımının sonuçlarının ve etkilerinin tartışılması amaçlanmıştır. Jeolojik özellikler ve TBM'lerin özellikleri çalışmanın ilgili kısımlarında sunulmuştur. Karşılaşılan riskler ile bu risklerle ilişkili çözümler ve iyileştirmeler de ayrıca incelenmiştir. Birbirine eş TBM'lerin hem sert kaya hem de yumuşak zemin koşullarında gerçekleşmiş performanslarının bir mukayesesi de sunulmuş ve sonuçlar bu bağlamda değerlendirilmiştir.

2 YÖNTEM VE BULGULAR

2.1 Çalışma Alanının Jeolojisi

ABİS güzergahı, şehir boyuna ana içme suyu hattını taşımak üzere İstanbul'un çok yoğun nüfusa sahip bölgelerinin ve ilçelerinin altından ilerlemektedir (Şekil 1). Önemli konut ve ticari sınıf yüzey yapılarının yanı sıra ABİS hattı aynı zamanda metro, tramvay gibi oldukça kritik diğer altyapılar ile yeraltı suyu havzaları, fay hatları ve ezik zonlar gibi karmaşık jeolojik yapılarla da etkileşim içerisindedir.

Bu çalışma kapsamında da odaklanılan tünel güzergahı Trakya Formasyonu, Danişment Formasyonu ve Çekmece Formasyonu ile bunların alt üyelerinden geçmektedir. TBM 1'in Şaft 2 ve Şaft 4 arasında geçtiği başlıca litolojiler hafif ve orta derece ayrışmış silttaşı-şeyl ile yer yer alüvyon, kil ve kumtaşı-şeyl ardalanması olarak belirtilmiştir (Emay, 2018).



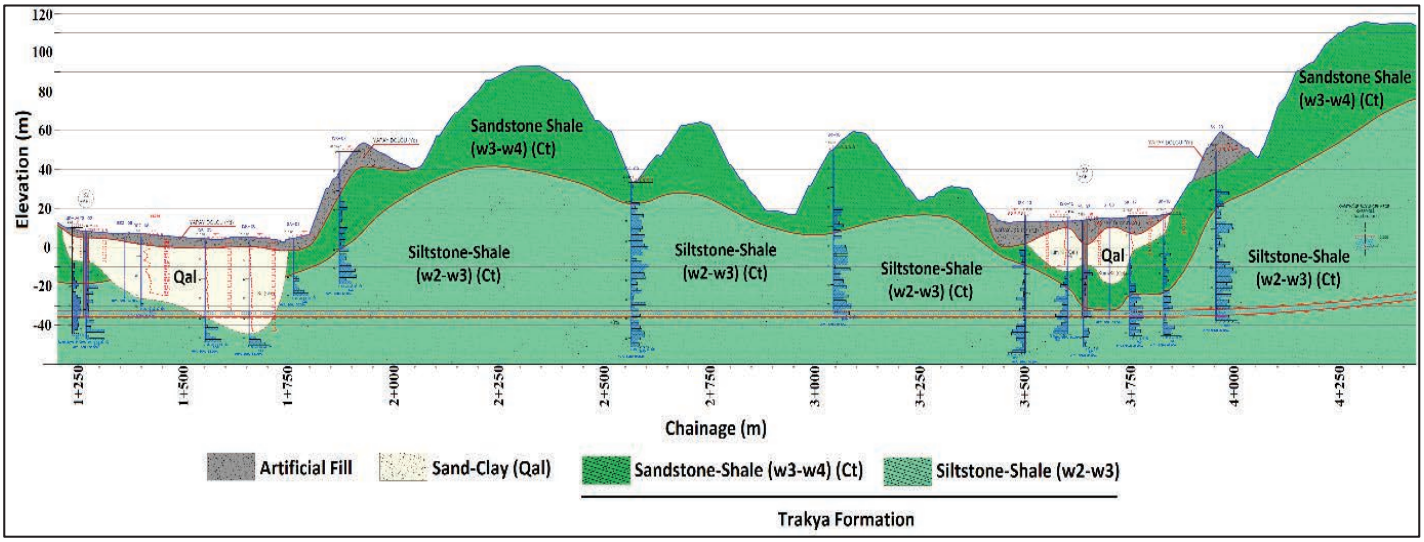
Şekil 1. ABİS tünel güzergahı

Jeolojik raporda aynı zamanda bu bölgede ezik veya tamamen ayrışmış zonlar ile fay hatlarının da yer aldığı vurgulanmaktadır. Şaft 6 ve Şaft 8 arasında kalan, TBM 2 tarafından kazılan güzergahta ise başlıca yoğun kum ve sert kil oluşumları raporlanmıştır. Başka bir deyişle TBM 1 genel olarak kaya/zayıf kaya koşullarında kazı yaparken TBM 2 zemin koşullarında çalışmıştır (Emay, 2018). İlgili birimlere ait jeoteknik büyüklükler Çizelge 1'de, TBM 1 ve TBM 2'ye ait jeolojik profiller ise sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.

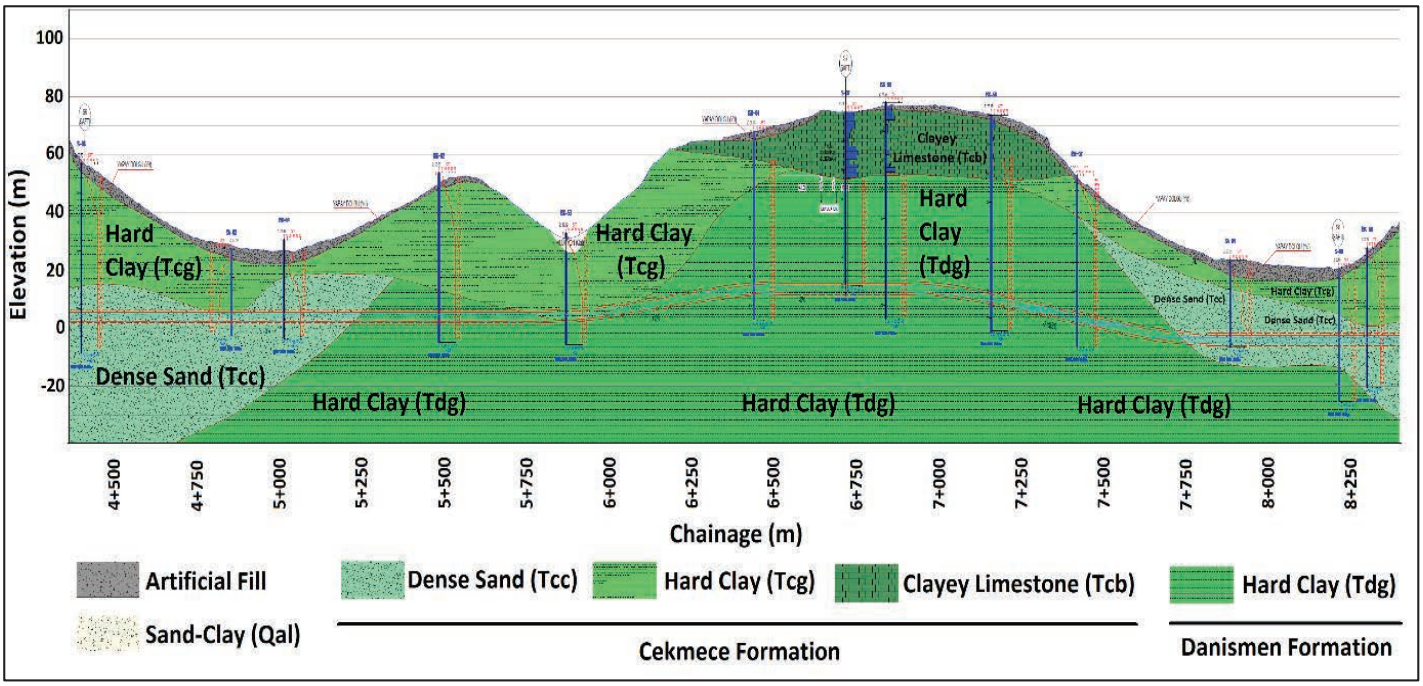
Kumtaşından oluşan bölgeler ve birimler ayrışma derecesi düşük olduğunda çok yüksek dayanımlar göstermiştir (Şekil 4) ve % 60 oranına yakın kuvars içeriği ile oldukça sert ve aşındırıcı kaya davranışı sergilemiştir. Öte yandan, yumuşak zeminden oluşan bölgeler gevşek ve suya doygun olarak gözlenmiş olup (Şekil 5) yoğun nüfusa sahip yerleşim yerlerinin altında ayna stabilitesi ile ilgili riskleri barındırmaktadırlar.

Çizelge 1. Hat üzerinde yer alan birimlere ait jeomekanik büyüklükler

Litoloji	Silttaşı – Şeyl (w2-3)	Kumtaşı – Şeyl (w3-4)	Kil (Qal)	Yoğun Kum (Tcc)	Sert Kil (Tdg)
Birim Ağırlık (g/cm^3)	2.6	2.5	1.9	2.1	20
Kohezyon (kPa)	500	121	150	36	15
Sürtünme Açısı (°)	44	34.8	-	-	27
Elastisite Modülü (MPa)	2420	386	31.5	32	40
Poisson Oranı (-)	0.24	0.28	-	-	-
Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa)	48	28	-	-	-
RQD (%)	39	12	-	-	-
GSI (-)	50.7	30.6	-	-	-
Q (-)	0.858	0.038	-	-	-
RMR (-)	41	25.6	-	-	-
SPT (N60)	-	-	12	40	50



Şekil 2. TBM 1'e ait jeolojik profil



Şekil 3. TBM 2'ye ait jeolojik profil

Şekil 3. TBM 1 ayna görünümü

Şekil 4. TBM 2 ayna görünümü

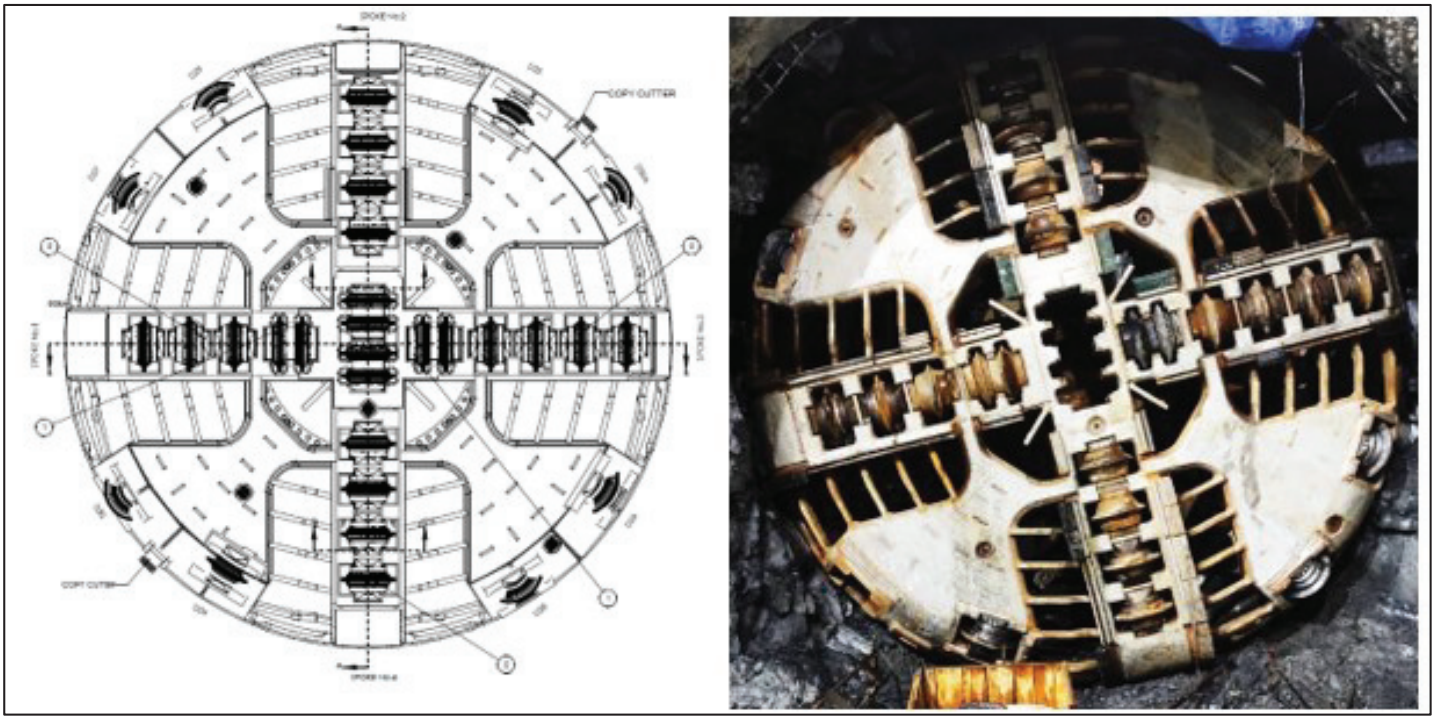
2.2 Projede Kullanılan TBM'ler ve Teknik Özellikleri

ABİS projesinde birbiriyle tümüyle eş özelliklere sahip 2 adet 4,8 m kazı çapına sahip Lovsuns marka EPB TBM kullanılmıştır. TBM'lerin teknik özellikleri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Şekil 6'da ise TBM'lere ait kesici kafa fotoğrafları verilmiştir.

Çizelge 2. TBM'lerin başlıca teknik özellikleri

Marka Adı	Lovsuns
Model Adı	RME 188 SE 45300
Kazı Çapı	4.8 m
Ana Tahrik Sistemi	VFD – 4 x 200 kW
Toplam Ana Tahrik Gücü	800 kW
Tork Kapasitesi	3811 kNm @ 1.90 RPM 2071 kNm @ 3.5 RPM 5017 kNm @ kalkışta
Kesici Kafa Dönüşü	Çift Yönlü - CW ve CCW
Kesici Kafa Dönüş Hızı Aralığı	0 – 3.5 RPM
İtme Kuvveti Kapasitesi	27940 kN @ 345 bars 19560 kN @ 240 bars
Disk Keski Sayıları	23 x 17" Tekli Disk 4 x 17" Çiftli Disk
Sıyırıcı Sayıları	40 x Düz Sıyırıcı 8 x Çevre Sıyırıcı Seti
Köpük Hatları	6 x Köpük Hattı (360 lt/dk) 1 x Polimer Hattı
Kesici Kafa Açıklık Oranı	Yaklaşık %29

TBM'ler hem kaya hem de zemin koşullarında performans gösterebilecek şekilde tasarlanmıştır. 200 kW gücündeki 4 VFD tahrik ünitesi 1.9 RPM dönüş hızında 3811 kNm nominal tork üretebilmektedir. Sert kaya koşullarında ise ana tahrik sistemi, ek bir konfigürasyona ihtiyaç duymaksızın 3.5 RPM'e kadar çıkabilen kesici kafa dönüş hızı ve 2071 kNm maksimum tork sunabilmektedir.



Şekil 6. TBM Kesici Kafa Görünümü

Kesici kafa hem disk keski hem sallanan (rocking) ripper, hem de karma bir keski konfigürasyonunun verimli bir şekilde kullanımına olanak verecek şekilde tasarlanmış olup keskiler arası mesafe özellikle sert kaya kazılarında kazı performansını artırmak ön yüzde 89 mm olarak belirlenmiştir.

Kesici kafa ortalama açıklık oranı yaklaşık %29'dur. Kesici kafa merkezinde, yumuşak ve yapışkan zeminlerin kazılarında tork oluşumunu azaltmak ve aynı zamanda da kazı odasına malzeme akışını iyileştirmek için açıklıklı bir tasarım tercih edilmiştir. Benzer bir yaklaşımla merkezden çevreye doğru simetrik olarak yerleştirilen açıklıklar, ayna stabilitesinden ve desteğinden feragat etmeden aynadan kazı odasına iyileştirilmiş bir pasa transferi sağlamaktadır.

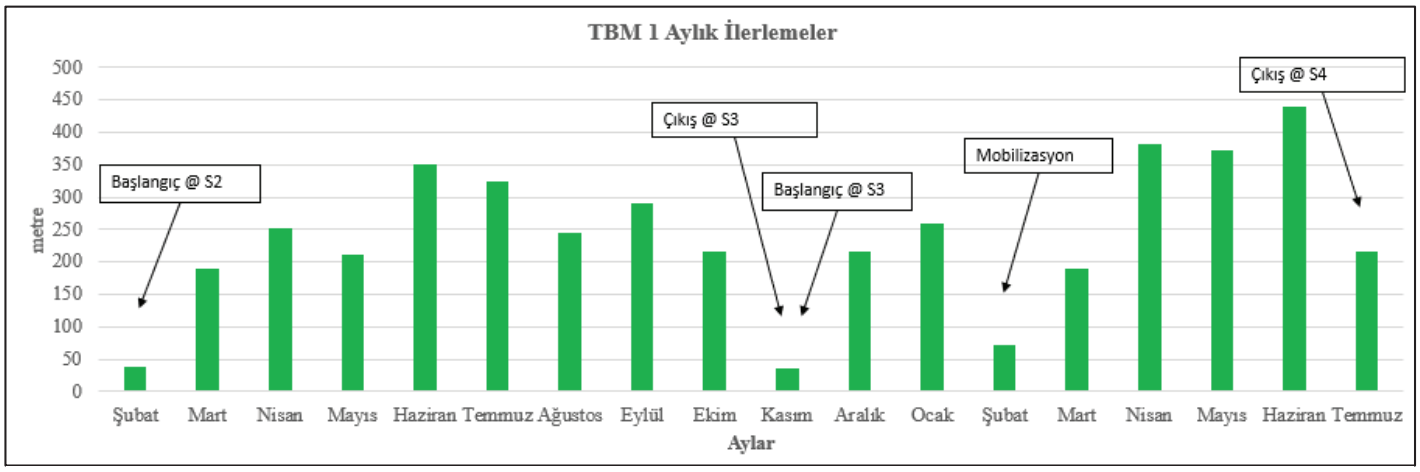
TBM'lerde 100 mm/dk gibi yüksek bir açılma hızına sahip 16 adet itme silindiri bulunmakta ve bu silindirler toplamda 28000 kN itme gücü sunmaktadırlar. Ana itme sistemine ek olarak, 152 mm stroke mesafesine sahip 12 aktif yönlendirme silindiri de bulunmaktadır. Dahası, TBM'lerin yönlendirme becerilerini artırmak üzere kuyruk kalkanı ile orta kalkan arasında pasif yönlendirme silindirleri yer almaktadır. TBM'lerin ana itme silindirlerinde otomatik tilt kontrol sistemi de bulunmaktadır.

TBM'ler aynı zamanda kesici kafa, kazı odası ve helezon konveyöre köpük ve polimer enjekte edilmesini sağlayan, geliştirilmiş zemin koşullandırma sistemine sahiptir. Zemin koşullandırma sistemine atanmış olan 6 adet köpük enjeksiyon hattı bulunmaktadır. Sistem üzerinde daha hassas bir kontrol ve yüksek performans sunmak üzere her bir hattın kendisine ait bir pompası ve dozaj sistemi bulunmaktadır. Zemin koşullandırma sistemi, ABİS projesindeki kazılar sırasında hem TBM kazı performansının artırılmasında hem de suya doygun yoğun kumlu bölgeler gibi ayna stabilitesinin düştüğü riskli bölgelerde son derece yüksek performans göstermiştir.

2.3 TBM Performans Verileri

ABİS projesinde kazıya ilk başlayan TBM, bu çalışma kapsamında TBM 1 olarak adlandırılmıştır. TBM 2 ise kazıya ikinci başlayan TBM'dir. Şaftlar ve pilot tüneller haricinde 19 km'lik delme tünellerin tamamının bu iki TBM ile kazılması planlanmıştır. Proje

tamamlanma süresi, tüm saha mobilizasyonları, bakımlar ve diğer yardımcı aktiviteler dahil olmak üzere aylık 200 m ortalama kazı performansı baz alınarak 48 ay olarak ön görülmüştür. Çalışma düzeni 7 gün ve 24 saat esasına göre planlanmış ve uygulanmıştır. TBM 1'in aylık ilerleme verileri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. TBM 1 aylık ilerleme verileri

Lokomotif ve raylı sistem ile pasa nakli projenin derin şaftlardan oluşan yapısı nedeniyle ana pasa nakil ve lojistik sistemi olarak belirlenmiştir. Ancak tünel uzunlukları ve derin şaftlar dikkate alındığında, söz konusu sistem ve ekipmanlar aynı zamanda lojistik anlamda büyük zorlukları da beraberinde getirmiştir. Yüzeyde işletme için kullanılabilecek sınırlı alanlar, İstanbul'un zorlu topolojisi ile birleştiğinde TBM 1 işletmesi için yaklaşık 50 m derinlikte şaftlar kullanılması gerekmiş ve bu da tünelin lojistik olarak beslenmesini zorlaştırmıştır. Segmentlerin ve pasanın nakli için yükleme ve boşaltma sürelerinin ciddi şekilde artmasına neden olmuştur. Dahası, lojistik ile oluşan zaman kayıpları tünel ilerlemesine bağlı olarak zaman içerisinde artmaktadır. İlgili zaman kayıplarını en aza indirmek için Şubat 2022 yılında TBM 1, S3 şaftına çıkış yaptıktan sonra, işletme şaftı da yeniden mobilize edilerek çıkış yapılan şafta S3 taşınmıştır.

Lojistik ve diğer destek operasyonlardan kaynaklanan zaman kayıplarını telafi etmek için TBM'lerin daha yüksek aktüel kazı performanslarına ve aylık ilerleme rakamlarına ihtiyaç duyduğu aşikardır. Çizelge 3'te TBM 1 için en iyi günlük ve aylık ilerleme verileri ortalama aylık ve ortalama normalize edilmiş aylık ilerleme verileri ile birlikte sunulmuştur.

Çizelge 3. TBM 1 için en iyi ve ortalama ilerleme değerleri

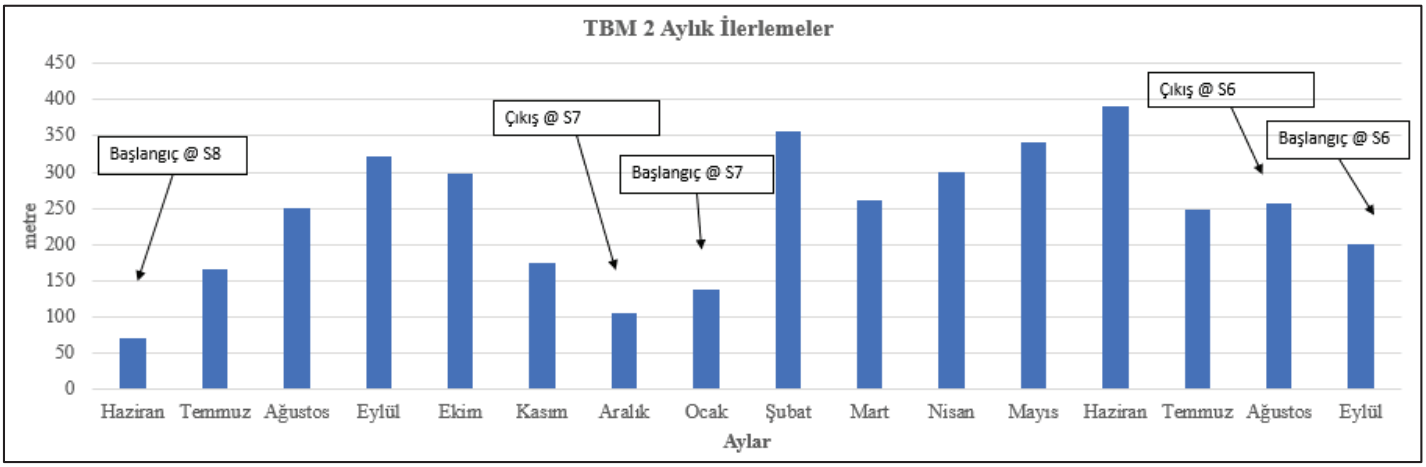
En İyi Günlük İlerleme (m)	24
En İyi Haftalık İlerleme (m)	122
En İyi Aylık İlerleme (m)	441
Ortalama Aylık İlerleme (m)	239
Normalize Ortalama Aylık İlerleme (m)	282

TBM 1 için en iyi günlük ilerleme 24 metre ile Mayıs 2022 tarihinde kaydedilmiş olup en iyi aylık ilerleme ise 441 metre ile Haziran 2022'de gerçekleşmiştir. Tüm aktivitelerin ve kayıpların da dahil edildiği aylık otalama değeri TBM 1 için 239 metre olarak hesaplanmıştır. Ancak kazı başlangıç ve bitişler ile yeniden mobilizasyon olan ayları çıkartarak normalize edildiğinde TBM 1 için aylık ortalama normalize edilmiş ilerleme verisi 282 metre olarak tespit edilmektedir. Bu değer proje başındaki tahmin ve hesaplamaların dayandığı 200 m ortalama aylık ilerleme değerinin 1.4 katıdır.

TBM 1 kazı güzergahının fay hatları, ezik zonlar, yüksek dayanım ve yüksek kuvars içeren geçiş zonları gibi sert kaya ortamlarından oluştuğu da unutulmamalıdır. TBM 1'in hattı

üzerinde aynı zamanda yüksek hidrostatik basınç oluşturan su havzaları da geçilmiştir. TBM 1'in kazı performansının bu değişken ve zorlu koşullar altında stabil ve istikrarlı kaldığı görülmüştür.

Şekil 8'de yumuşak ve stabil olmayan suya doygun kumlu kil, kum ve pekişmiş kum gibi zeminlerden geçen TBM 2'nin aylık ilerleme grafiği sunulmuştur. TBM 2 için en iyi günlük ve aylık ilerlemeler ile aylık ortalama ve normalize aylık ortalama verileri Çizelge 4'te verilmiştir.



Şekil 8. TBM 2 aylık ilerleme verileri

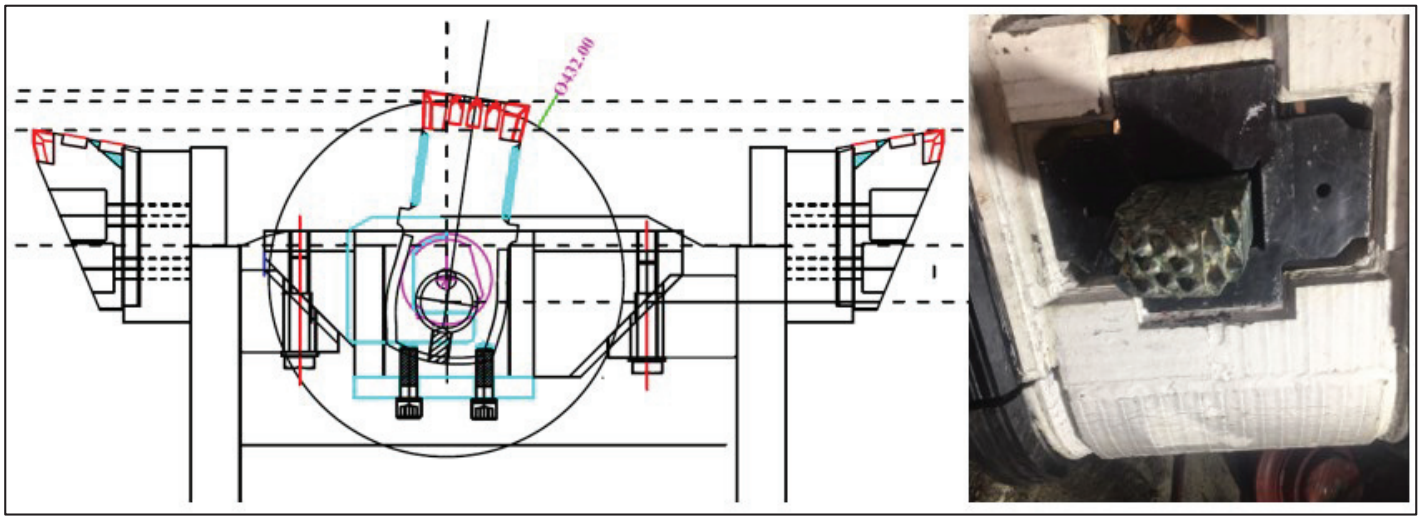
Çizelge 4. TBM 2 İçin En İyi ve Ortalama İlerleme Değerleri

En İyi Günlük İlerleme (m)	27
En İyi Haftalık İlerleme (m)	123
En İyi Aylık İlerleme (m)	390
Ortalama Aylık İlerleme (m)	243
Normalize Ortalama Aylık İlerleme (m)	271

TBM 2 için en önemli unsur, zorlu zemin koşulları ve yoğun şehirleşme altında ayna stabilitesinin her daim korunmasıdır. Benzer şekilde kum içerisinde görece olarak uzun kazı mesafeleri kat eden TBM 2 için kesici kafa üzerinde aşınma riski bir başka kaygı verici husus olmuştur. TBM kesici kafa ön yüzünde ve çevresi üzerinde yer alan aşınmaya dirençli karbid plakalar aşınma ile ilgili riskleri azaltmada yardımcı olmuştur. Ek olarak disk keskiler ve ripperlar arasında hızlı bir şekilde geçiş yapmaya olanak tanıyan bir tasarım benimsenmiştir. Özellikle killi kum ve pekişmiş kumlu zeminlerde kafa dönüş yönüne göre sallanan ripperlar (Şekil 10) torkun azaltılması ve kazı ilerleme hızlarının artırılmasında faydalı olmaktadır. Yukarıda belirtilen önlem ve planlamalar ile hassas lojistik ve işletme yönetiminin bir sonucu olarak TBM 2 Şubat 2022 tarihinde 27 metre ile en iyi günlük ilerlemesini gerçekleştirebilmiştir.

TBM 2 için en iyi aylık ilerleme 390 metre olarak gerçekleşmiş olup aylık ortalama ilerleme değeri ise 243 metre olmuştur. TBM 1 ile benzer bir yaklaşımla ve bir kıyas düzlemi oluşturmak için normalize aylık ilerleme değeri hesaplandığında, TBM 2'nin normalize edilmiş ortalama aylık ilerleme değerinin 271 metre olduğu görülmüştür. Giriş, çıkış, mobilizasyon gibi unsurlardan ayıklanarak elde edilen bu değer, TBM 2 için proje başında planlanan ortalama aylık ilerleme beklentisinin 1,35 katıdır.

En iyi günlük ilerlemeler TBM 1 ve TBM 2 için sırasıyla 24 m ve 27 m olarak tespit edilmiştir. Her iki TBM için en iyi aylık ilerlemeler ise 441 m ve 390 m olmuştur. TBM'lerin kazı performansını daha iyi temsil etmesi açısından normalize edilerek hesaplanan aylık ortalama ilerleme performansı ise TBM 1 için 282 metre ve TBM 2 için ise 271 metre olarak saptanmıştır. Özetle, birbirine tümüyle eş özelliklere sahip fakat tamamen farklı koşullar altında kazı yapan iki TBM'in kazı performansları hemen hemen aynı gözlenmiştir.



Şekil 10. Sallanan (Rocking) ripper görünümü

3 SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı ve zorlu koşullar altında kazı yapan birbirine eş iki TBM'in performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda birbirine eş iki TBM'in performanslarının karşılaştırılmasına olanak veren ABİS projesi incelenmiş ve bu çalışma kapsamında özetlenmiştir.

TBM projelerinde anahtar unsurlardan bir tanesi projenin en başından en sonuna kadar istikrarlı, sürdürülebilir ve ön görülebilir bir kazı performansı elde etmektir. Çünkü TBM projeleri işletme ve getiri fazından önce yüksek ilk yatırım ve detaylı planlama gerektiren projelerdir. Özellikle birden fazla TBM'in yer aldığı projelerde, projenin genel başarısı projede yer alan tüm TBM'lerin ortalama performanslarıyla doğrudan korelasyon içerisindedir. Bu perspektiften bakıldığında ABİS projesinde yer alan her iki TBM'de farklı koşullar altında olmalarına rağmen benzer ve tatminkar bir performans ortaya koymayı başarmıştır.

Aynı zamanda, birbirine özdeş TBM'lerin kullanılması rutin bakımların planlanması ve yürütülmesi, yedek parça stoğunun kontrolü ve temini, TBM kazı performansında büyük payı olan TBM ekibinin eğitilmesi ve uzmanlaştırılması gibi konularda çok büyük avantajlar sağlamaktadır. Özellikle, pandemi ve savaş gibi küresel ölçekte yedek parça tedariği ile insan gücü teminini zorlaştıran unsurların olduğu güncel konjonktürde, özdeş TBM'lerin kullanılması diskler ve sıyırıcılar gibi sarf malzemeler ile çok daha zor temin edilebilen motorlar veya hidrolik, mekanik/elektromekanik ekipmanlar için ortak bir yedek parça havuzu oluşturulmasını mümkün kılmıştır. Yedek parça ve sarf malzemelerin ortak bir bakım programıyla daha iyi yönetilebilir olması yedek parça stoğunun da yönetimini kolaylaştırmıştır.

TBM ekibi, TBM performansının arkasında yer alan en önemli unsurlardan bir tanesidir. Kalifiye ve uzmanlaşmış ekip özdeş TBM'ler arasında gerekli durumlarda bir TBM'den diğerine adaptasyon kaygıları olmaksızın transfer edilebilmektedir. TBM'ler özdeş olduğu için uzmanlaşmış ekip için bir öğrenme eğrisi veya eğitim süresi gerekmez. Başka bir deyişle, özdeş TBM'lerin kullanılması TBM performansına doğrudan etki eden iş gücünün de çok daha iyi ve kolay yönetilmesine olanak tanır.

ABİS projesi, bu bağlamda TBM üreticisi, işveren, müteahhit ve müşavir gibi bir altyapı projesinin tüm paydaşlarının iş birliğine ve bu iş birliği neticesinde daha önceden tespit edilmiş olan risklerin ve dezavantajların ortadan kaldırılmasına olanak veren bir tasarım çözümüne erişilebilmesine iyi bir örnek teşkil etmiştir.

Daha da önemlisi, sürekli altyapı yatırımları gerektiren büyük şehirler için, iyi/ihtiyaca uygun tasarlanmış TBM'ler birden fazla projede uzun süre kullanım olanağı sunmaktadır. Böylelikle

hem işveren hem de müteahhitler açısından TBM içeren altyapı projelerinde yüksek ilk yatırım maliyetlerinin azaltılmasında çok büyük avantajlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

Ates, U., Binen, I.S., Acun, S., Murteza, M., and Celik, Y. 2016. EPB Tunneling Challenges in Sandy Ground. 2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds, Istanbul, 16–18 November 2016

Ates, U., Binen, I.S., Acun, S., and Celik, Y. 2017. TBM Performance and Challenges Faced during Excavation of Mecidiyekoy - Mahmutbey Metro Line. International Tunneling Symposium in Turkey: Challenges of Tunneling, Istanbul, 2–3 December 2017

EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. 2018. European Region Drinking Water Tunnel Construction, Geological & Geotechical Investigation Report (in Turkish).

Kara F., Binen, I.S., Ates, U. 2018. Mahmutbey-Mecidiyeköy (İstanbul) Metro Tünelinde Değişen Litolojide Tünel Açma Makinasi (TBM) Performansının Değerlendirilmesi, 4th International Underground Excavations Symposium and Exhibition (UYAK 2018, İstanbul) İstanbul, 13-14 September 2018 (in Turkish).

URBAN TUNNELLING, DIGITALIZATION IN TUNNELLING

ŞEHİR TÜNELCİLİĞİ, TÜNELCİLİKTE DİJİTALLEŞME

Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metro Projesi Kapsamında Aç-Kapa İstasyonlarında Farklı Zemin-Kazı Destek İlişkilerinin Jeoteknik Ölçümlerle Değerlendirilmesi

Evaluation of Different Ground-Excavation Support Relationships with Geotechnical Measurements at Cut and Cover Stations within the Scope of Çekmeköy - Sancaktepe - Sultanbeyli Metro Project

F. S. Ergincan, S. Kılınç
Yüksel Proje A.Ş., Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

M. Zengin
Doğuş İnş. ve Tic. A.Ş., Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

ÖZET: İstanbul, nüfusu sürekli artan bir metropoldür. Günümüz kent yaşamının bir gereği olan metro projelerinde en önemli nokta, güvenli ve kontrollü bir şekilde imalatların tamamlanmasıdır. Bu kapsamda jeoteknik ölçüm ve değerlendirmeler, problemin erken tespiti, takibi ve çözümü açısından önem arz etmektedir. Bu bildiride, Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli metro projesi kapsamında istasyon imalatları esnasında yaşanan deformasyonların değerlendirilmesi ve çözümlerine dair iki farklı örnek ele alınmaktadır. Kazı esnasında meydana gelen yatay yer değişimlerini ölçmek için; inklinometreler, reflektörler ve yük hücreleri kullanılmıştır. Yapılan jeoteknik ölçümlerin yorumlanması, önlemlerin alınmasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada "Soğukpınar Makas" ve "Sancaktepe Şehir Hastanesi" istasyonlarındaki ölçümlerin değerlendirilmeleri ve alınan önlemler açıklanmaktadır.

ABSTRACT: İstanbul is a metropolis with an ever-increasing population. The most important point in metro projects, which is a necessity of today's urban life, is the completion of construction in a safe and controlled manner. In this context, geotechnical measurements and evaluations are crucial in terms of early detection, follow-up and solution of the problem. In this paper, two different examples of the evaluation and solutions of the deformations experienced during the construction of the stations within the scope of the Çekmeköy-Sancaktepe- Sultanbeyli metro project are discussed. In order to measure the horizontal displacements that occur during excavation; inclinometers, reflectors and load cells were used. Interpretation of geotechnical measurements has great importance in taking precautions. In this study, the evaluation of the measurements, and the precautions taken at the stations of "Soğukpınar Makas" and "Sancaktepe Şehir Hastanesi" are explained.

1 GİRİŞ

1.1 Proje Bilgileri

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane)–Taşdelen-Yenidoğan Metro Hattı Projesi her iki ana hat ve bağlantı hatları ile birlikte toplam ~17 km uzunluğunda imal

edilecek metro hattı; ana hat tünelleri ve toplamda 13 adet istasyon yapısı içermekte olan bir toplu taşıma sistemidir. Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Merkez Metro Hattı sırasıyla Meclis, Sarıgazi, Sancaktepe Şehir Hastanesi, Sancaktepe, Samandıra Merkez, Veysel Karani, Hasanpaşa ve Sultanbeyli İstasyonlarından geçerek Sultanbeyli ile TEM yolu kenarında son bulmaktadır. Sarıgazi –Taşdelen metro hattı ise Yenidoğan İstasyonundan başlayarak sırası ile Soğukpınar, Cumhuriyet, Aydınlar, Sarıgazi İstasyonlarından geçerek Emek İstasyonunda son bulmaktadır. Saha için yer bulduru haritası Şekil 1 ’de verilmiştir.

Şekil 1. Yer bulduru haritası

1.2 Amaç ve Kapsam

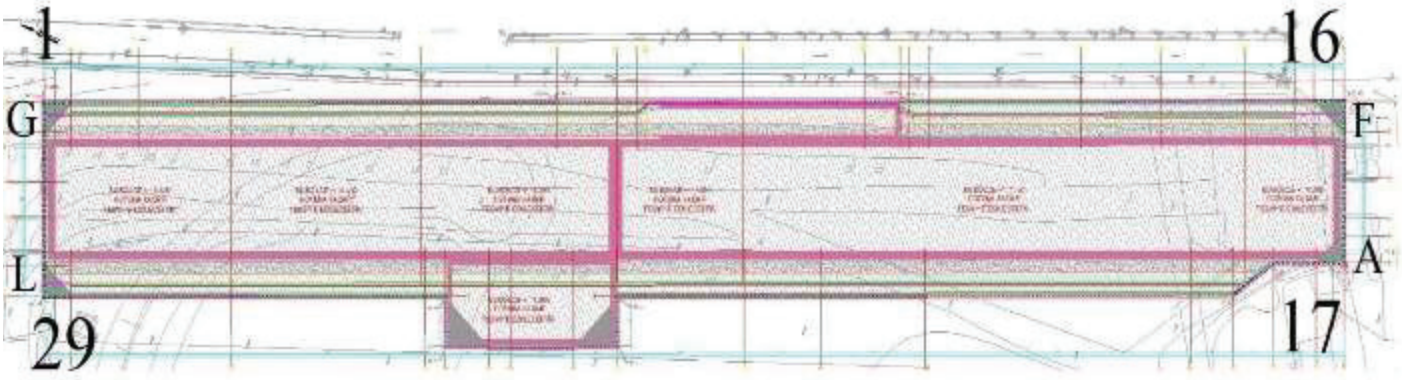
Bu çalışmanın amacı, Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı Projesi kapsamında yapımı planlanan Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu ve Makas Yapısı ile Soğukpınar Makas yapısı kazılarında karşılaşılan deformasyonların jeoteknik ölçümlere yansımasının incelenmesi ve farklı iki vaka için karşılaştırılmalı analiz yapılmasıdır. Bu çalışma, reflektör, inklinometre ve load cell ölçüm kıyaslamaları ile geçici kazı destek imalatının tamamlanması sürecinde yeterli duraylılık sağlayacak şekilde uygulanan tasarım revizyonlarıyla ilgili bilgiler içermektedir.

2 JEOLOJİ VE ZEMİN ÖZELLİKLERİ

2.1 Sancaktepe Şehir Hastanesi Aç-Kapa İstasyonu ve Makas Yapısı

Sancaktepe Şehir Hastanesi istasyonu, beraberindeki makas yapısı ile birlikte toplam 40,90m x 309,90m iksa boyutlarına ve ortalama 28,5m derinliğe sahiptir (Şekil 2). İnceleme alanında gerçekleştirilen saha ve laboratuvar çalışmaları incelendiğinde, proje alanında üstte katı kil, altta ise sağlam-orta sağlam kireçtaşı birimi bulunmaktadır. Güzergâhın bu bölümünde aç–kapa yapısı ile imal edilecek istasyon ve ön kısmında aç – kapa makas yapısı planlanmıştır. Bu kesim, tünel kotlarında Pelitli formasyonuna (SDp) ait kireçtaşı birimleri ile geçilmektedir. Tünel kotlarının üst kesiminde yüzeye doğru, Sultanbeyli formasyonu, Dudullu üyesine ait çakıllı kil seviyeleri kireçtaşlarını üzerlemektedir. Kireçtaşları genel olarak, gri-koyu gri renkli, dayanımlı-yer yer orta dayanımlı, sert-yer yer orta sert, az-orta ayrışmış-yer yer taze özelliktedir. Birim içerisinde üst kesimlerde boyutları maksimum 50-60 cm. ye varan karstik boşluklar tespit edilmiştir. Öte yandan birim içerisinde alt seviyelerde andezitik dayk

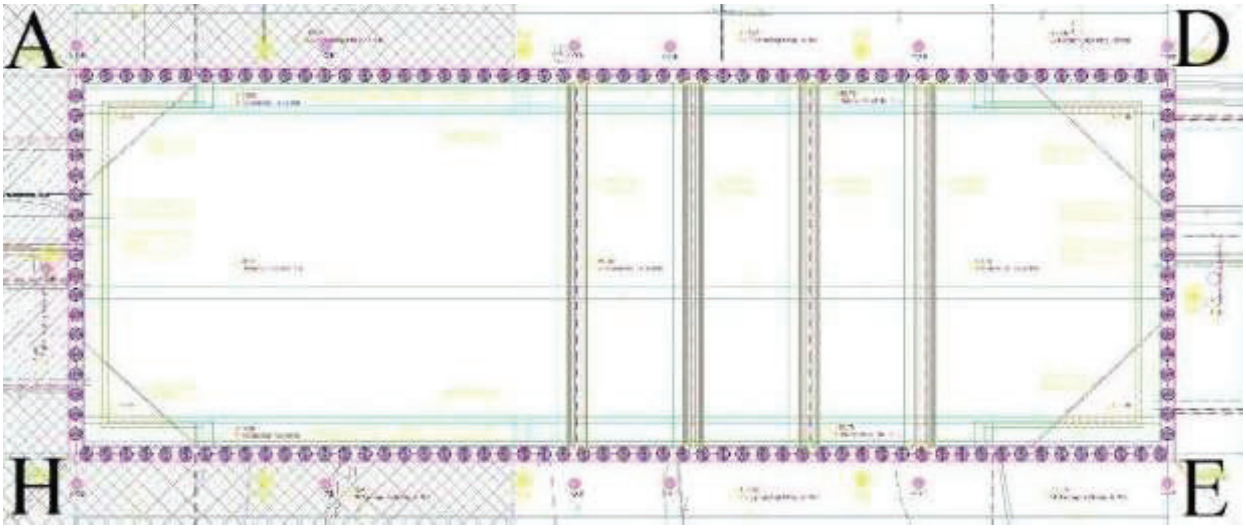
sokulumları gözlenmektedir. Temel sondajlarından elde edilen verilere göre, birimin tek eksenli sıkışma dayanım aralığı (q_u), 25.70–54.00 MPa, kaya malzeme deformasyon modülü (E_i) değerleri, 13.50–20.10 GPa aralığında tespit edilmiştir. Birime ait kütle deformasyon modül aralığı ise yapılan pressiyometre deneyleri sonucunda, 2000–3200 MPa olarak tespit edilmiştir. Kireçtaşlarını üzerleyen ve tünel kotlarının daha üst kısımlarında gözlenen çakıllı / kumlu kil seviyeleri genel olarak kahve–koyu kahverenkli, katı – çok katı, nemli, orta – yüksek plastisiteli muhtelif kökenli çakıllı özellik göstermektedir. Birim içerisinde yapılan deneylere göre SPT–N aralığı 7 – 67 aralığında tespit edilmiştir. Bu seviyelerde yapılan pressiyometre deneylerinde ise, 15–40 MPa aralığında değişim gösteren kütle deformasyon modülleri tespit edilmiştir.



Şekil 2. Sancaktepe Şehir Hastanesi Makas Aç-Kapa yapısı vaziyet planı

2.2 Soğukpınar Makas Yapısı

Soğukpınar Makas Yapısı boyutları takribi 23 x 66 m, derinliği 34.60~36,.45 m mertebelerinde 4 cepheden oluşan dikdörtgen bir yapıdır. Kazı-destek sistemi fore kazıklar, başlık kirişi, kuşak kirişi, betonarme/çelik strutlar, püskürtme beton/betonarme perde öngermeli ankrajlar ve zemin çivilerinden oluşmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı vaziyet planı

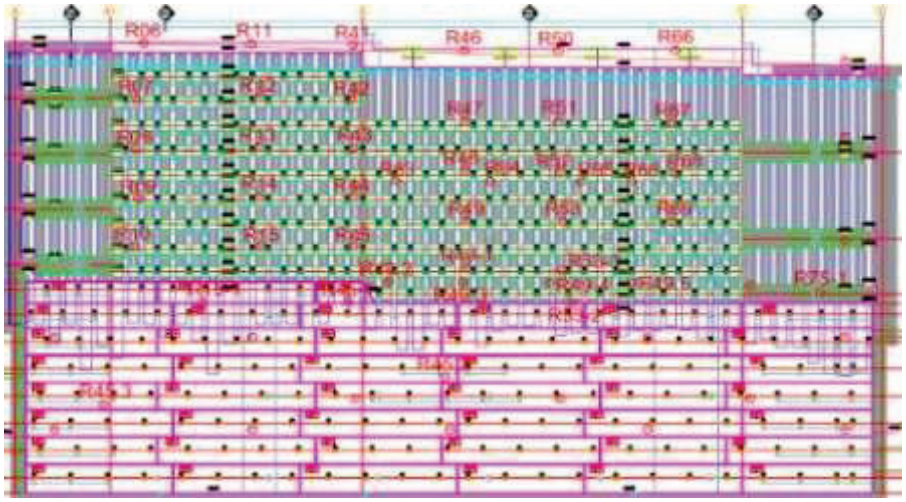
İnceleme alanında yapılan sondajlara ait loglar (ISYS 102, ISYS 103, ISYS 104) incelendiğinde, makas yapısının tasarımına yönelik sondaj loglarındaki değişkenlik göz önünde bulundurularak iki adet zemin profili belirlenmiştir. İlk zemin profili sırasıyla yüzeyde dolgu, dolgunun altında kil, kilin altında orta ayrışmış kumtaşı, daha sonra en alt tabakada orta ayrışmış kireçtaşı-kiltaşı-silttaşından oluşturulmuştur. İkinci zemin profili sırasıyla yüzeyde dolgu, dolgunun altında kil, daha sonra en alt tabakada orta ayrışmış kireçtaşı-kiltaşı /silttaşından oluşturulmuştur. Bu kesimde birimler içerisinde yapılan sondajlara göre elde edilen tek eksenli

sıkışma dayanım aralığı (qu) 11.80 – 40.10 MPa, kaya malzeme deformasyon modül aralığı ise (Ei) 4.50–10.70 GPa olarak belirlenmiştir. Yerinde yapılan pressiyometre deneylerinde, bu seviyelere ait kütle deformasyon modülü, 890 – 5900 MPa arası değişkenlik göstermektedir. Tünel kotlarında yapılan geçirgenlik testlerine göre birim "az geçirimli– geçirimli yer yer geçirimsiz" özelliktedir.

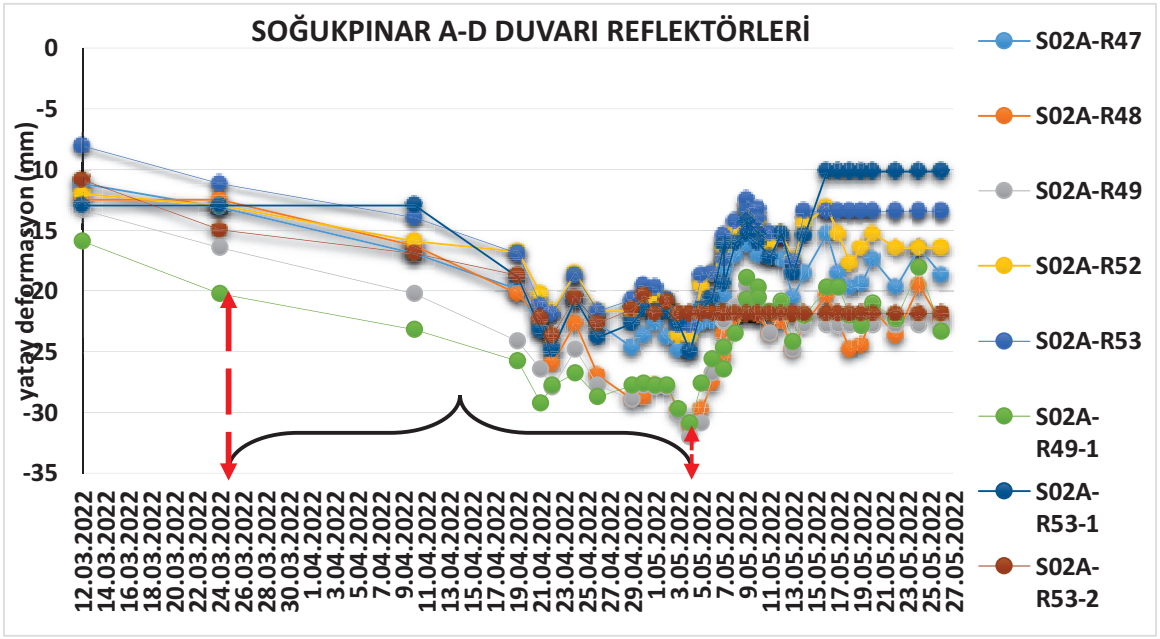
3 DEFORMASYON ARTIŞI

3.1 Soğukpınar Makas Yapısı Deformasyonu

Söz konusu aç-kapa yapısının iksa işlerine 2017 yılında başlanmıştır. Ancak çalışmalar belli bir süre durmuş olup, 06.10.2021 tarihinde iksa çalışmalarına tekrar başlanmıştır. İksa sistemi tasarımında, öngörülen ankrajların tasarım ömürleri yaklaşık 2 yıl olup, geçici ankraj olarak düşünülmüştür. Bu nedenle ankrajlarda işlev kayıpları görülmüş ve başlayan kazı çalışmalarıyla birlikte iksa sisteminde deformasyon artışı yaşanmıştır. Bu deformasyonlar reflektörde limit değerleri geçmesine karşın inklinometrelerde benzer bir durum gözlenmemiştir. Bunun nedeni zeminde önemli bir itkinin oluşmamasına rağmen, iksa sisteminin zeminin oluşturduğu itkiyi karşılayamamasıdır (Şekil 4-12).

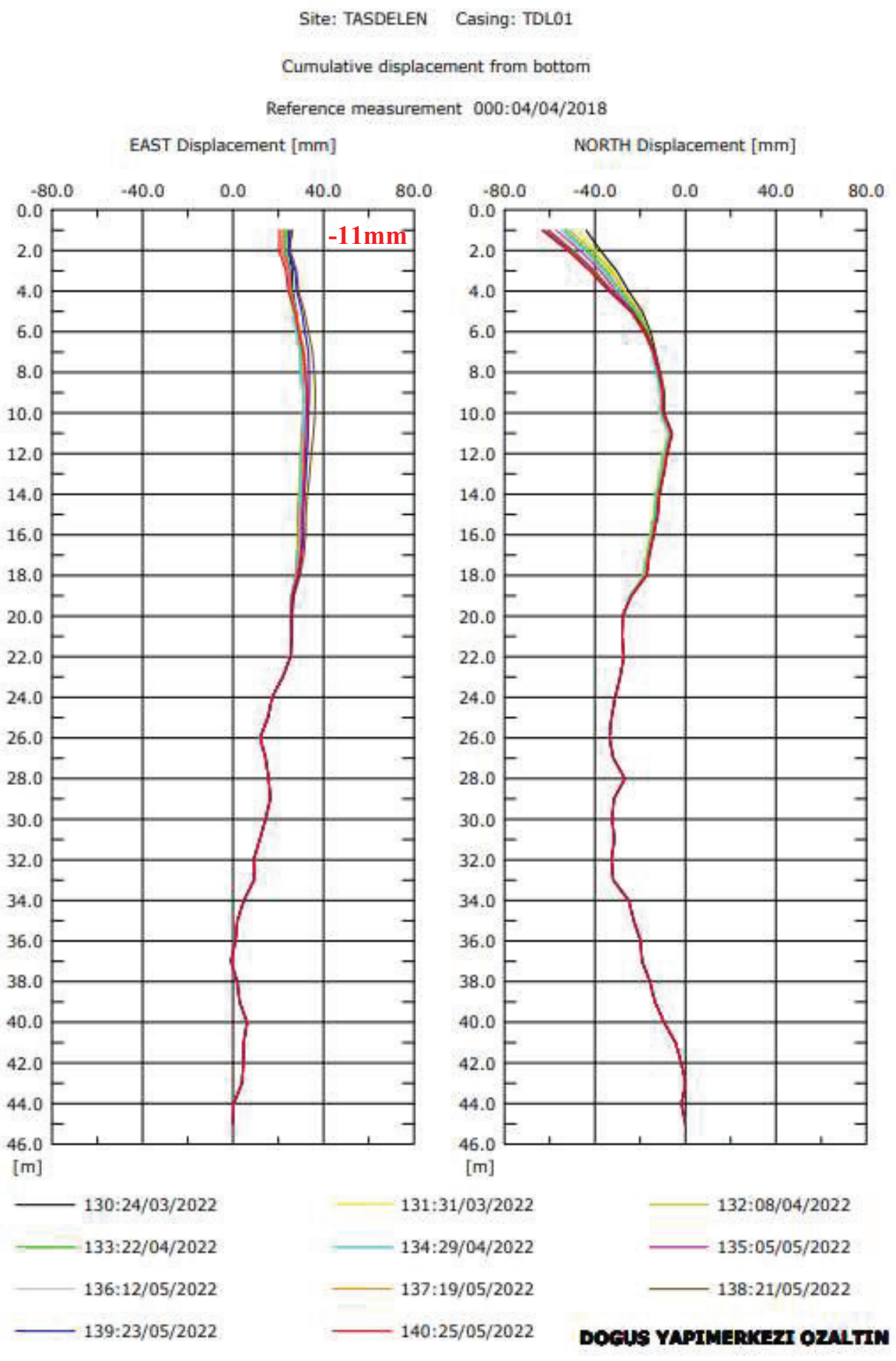


Şekil 4. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı A-D duvar

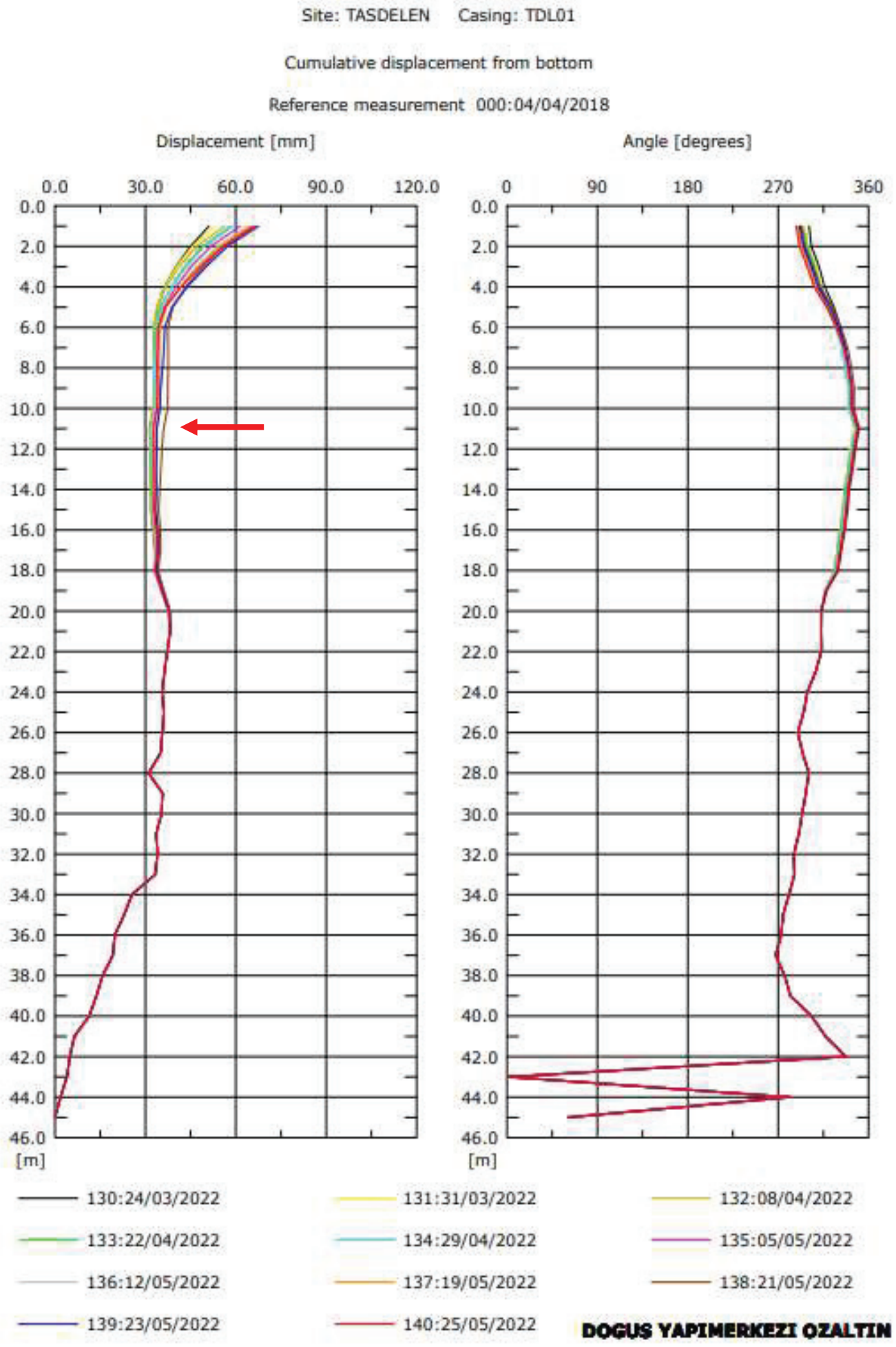


Şekil 5. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı A-D duvarı reflektör grafikleri

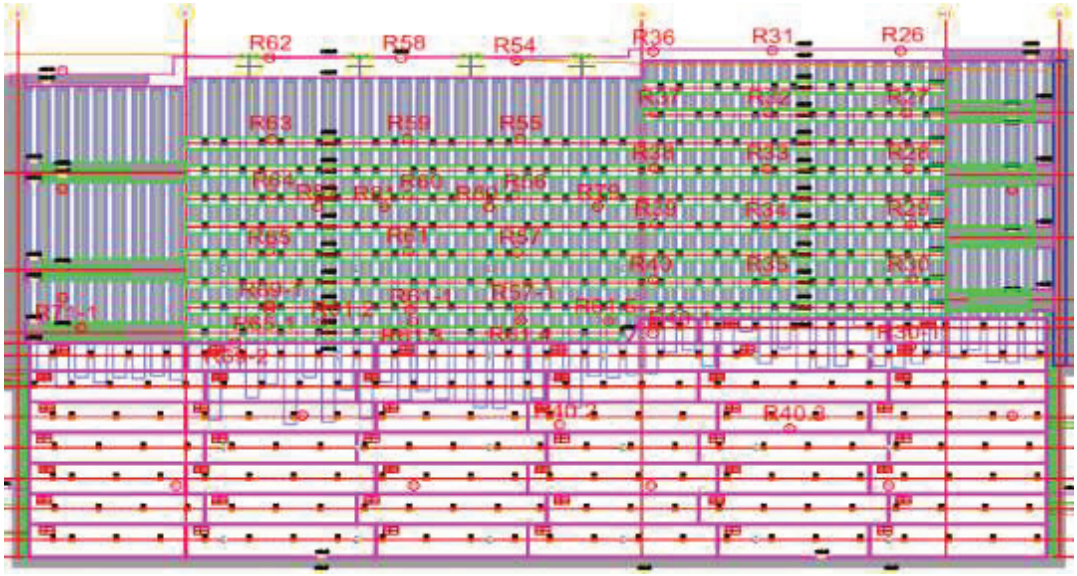
3.1.1 Grafiklerde deformasyon karşılaştırması



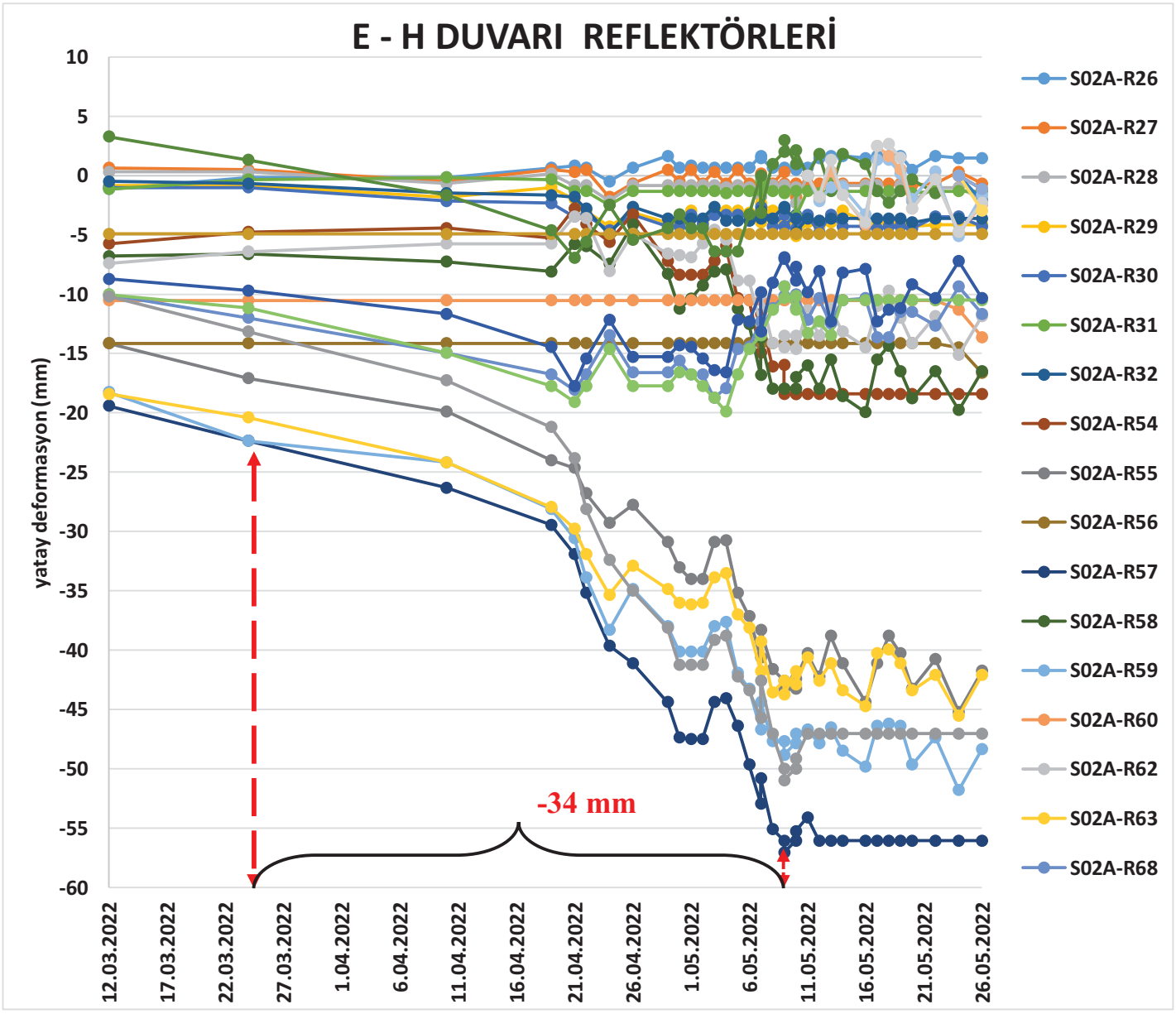
Şekil 6. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı A-D duvarı inklinometre grafikleri- 1



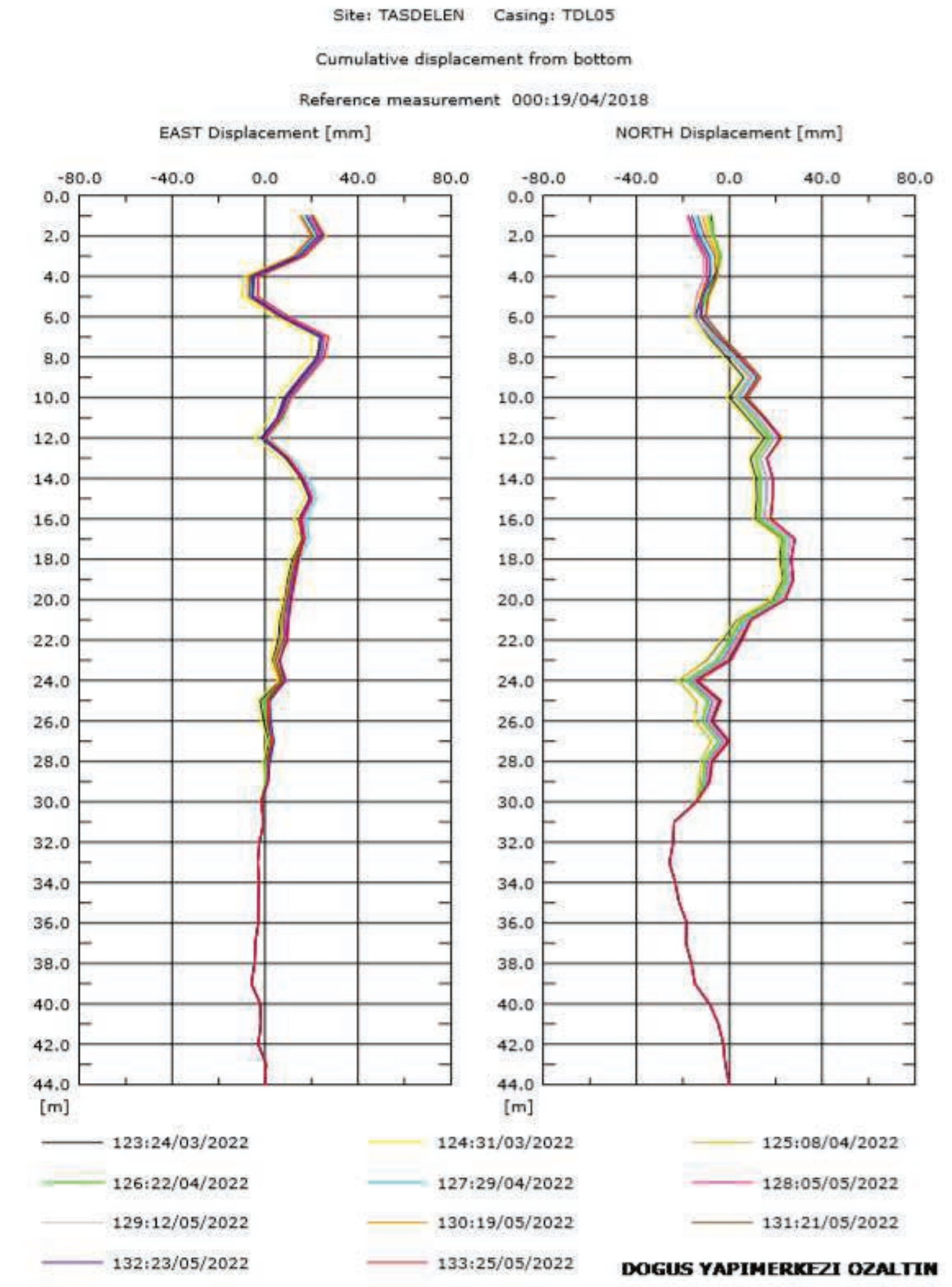
Şekil 7. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı A-D duvarı inklinometre grafikleri-2



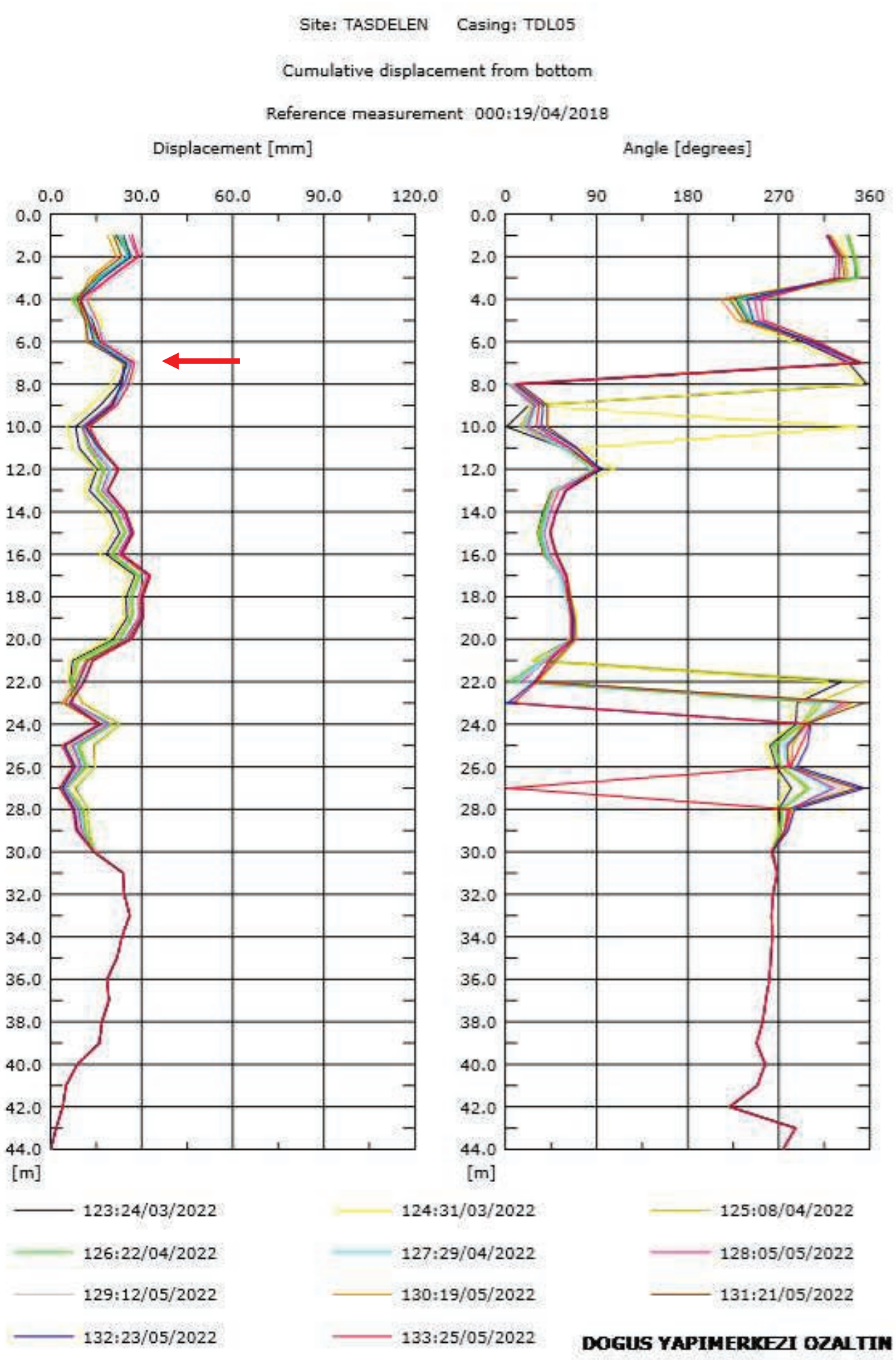
Şekil 8. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı E-H duvarı



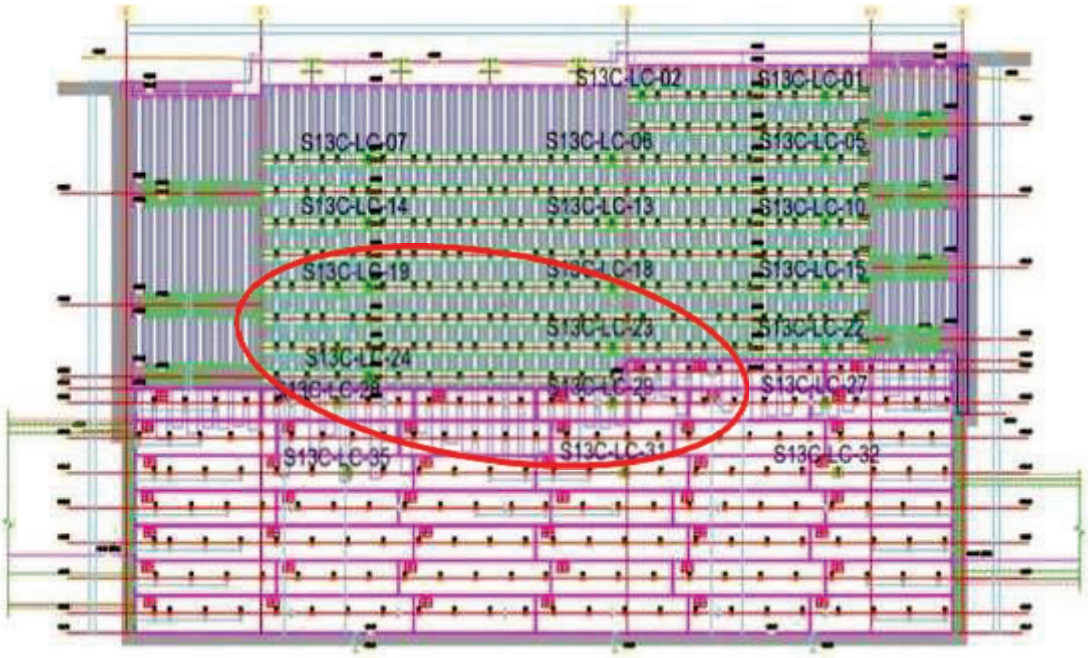
Şekil 9. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı E-H duvarı reflektör grafiği

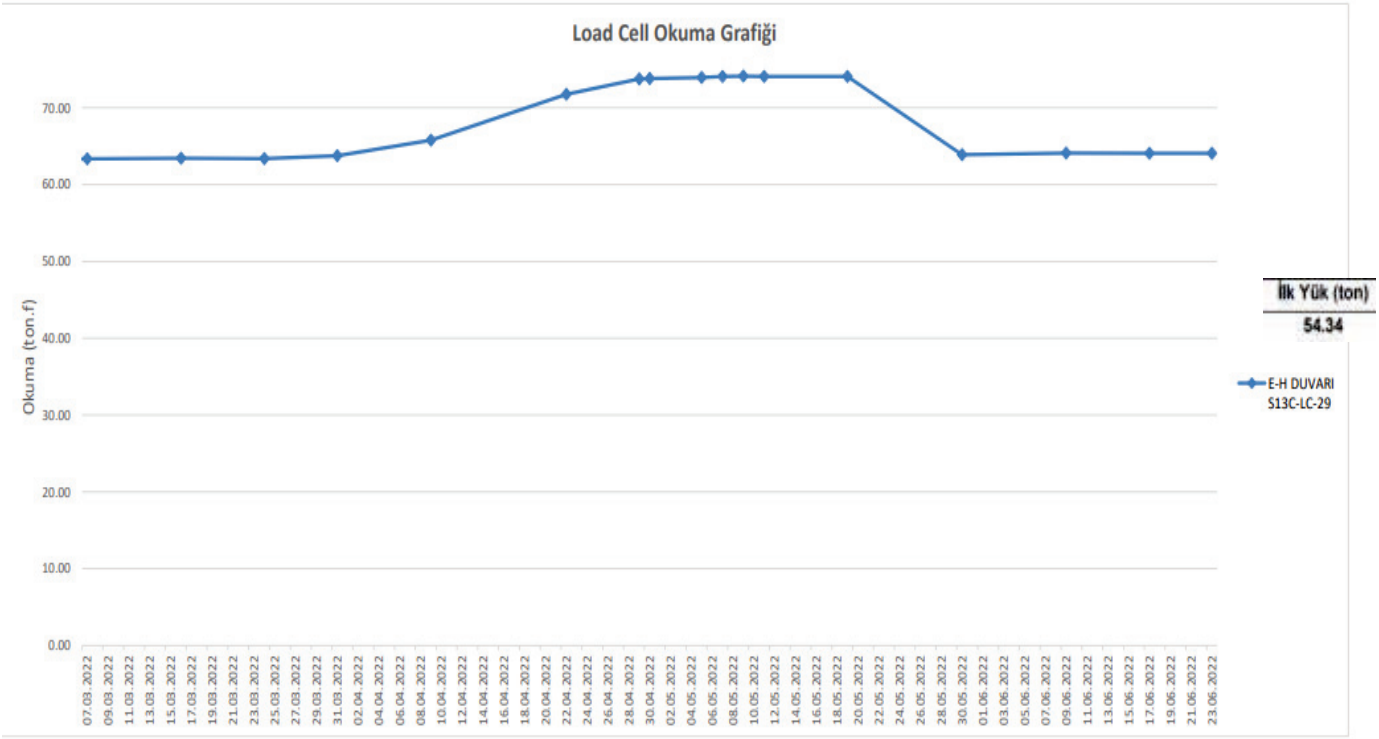


Şekil 10. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı E-H duvarı inklinometre grafiği-1



Şekil 11. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı E-H duvarı inklinometre grafiği-2



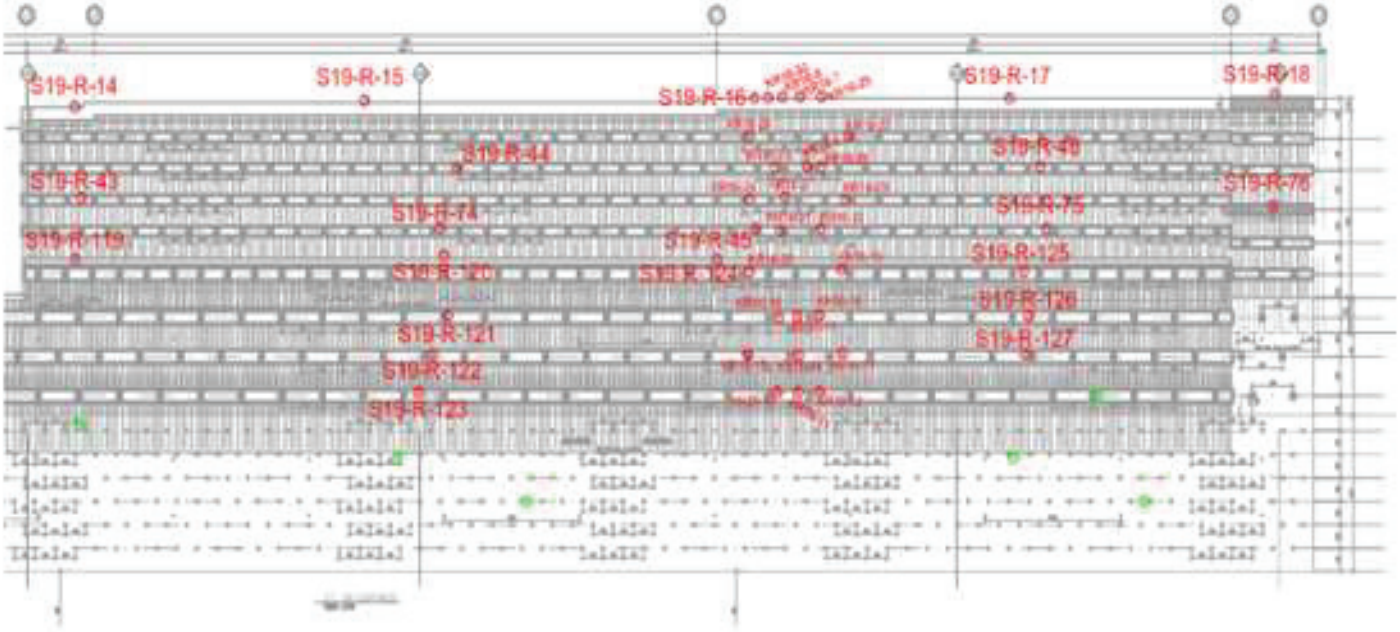


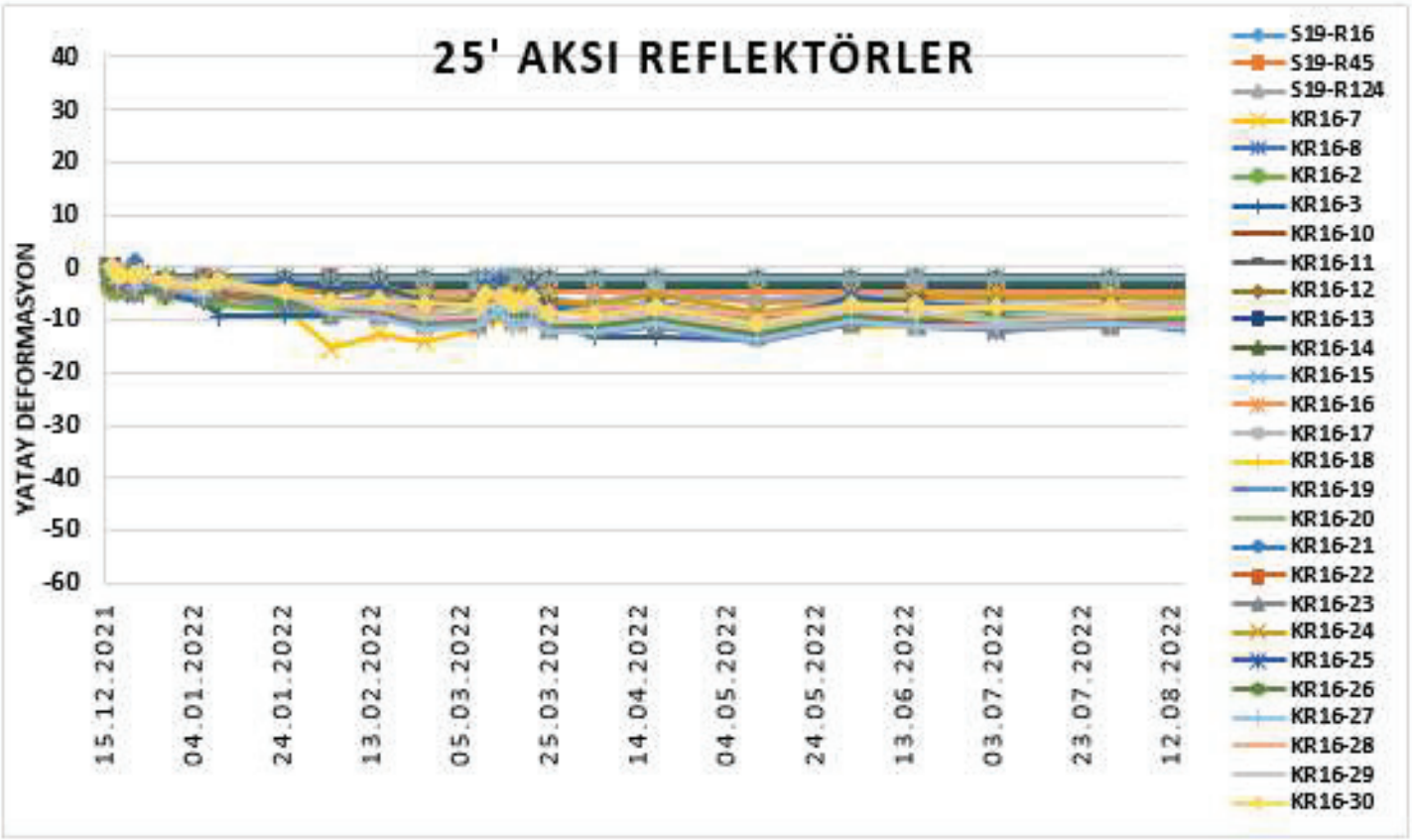
Şekil 12. Soğukpınar Makas Aç-Kapa yapısı E-H duvarı load cell grafiği (LC-29)

3.2 Sancaktepe Şehir Hastanesi Makas Yapısı Deformasyonu

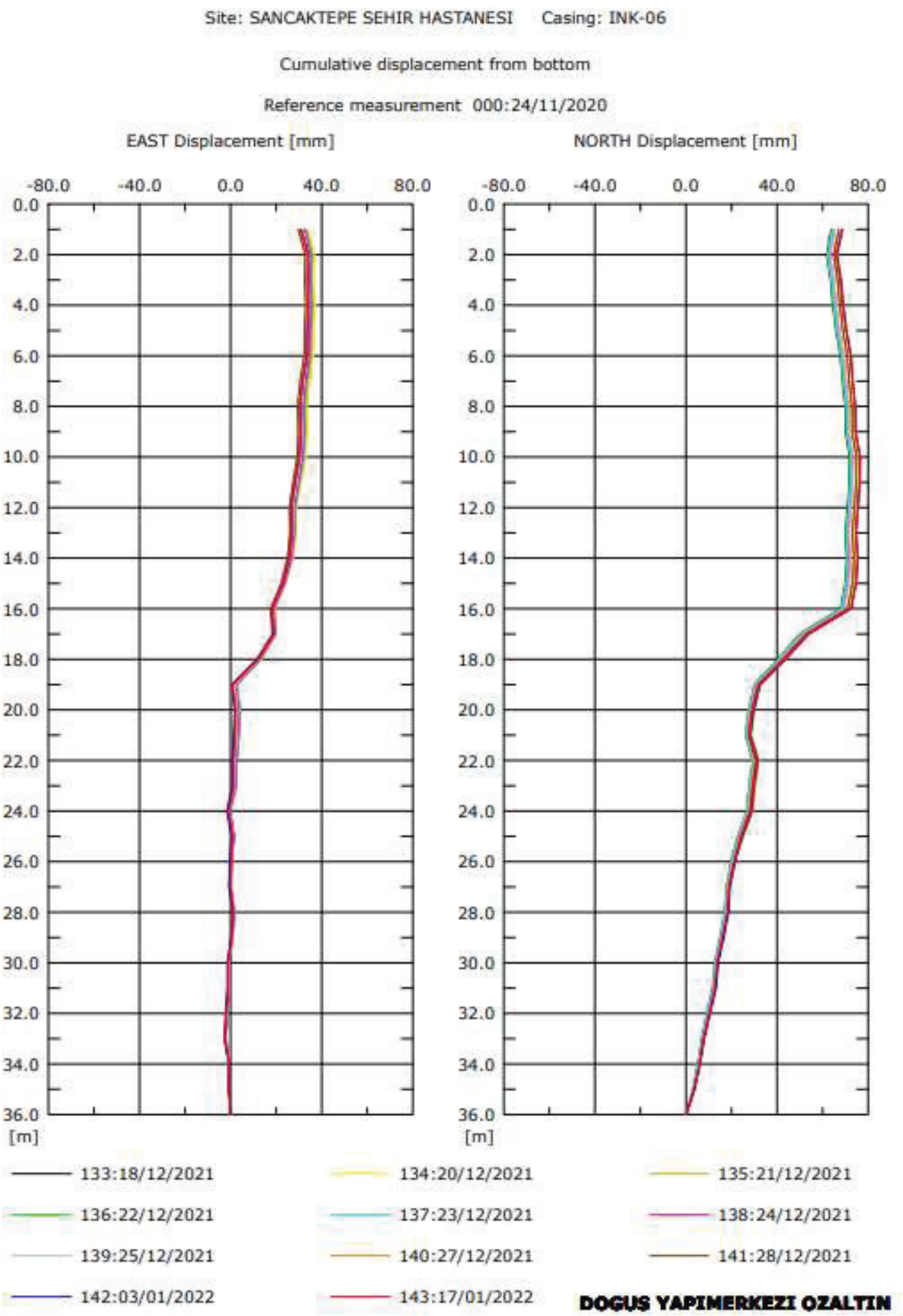
300 metre geniş açıklıkla yapılan makas yapısı kazısında 21-25 aksı bölgesinde, sahada yapılan ilave deneme delgileri ve mini kazık delgileri neticesinde, ankraj kök bölgelerinin kaya biriminde kaldığı, fakat mini kazık delgilerinin lokal olarak kil birimine girdiği görülmüştür. Sahada yapılan jeoteknik izleme sonucunda bu bölgede bulunan inklinometre, reflektör ve tiltmetre incelendiğinde, 6 numaralı inklinometrede 8cm civarında deplasmanlar, bu değerlerin aksine reflektör ve tiltmetrede ise 0-12 mm civarında deplasmanlar görülmüştür. Bunun nedeni, zemindeki karstik boşluklar ve düşük dayanımlı birim kaynaklı oluşan itkinin iksa sistemince karşılanmış olmasıdır (Şekil 13-15).

3.2.1 Grafiklerde deformasyon karşılaştırması

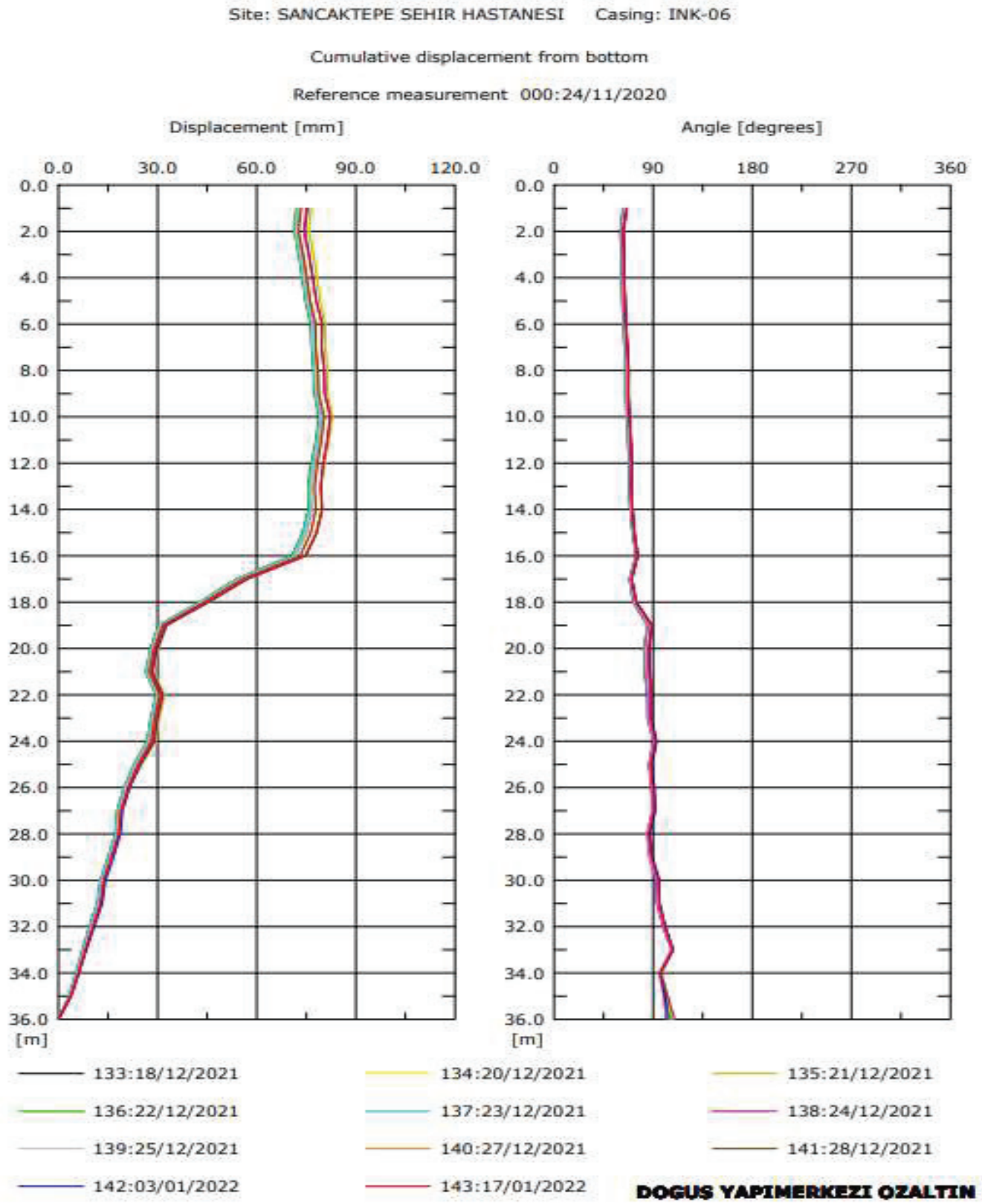




Şekil 13. Sancaktepe Şehir Hastanesi Aç-Kapa yapısı 25 ' Aksı reflektör grafiği



Şekil 14. Sancaktepe Şehir Hastanesi Aç-Kapa yapısı 25 ' Aksı inklinometre grafiği



Şekil 15. Sancaktepe Şehir Hastanesi Aç-Kapa yapısı 25 ' Aksı inklinometre grafiği

4 ALINAN ÖNLEMLER

Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu 27–29 aksları arası artan deformasyonlar için bazı önlemler alınmıştır. Bu hareketi takip amaçlı ilave 3D prizma montajı yapılmış ve ölçüm sıklıkları artırılmıştır. 2021 Aralık ayında çalışmaların devam ettiği aç-kapa makas yapısı bölgesi 27-28 aksları arasında jeoteknik izleme araçlarında, beklenilen sınır değerlerden fazla deplasman okumalarının olduğu tespit edilerek söz konusu mahalde kazı durdurulmuş, 2

kademe geri dolgu yapılmış, projesinde revizyonuna gidilerek 2 ilave kuşak kirişi ve ankraj kademesi eklenmiştir. Bahse konu güçlendirme imalatları 2022 Şubat ayı itibariyle tamamlanarak kazı iksa işlerine devam edilmiştir. Ayrıca ilerleyen kazıyla birlikte tekrar okumalarda görülen deformasyon artışından sonra, 27-29 aksları arası +94,20 kotu 3. Kademe zemin çivisi imalatlarının 1,50 m yatay aralık ile yapılması kararlaştırılmıştır. Alınan önlemler neticesine deformasyonların sönümlendiği gözlenmiştir.

Soğukpınar Makas Yapısı Geçici Kazı ve Destek Sistemi projesinde öngörülenden daha fazla deformasyon meydana gelmesi sebebiyle bölgede kazı çalışması durdurularak proje revizyon çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda belli bölgelerde açılacak ano boyutları küçültülmüş, ankrajlar sıklaştırılmış, yük kaybı gözlemlenen ankrajlar için ilave ankraj eklenmiştir. Çalışmalar yapılan revizyon doğrultusunda devam etmiştir. Fakat devam eden deformasyon sonrası tüm sahada kazı-iksa çalışmaları durdurulmuş ve 1. kademe iksa sistemi ortasına 3 adet, 2. kademe iksa sistemi palye kotu üzerine 3 adet olmak üzere 2 kademede toplam 6 adet ilave çelik strut atılması kararı alınmıştır. İlave göğüsleme kirişi ve çelik strut tasarım çalışmaları tamamlanarak 30.04.2022 tarihinden itibaren sahada bu yönde çalışmalara başlanmış gerekli geri dolgu ve platform kurulumu işleri yapılmıştır. 25.05.2022 tarihinde son çelik strutın da yerine montajı yapılarak güçlendirme çalışması tamamlanmıştır. 31.05.2022 tarihinde hafriyat alımına yeniden başlanmıştır. Alınan önlemler neticesine deformasyonların sönümlendiği gözlenmiştir.

5 SONUÇLAR

Derin kazıda tasarımın amacı, yapılması düşünülen yapının ve etrafında mevcut bulunan her türlü yapının emniyetini sağlamaktır. Bu nedenle özellikleri ve boyutları belli olan yapının oturduğu ve çevresindeki zeminin özellikleri jeoteknik etüdlerle belirlenmelidir. Komşu yapı, yol ve mevcut sistemlerin durumu ve yerleşimi hakkında detaylı bilgiler toplanmalıdır. Kazı çalışmaları başladıktan sonra ise gerek yapı ve çevre güvenliği gerekse zaman kaynak kullanımı açısından jeoteknik ölçüm ve değerlendirmelere düzenli olarak devam edilmelidir. Bu çalışmayla CSS projesi kapsamında; Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu'nda inklinometrelerde tespit edilen açılma durumuna karşı alınan geri dolgu, kuşak kirişi ve ankraj önlemleriyle deformasyonun kontrol altına alındığı, Soğukpınar İstasyonu'nda ise inklinometrelerde zemin itkisi tespite edilmemesine rağmen yük hücresi ve reflektörlerde aralığıyla iksada tespit edilen deformasyon durumuna karşı alınan çift sıra strut önlemiyle deformasyonun kontrol altına alındığı ortaya konmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü başta olmak üzere, bu çalışmanın gerçekleşmesi için teşvik edici ortamı sağlayan Yüksel Proje AŞ'ye ve çalışma süresince bilgisini ve tecrübesini cömertçe paylaşan çalışanlarına teşekkür etmeyi bir borç bilirler.

KAYNAKLAR

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü. Çekmeköy-Sultanbeyli ve Çekmeköy (Hastane)- Taşdelen Metro Hatları Kesin Proje Jeolojik ve –Jeoteknik araştırma raporu "CSS-IBB-AYJ-L00-000-GE-31-109-F-00_Cilt1. Yayımlanmamış Rapor, İstanbul.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Montaj ve İşletmeye Alma İşleri Kontrollük, danışmalık ve mühendislik hizmetleri işi Proje Yönetim Raporu. Yayımlanmamış Rapor, İstanbul.

Kazı Destek Sistemlerinin Tasarımında Kazai Durumların Değerlendirilmesi ve Boru Destek Elemanlarının Düşmesini Önleyecek Bir Detay Geliştirilmesi

Evaluation of Accidental Cases in Shoring System Design and Developing A Detail Against to Strut Fail

M.M. Gökdoğan
Yüksel Proje A.Ş., Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

C. Avşar
İBB Anadolu Raylı Sistem Şube Müdürlüğü, İstanbul

M. Çeri
İBB Anadolu Raylı Sistem Şube Müdürlüğü, Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

A. Türkoğlu, S. Çevik
Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada boru desteklerde meydana gelebilecek hasarlar neticesinde oluşabilecek iş güvenliği problemlerinin önüne geçilebilmesi hedeflenmektedir.

Kazı destek sistemleri projelendirilirken bir boru destek elemanların çalışmama durumu göz önünde bulundurularak analiz sonuçları irdelenmiştir. Harici olarak, boru desteklerde bahsi geçen hasar durumu neticesinde iş güvenliği açısından bir problem yaşanmaması açısından boru destek birleşim detayları incelenmiş, kazai durumda fayda sağlayabilecek bir detay geliştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde boru destek kaybı öngörülerek tasarımların değerlendirilmesi ve bahsi geçen birleşim detayının geliştirilerek kullanılmasının iş güvenliği ve iş programı açısından faydalı olabileceği saptanmıştır.

ABSTRACT: In this study, it is aimed to prevent occupational safety problems that may occur as a result of damage to the struts.

While the shoring systems were being designed, the results of the analysis were examined by considering the failing of a strut. In addition, in order not to face any problems in terms of occupational safety as a result of the mentioned damage to the struts, the strut joint details have been examined and a detail that can be beneficial in case of accident has been developed. As a result of the analysis, it has been determined that the evaluation of the designs by predicting the loss of strut and using the mentioned joint detail by developing can be beneficial in terms of occupational safety and work schedule.

1 GİRİŞ

Günümüzde ulaşımın vazgeçilmezlerinden biri olan metro hatları kullanıcılar için büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Nüfus artışının ve göçlerin bir sonucu olarak ülkemizde de bu doğrultuda yapılan yatırımlar artış göstermektedir. Bilindiği üzere birçok metro yapısı derin kazı imalatları yapılarak imal edilmektedir. Derin kazı imalatlarının yapılabilmesi, kazı destek sisteminin efektif ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi büyük önem arz etmektedir.

İlgili çalışma kapsamında Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro Hattı kapsamındaki Sancaktepe İstasyonu kazı destek sistem çözümü irdelenmiştir. Kazai durum senaryoları neticesinde boru destek kaybı öngörülerek yapılan analizler değerlendirilmiştir.

1.1 Projeye Ait Genel Bilgiler

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane)–Taşdelen-Yenidoğan Metro Hattı Projesi (ÇSS-YCE) her iki ana hat ve bağlantı hatları ile birlikte toplam ~17 km uzunluğunda imal edilecek metro hattı; ana hat tünelleri ve toplamda 13 adet istasyon yapısı içermekte olan bir toplu taşıma sistemidir. Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Merkez Metro Hattı sırasıyla Meclis, Sarıgazi, Sancaktepe Şehir Hastanesi, Sancaktepe, Samandıra Merkez, Veysel Karani, Hasanpaşa ve Sultanbeyli istasyonlarından geçerek Sultanbeyli ile TEM yolu kenarında son bulmaktadır. Sarıgazi –Yenidoğan metro hattı ise Yenidoğan istasyonundan başlayarak sırası ile Soğukpınar, Cumhuriyet, Aydınlar, Sarıgazi istasyonlarından geçerek Emek istasyonunda son bulmaktadır. Saha için yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.

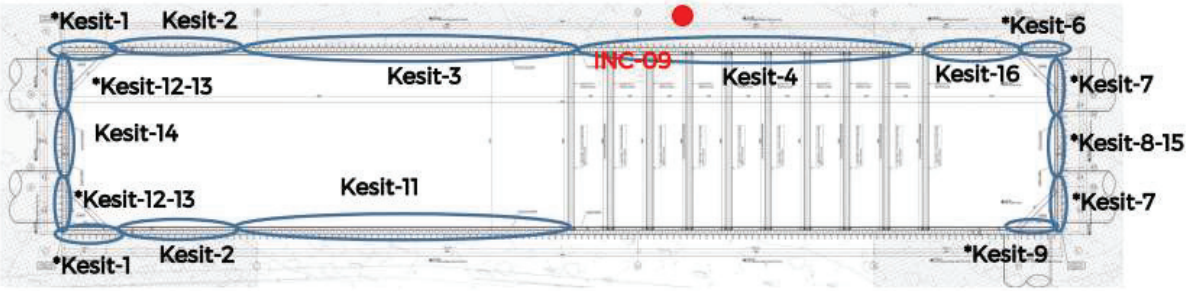
Şekil 1. Proje güzergahı ve yer bulduru haritası

2 ANALİZ VE HESAPLAR

Sancaktepe (Abdurrahmangazi) İstasyonu, Aç-kapa metoduyla inşa edilecektir. İstasyon yapımında aşağıdan yukarıya (bottom-up) yapım yöntemi uygulanmıştır; geçici iksa yapılarının inşasından sonra kalıcı yapıların imalatı temel döşemesinden başlanarak en üst kata kadar devam edecek şekilde yapılacaktır. Yan duvarlar ve kolonlar, kirişler, ara kat döşemeleri ve tavan döşemesinin sıralı olarak imal edilecektir.

Adurrahmangazi İstasyonu +115.00 ile +117.50 kotları arası yerleştirilecek boru desteğin taban kotu +115.72 olacaktır. Boru destek 4 sıra HEA340 profilin birleştirilmesi ile oluşturulan çelik kuşak kirişinin alınana plaka vasıtası ile kaynaklanacaktır. Çelik kuşak kirişi

850mmx650mmx620mm'lik bir guse detayı üzerine yerleştirilecektir. Analiz Kesit planı Şekil 2'de, zemin ve kaya mukavemet parametleri ise Çilge 1'de gösterilmiştir.



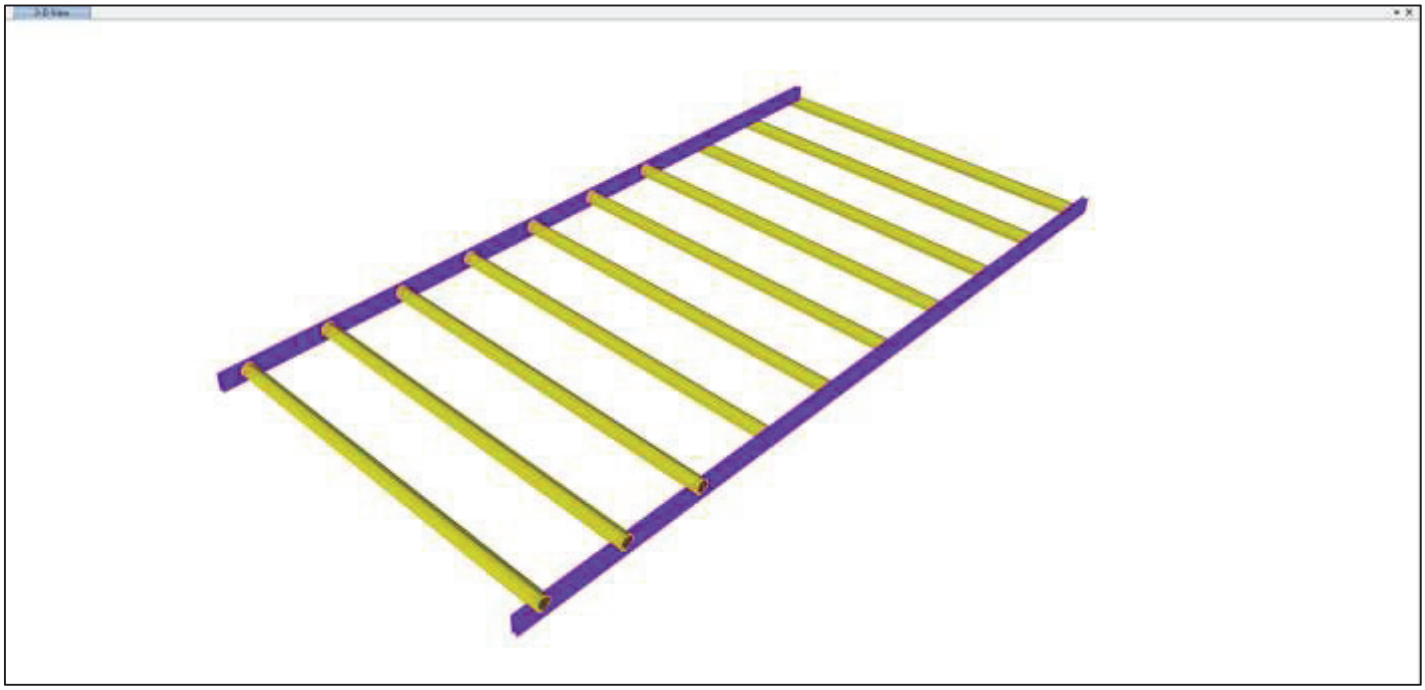
Şekil 2. Analiz kesitleri yerleşim planı

Çizelge 1. Zemin ve kaya için mukavemet parametreleri

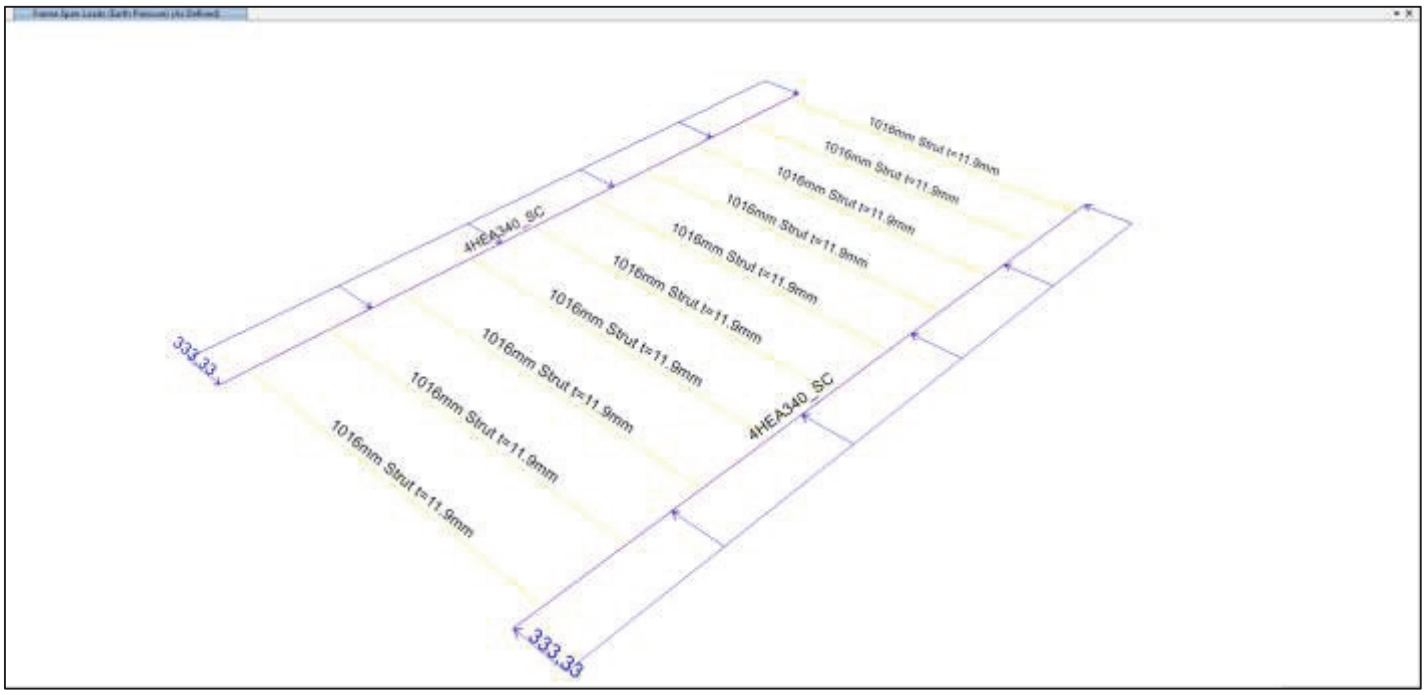
Tabaka	İçsel sürtünme açısı, ϕ' (°)	Kohezyon, c' (kPa)	Birim hacim ağırlık, γ (kN/m³)	Elastisite modülü, E (kPa)	Zemin modeli
0,00-1,40 Dolgu	28	5	18	15000*	HS
1,40-5,80 Kumlu/Çakıllı Kil	24	8	18	25000*	HS
5,80-18,00 Ayrışmış Kumtaşı-Kireçtaşı	35	15	21	40000*	HS
18,00-..... Orta Sağlam Kireçtaşı	35	120	23	250000	MC
Geri Dolgu	35	15	20	60000	MC

*Boşaltma (unloading) durumu için bu değer üçle çarpılmıştır.

Yapılan Plaxis analizleri neticesinde kuşak kirişlerine etkiyen yayılı zemin yükü 333.33 kN/m olarak hesaplanmıştır (Şekil 3 ve 4).

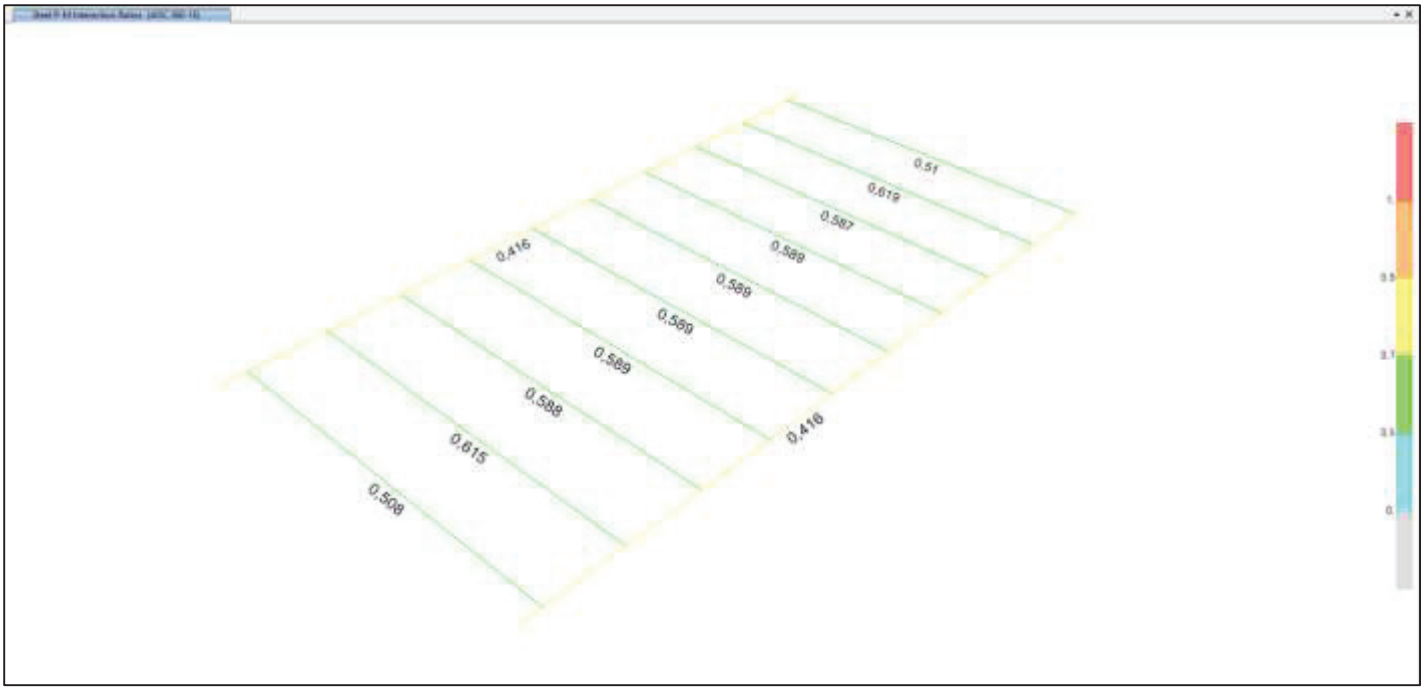


Şekil 3. 3D analiz modeli



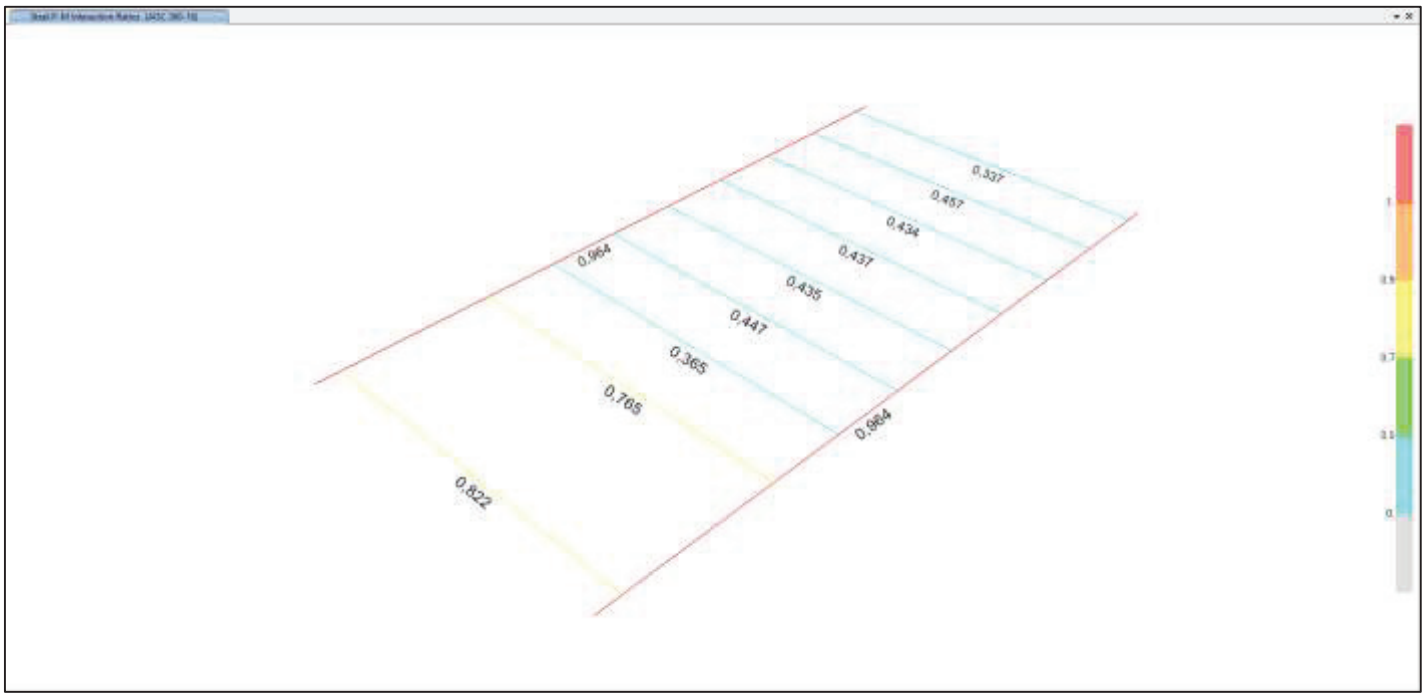
Şekil 4. 3D analiz modeli (Zemin yükleri ve kesitler)

Yapılan analizler neticesinde seçilen kuşak kirişi ve boru destek kesitlerinin yeterli olduğu görülmektedir (Şekil 5).



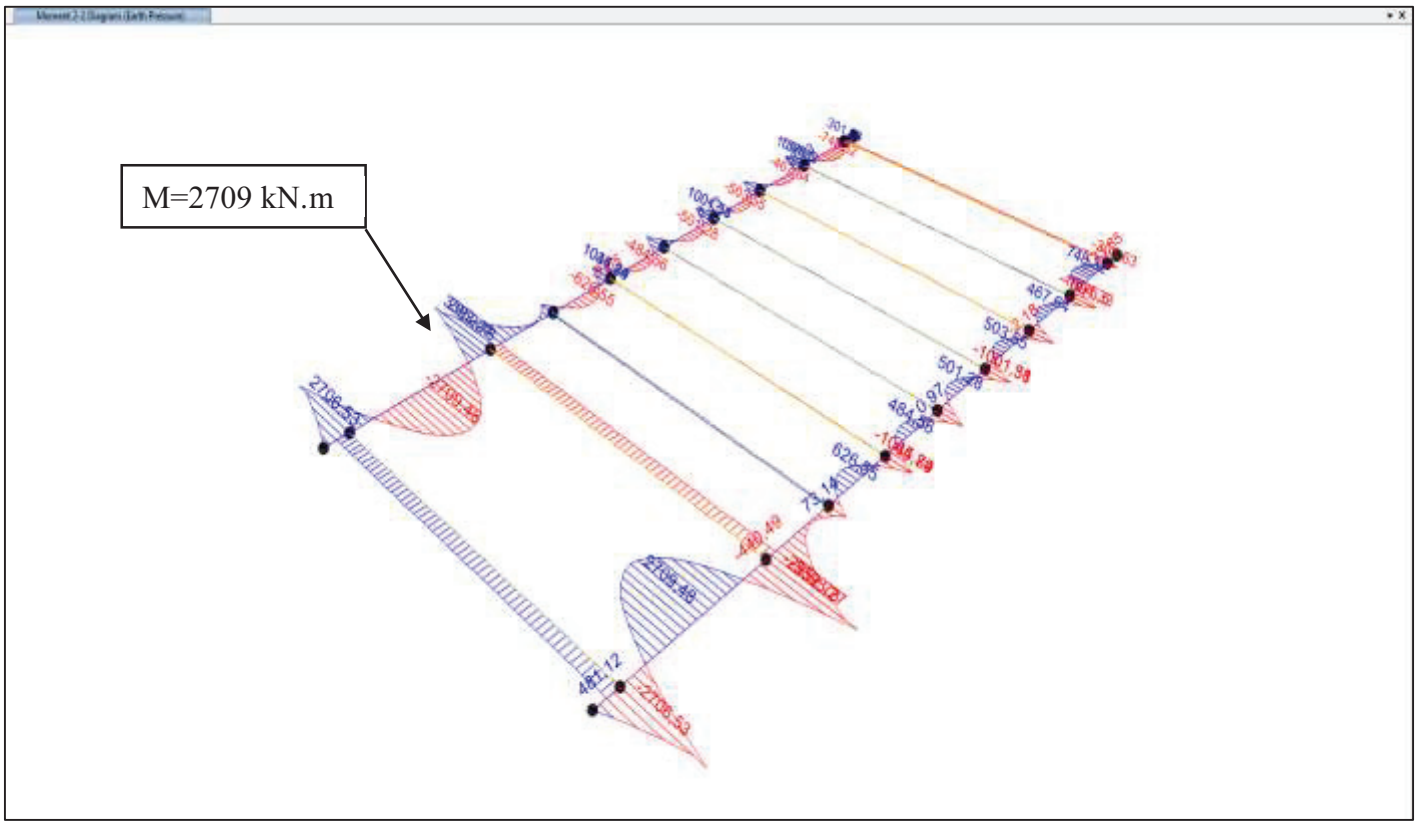
Şekil 5. Talep ve kapasite oranları

Kazai durumda plan düzleminde açıklığın en fazla artış göstereceği durum göz önünde bulundurularak 1.0 katsayısı ile analizler tekrarlanmış olup ilgili durumda kesitlerdeki kapasite artışı değerlendirilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere kazai durumda gevrek kırılmaya veya göçmeye sebebiyet verecek bir artış meydana gelmemektedir.

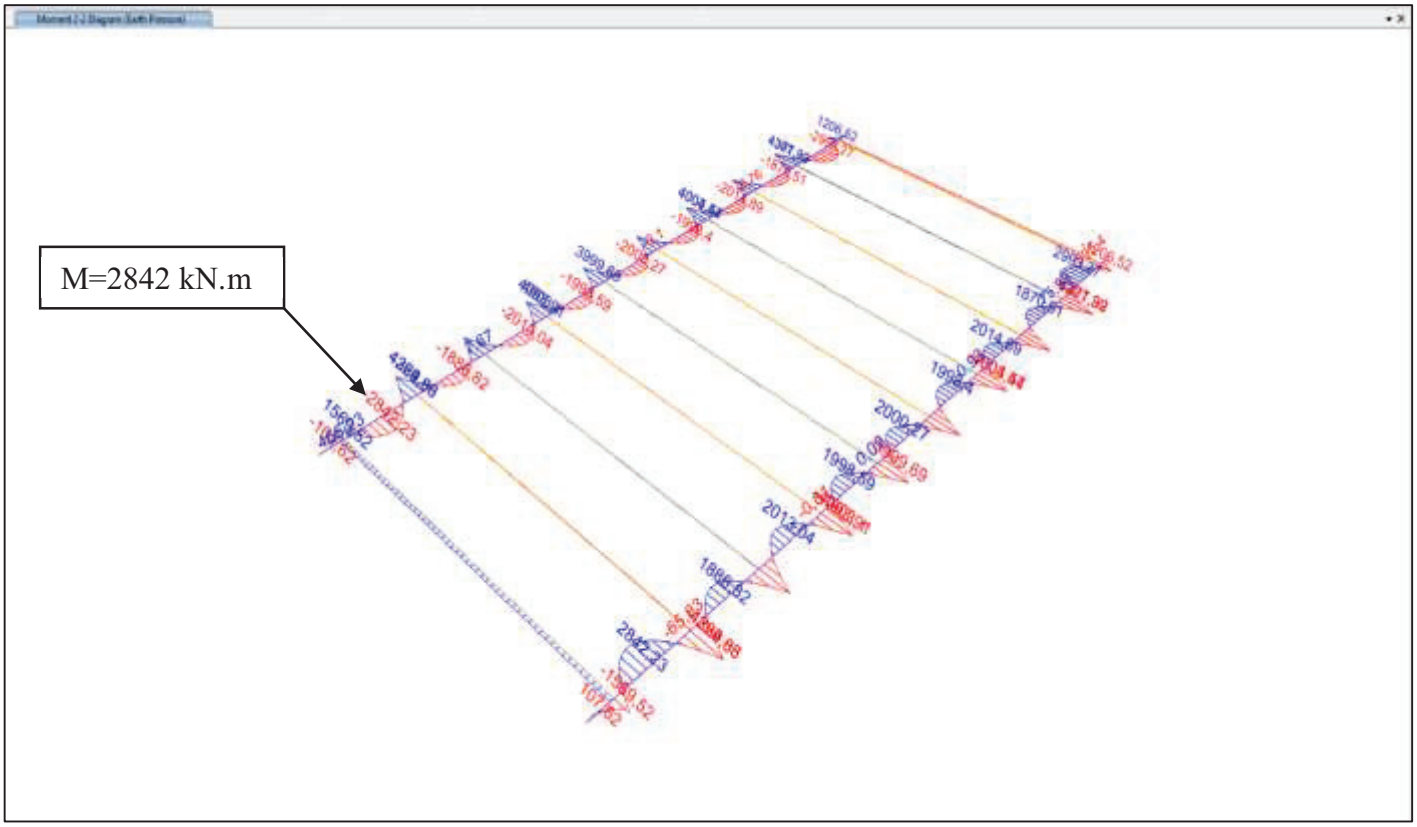


Şekil 6. Talep ve kapasite oranları (Kazai durum)

Bilindiği üzere kazai durum neticesinde hasar alacak olan boru destek elemanının hangisi olacağı bilinememektedir. Bu durumla ilgili olarak boru destek kaybı meydana gelmeden önce meydana gelebilecek olumsuz durumun göz önünde bulundurulabilmesi ve gevrek bir göçme veya kırılmanın önüne geçilebilmesi adına ilgili kesit tahkikleri yapılırken açıklığın 2 katına çıkacağı varsayılarak etkitilen zemin yükleri "1.35" katsayısı yerine "4" katsayısıyla arttırılarak analiz sonuçları kontrol edilmelidir. Bahsi geçen "4" katsayısı herhangi bir şartnameye dayanmamakla birlikte yalnızca açıklığın 2 katına çıkmasından kaynaklı olarak oluşabilecek eğilme reaksiyonlarını temsilen ampirik hesaplar neticesinde seçilmiştir. Ancak ilgili tahkikler neticesinde donatı tahkikinin yapılması ekonomik açıdan problem yaratabilmektedir. Mevcut durumda göğüsleme kirişlerinde kullanılacak olan donatı miktarının takribi olarak %196 artışına sebebiyet vermektedir. Kazı güvenliği açısından "4" katsayısı kullanılarak arttırılan zemin yükleri neticesinde oluşan reaksiyonlar değerlendirilmeli ve betonarme imalatlar için TBDY 2018 ve TS500 uyarınca "kesme kapasitesi üst sınırının" aşılıp açılmadığı tahkik edilmelidir. Benzer şekilde boru destek elemanları ile ilgili yükleme neticesinde meydana gelebilecek eksenel burkulma durumu göz önünde bulundurularak seçilen kesitler gözden geçirilmelidir. Harici olarak işveren veya idare talebi söz konusu olur ise donatı tahkiklerinin de "4" katsayısı kullanılarak yapılmasında fayda görülmektedir (Şekil 7 ve 8).



Şekil 7. Strut kaybının göz önünde bulundurulduğu hesap modeli (1.0G+1.0H)

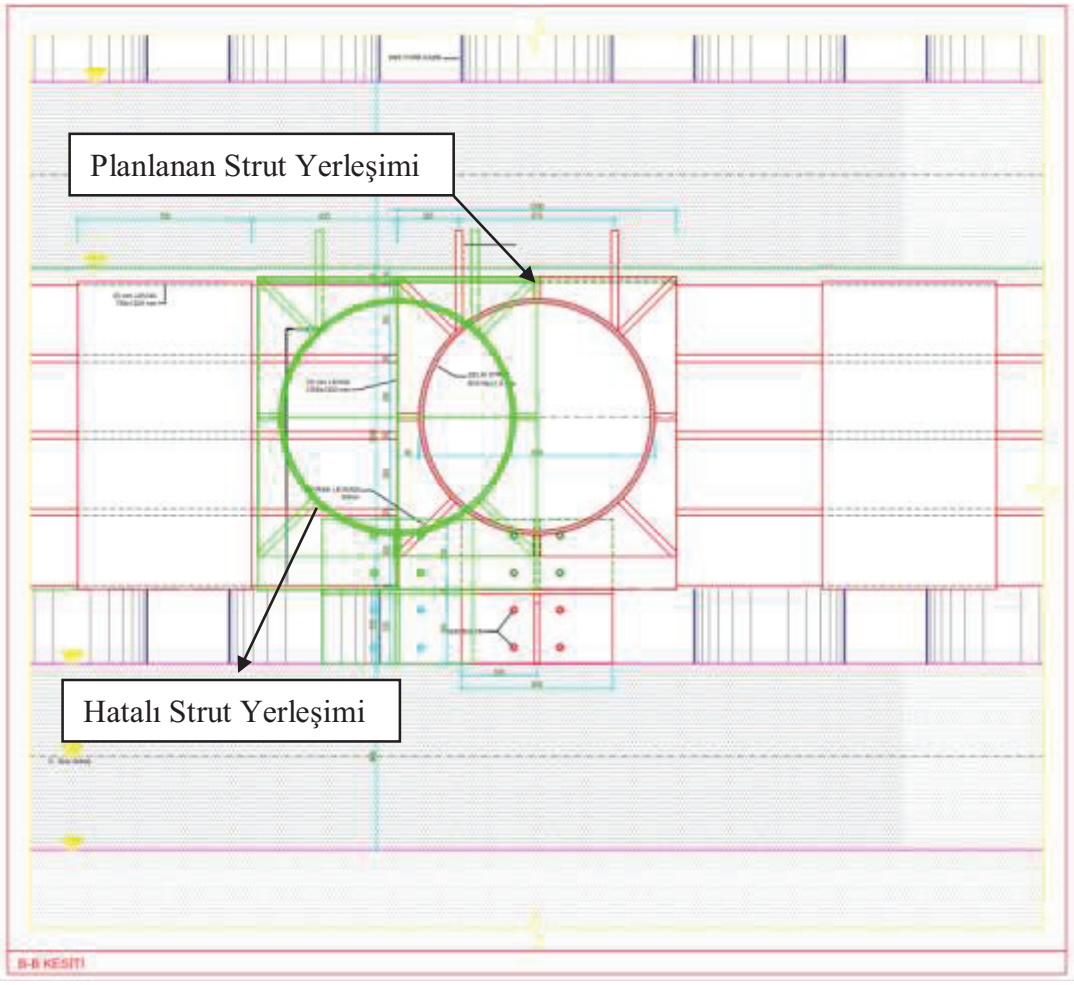


Şekil 8. Strut kaybının göz önünde bulundurulduğu hesap modeli (1.0G+4.0H)

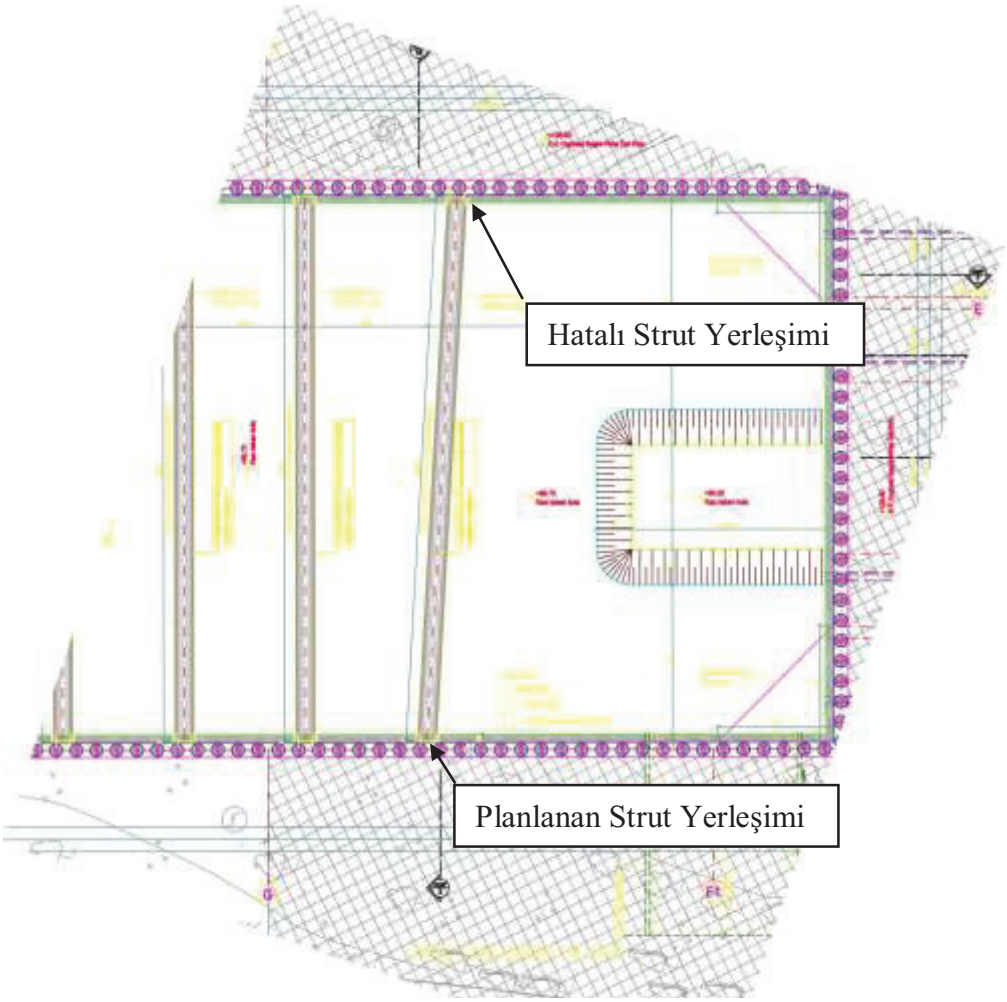
2.1 Boru destek Kaybı Neticesinde Oluşabilecek Sorunların Önüne Geçilebilmesi İçin Uygulanabilecek Birleşim Detayları

Bilindiği üzere iş güvenliği açısından boru desteğin kazı alanına düşmesi beklenmedik problemler yaratabilmektedir. Ayrıca kazai durumda boru desteğin hızlı bir şekilde tahliye edilip yerine yenisinin yerleştirilmesi de kazı güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple kazai durumda en azından boru desteklerin kazı alanına düşmesinin önlenmesi gerekmektedir.

Boru destekler yerleştirildikten sonra boru desteklerde meydana gelmesi beklenen eksenel kuvvet değerlerine ulaşılması belli bir zaman almaktadır. Kazı neticesinde kazıklarda veya diyafram duvarlarda meydana gelecek olan deplasmanlar neticesinde sistem kilitlenecek ve boru destekler oluşması beklenen maksimum eksenel yük değerine ulaşacaklardır. Boru desteklere etkiyen eksenel yükler beklenmedik bir çarpma neticesinde boru desteğin düşmesini zorlaştırmaktadır. Ancak ilk etapta boru destekler henüz beklenen eksenel yük değerlerine maruz kalmamış iken meydana gelebilecek bir kazai durumda boru destekler kolaylıkla stabilitesini kaybedilmektedir. Benzer şekilde plan düzleminde boru destek yerleşimi esnasında oluşan kayıklıklar da kazai durumda kesit kaybına sebebiyet verebilmektedir (Şekil 9 ve 10).

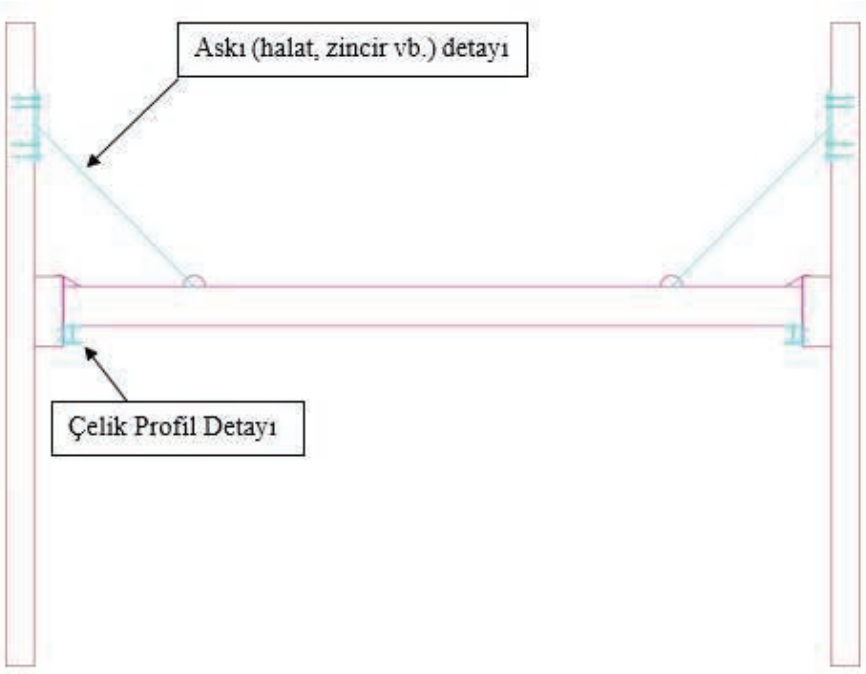


Şekil 9. Hatalı strut yerleşimi (Kesit)



Şekil 10. Hatalı strut yerleşimi (Plan)

Yapılan analizler neticesinde boru desteğe herhangi bir cisim çarpması durumunda boru desteğin kazı alanına düşmemesi için bir detay geliştirilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Planlanan birleşim detayı

Şekil 11'de tarif edildiği üzere boru desteklerin bir askı detayı tertip edilerek kazai durumda kazı alanına düşmesinin engellenebileceği öngörülmektedir. Benzer şekilde göğüsleme veya kuşak kirişlerine paralel, boru desteklerin altına yerleştirilecek konstüriktif bir çelik profil detayı sayesinde kazaların ve oluşabilecek hasarların önüne geçebileceği tahmin edilmektedir. İlgili birleşim detayına ve askı detayına ait örnek hesap tahkikleri Şekil 12'de belirtildiği gibidir. Birleşim detaylarında meydana gelebilecek herhangi bir hasar durumunda askı detaylarında meydana gelmesi beklenen iç kuvvetler Şekil 13'de görüldüğü gibidir.

1. GENEL ŞARTLAR

Vincin Özellikleri

Vinç tipi (Model)	**LIEBHERR LTM1200**	Vincin kapasitesi	**200 Ton**
Vincin azami çapı	**66 Metre**	Güvenli çalışma yükü	**1,4 Ton**
Bom uzunlukları	**72 Metre**	Kurulum Yeri	**S18 – SARIGAZI IST.**

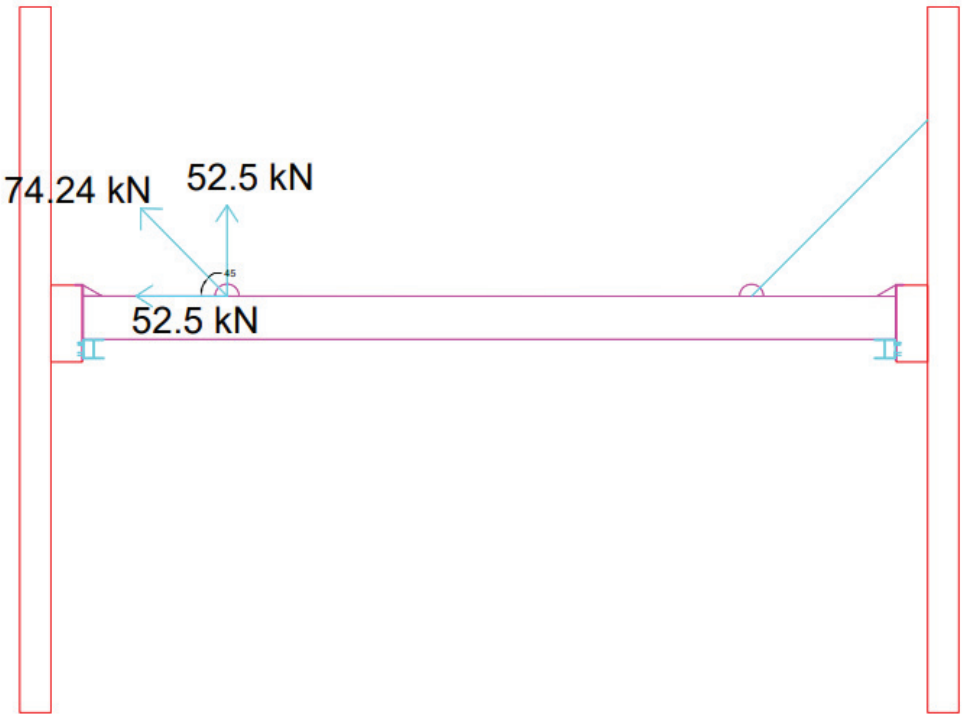
Yükün Özellikleri

Yükün ağırlığı Max.	**10,5 Ton**	Yükün ağırlık merkezi	-
Yükün niteliği	**Strut (Çelik boru)**	Yükün bağlantı noktaları	-

Diğer Şartlar

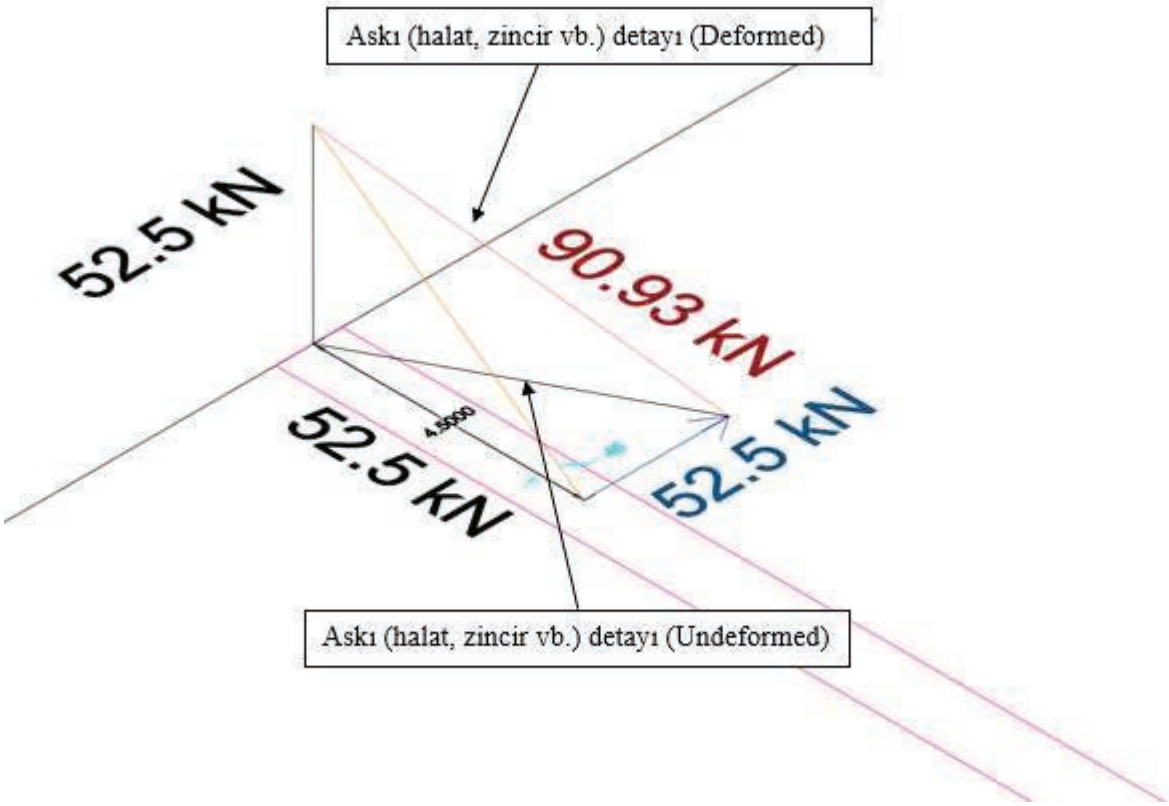
Zemin koşulları	**UYGUN**	Hava koşulları	**UYGUN**
Havai enerji hatları	**UYGUN**	Diğer yapılar	-
Rüzgâr hızı		İletişim metodu	-

Şekil 12. Strut kaldırma planı föyü



Şekil 13. Oluşan iç kuvvetlere ait şematik gösterim

Askı detayının bağlandığı noktaya plan düzleminde etkiyebilecek ikincil etkiler göz önünde bulundurularak yapılan analizler neticesinde 52.5 kN' luk tekil bir yük etkidiği takdirde askı elemanında oluşacak olan çekme reaksiyonu 90.93 kN olarak hesaplanmıştır (Şekil 14).



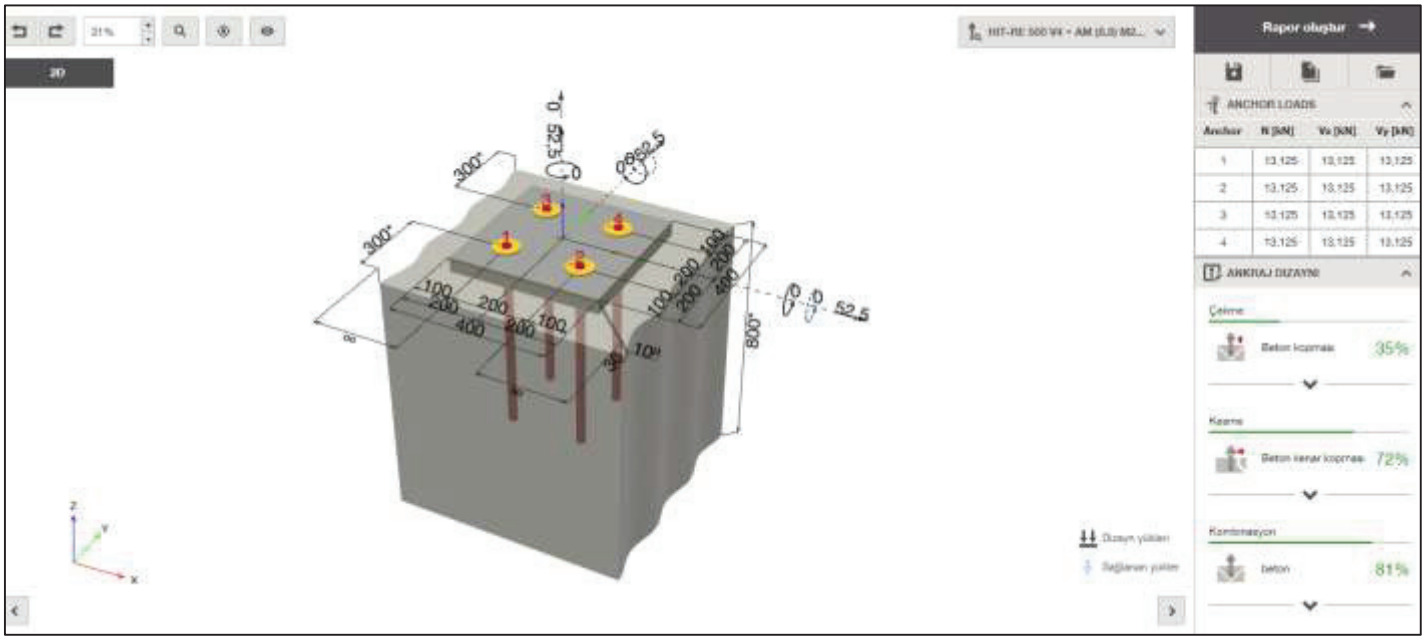
Şekil 14. Oluşan iç kuvvetlere ait şematik gösterim (3D)

Hesaplanan iç kuvvetleri güvenle karşılayabilmek için seçilecek olan askı detayı ise Çizelge 2'ye göre belirlenmiştir. Anma çapı 20 mm olan Grade 80 (G80) zincir kullanıldığı takdirde oluşan çekme reaksiyonlarının güvenle karşılanabildiği görülmektedir.

Çizelge 2. Grade 80 (G80) zincir çekme kapasiteleri

CHAIN DIA.	SINGLE LEG SLINGS			SLINGS OF 2, 3 OR 4 LEGS						ENDLESS SLINGS			
				STRAIGHT SLING			REEVED SLING			BASKET SLING			
mm	STRAIGHT SLING	ADJUST-ABLE SLING without deration*	REEVED SLING	60°	90°	120°	60°	90°	120°	60°	90°	120°	REEVED SLING
MAXIMUM WORKING LOAD LIMITS IN TONNES OF 1000kg													
6	1.1	1.1	0.8	1.9	1.6	1.1	1.5	1.2	0.8	1.5	1.2	0.8	1.7
7	1.5	1.5	1.1	2.6	2.1	1.5	2.0	1.6	1.1	2.0	1.6	1.1	2.3
8	2.0	2.0	1.5	3.5	2.8	2.0	2.6	2.1	1.5	2.6	2.1	1.5	3.0
10	3.2	3.2	2.4	5.5	4.5	3.2	4.1	3.4	2.4	4.1	3.4	2.4	4.8
13	5.3	5.3	4.0	9.2	7.5	5.3	6.9	5.6	4.0	6.9	5.6	4.0	8.0
16	8.0	8.0	6.0	13.8	11.3	8.0	10.4	8.5	6.0	10.4	8.5	6.0	12.0
20	12.5	12.5	9.4	21.6	17.6	12.5	16.3	13.3	9.4	16.3	13.3	9.4	18.8
22	15.0	15.0	11.3	26.0	21.2	15.0	19.5	15.9	11.3	19.5	15.9	11.3	22.5
26	21.2	21.2	15.9	36.7	29.9	21.2	27.6	22.5	15.9	27.6	22.5	15.9	31.8
32	31.5	31.5	23.6	54.5	44.4	31.5	41.0	33.4	23.6	41.0	33.4	23.6	47.3

Hesaplanan iç kuvvetler kullanılarak yapılan analizler neticesinde 80 cm'lik bir diyafram duvara veya kazığa ankre edilen M24'lük bulonlara ait hesap detayları Şekil 15'de göstetilmiştir.



Şekil 15.Kimyasal ankraj detayı

Epoksi malzemesi için 48 cm gömü derinliği hesaplanmış olup bahsedilen ankraj detayı kazığın çapına, beton kalitesine, kullanılacak olan epoksi ve bulon malzemesinin kalitesine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Seçilecek uygulama detayları etkiyen yükler saptanarak uygulamaya esas hesaplar yapılmalıdır.

Bahsedilen askı detayının imal edilemediği durumlarda ise boru destek detayının altına yerleştirilmesi planlanan konstrüktif çelik profillerin kazai durumlarda çalışacak şekilde boyutlandırılması gerekmektedir.

3 SONUÇ VE ÖNERİLER

İlgili metinde bahsedilen hesaplar ve detayların tümü örnek teşkil edebilmesi için hazırlanmış olup proje özelinde değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca bahsedilen hesaplar yapılmış ve detaylar yerinde imal edilmiş olsa dahi iş sağlığı ve güvenliği açısından gerekli bütün önlemlerin alınması ve kazı alanında oluşabilecek bütün olumsuz durumların önüne geçilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra herhangi bir kazai durumda boru desteklerde oluşan hasarın boyutuna bakılmaksızın hızlıca değiştirilmesi ve yerine yenisinin takılması büyük önem arz etmektedir.

Konuyla alakalı olarak daha kapsamlı analiz sonuçları elde edilebilmesi için aletsel gözlem verilerinden faydalanılabilir. Kazai durum sonrası oluşan deplasman farklıkları belirlenerek SAP2000 hesap modeline etkitilebilir. Böylelikle göğüsleme kirişlerinde ve boru desteklerde oluşan gerçek iç kuvvet değerleri hesaplanabilir.

Bunun yanı sıra boru destek kaybını göz önünde bulunduracak şekilde hazırlanan 3D Plaxis analiz modelleri kullanılarak zamana bağlı deplasman ve iç kuvvet artışları değerlendirilebilir.

Bilindiği üzere iş kazalarının ne zaman ve ne şekilde gerçekleşeceği bilinememektedir. Hassasiyet gösterilmesi gereken konu iş güveliği ile alakalı gerekli bütün önlemlerin alınması ve özellikle de can kaybının önüne geçilebilmesidir.

TEŞEKKÜR

Tüm proje süreçlerinde emeği geçen İşveren İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Daire Başkanlığı Anadolu Raylı Sistemler Müdürlüğü'ne, Müşavir Firma Yüksel Proje A.Ş'ye Yüklenici Firma Doğuş İnşaat ve Tic. San. AŞ'ye olmak üzere projeye sağladıkları katkılar sebebi ile Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. Grubu çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Türkoğlu, A., Çevik, S., 2020. Abdurrahmangazi İstasyonu Geçici Kazı Destek Sistemi 1-E, A-J, H-J ve E-F Cepheleri Geoteknik Hesap Raporu, Doğuş Yapı Merkezi Özaltın Adı Ortaklığı, İstanbul.

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTH 2018)

Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS500)

Kumanda Merkezlerinde Mimari Akustik Tasarım Gereksinimleri ve Bir Örnek Çalışma

Architectural Acoustic Design Requirements in Control Centers and a Case Study

T. Darendelioğlu
EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik Hizmetleri A.Ş., İstanbul

Y. Çelik, O. Esen
İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Raylı Sistem Dairesi Başkanlığı, Avrupa Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü, İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada, metro yapılarının tasarım aşamasında akustik konfor sağlayan optimum bina kabuğunu tahmin etmek için BIM entegre tasarım süreci açıklanmaktır. Bunun için farklı ses yutuculuk katsayılarına sahip malzeme ile alternatif modeller oluşturularak, yapı kabuğunun akustik performans üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Bu senaryolar Revit ve ODEON yazılımları aracılığıyla modellenmiş ve simüle edilmiştir. Hacim akustiği parametreleri, mekanda gerçekleşen işlevler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular uluslararası standartlara ve kabullere göre belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma erken tasarım aşamasında proje gereksinimlerini ortaya koyması bakımından BIM yazılımlarının kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır.

ABSTRACT: In this study, the BIM integrated design process is explained to predict the optimum building envelope that provides acoustic comfort during the design phase of metro structures. For this, the effect of the building envelope on the acoustic performance has been examined by creating alternative models with materials with different sound absorption coefficients. These scenarios were modeled and simulated through Revit and ODEON software. The volume acoustic parameters were evaluated in line with the functions realized in the space. The findings were compared with the limit values determined according to international standards and acceptances. This study reveals the importance of using BIM software in terms of revealing the project requirements at the early design stage.

1 GİRİŞ

Çağımız kent yaşamında zamanımızın büyük bir bölümünü kapalı mekanlarda geçirmekteyiz. Kapalı mekanlarda kullanıcıların sağlıklı ve konforlu bir yaşam sürebilmeleri için bu mekanların fiziksel iç ortam koşullarının kullanıcı sağlığını olumsuz etkilememesi ve kullanıcıların performansını iyileştirmesi gerekmektedir. Özellikle günümüzde metro yapıları, yüksek katlı yapılar, kongre merkezleri vb. gibi kapalı mekanların birden çok işleve sahip olması her işlev için farklı iç ortam koşulları ortaya konulmasını gerekli kılmaktadır. Kapalı mekanlarda uygun iç ortam koşullarının sağlanması mekanların işlevsel ve sağlıklı kullanımı bakımından önem arz etmektedir.

Metrolar mimari, yapısal, elektromekanik sistemlerden oluşan ve istasyon, hat, jeneratör ve bakım ile ilgili yapılardan multidisipliner yapı gruplarıdır. Metro yapı sistemleri içerisinde uzaktan haberleşme amaçlı kullanılan kumanda merkezleri metro işletmesinin otomasyon sistemleri için kritik bir önem arz etmektedir.

Kumanda merkezleri, metro istasyonlarının otomatik olarak izlenmesi, denetlenmesi ve kontrol edilmesi amacıyla izleme, kontrol ve haberleşme amaçlı kullanılan hacimlerdir. Sistemin etkin bir şekilde işletilebilmesi için, sistemle ilgili alarm sinyallerinin operatörlere görsel ve işitsel olarak en verimli şekilde aktarılması gerekmektedir.

Kumanda merkezleri, alarm sinyallerinin duyulabilirliğinin ve konuşma anlaşılabilirliğinin önemli bir gereklilik olduğu mekanlardır. Gerekli akustik düzenlemelerin yapılması hayati önem arz etmektedir. Bu çalışmada kumanda merkezleri için akustik tasarım yaklaşımı değerlendirilecektir.

Mimarlık alanında akustik konfor ile ilgili sorunlar iki ana konuda ele alınabilir. Bunlardan ilki hacim akustiği, diğeri yapı akustiğidir. Bu çalışmada hacim akustiği değerlendirilmiştir.

Hacim akustiği; hacmin boyutlarının, geometrik şeklinin ve hacmin akustik planlama açısından her tür kaplama ve altlıklarının seçimine dayanan bir tasarım konusudur.

Fiziksel bir iç ortamın akustik performansı genellikle birkaç gösterge ile değerlendirilir. Ana göstergeler arasında reverbasyon süresi, erken düşme süresi, netlik, konuşmanın anlaşılabilirliği ve arka plan gürültü düzeyi yer alır. Bu çalışma; reverbasyon süresi (RT) ve sesin anlaşılabilirlik indexi (STI)ile sınırlandırılmıştır. Reverbasyon süresi ve sesin anlaşılabilirlik indexi akustik performansı belirlemede en önemli unsurlardır.

- *Reverbasyon Süresi (RT);* kapalı bir hacimde sesin birbirini takip eden yansımalar sonucunda 60dB enerji kaybetmesi için geçen süre olarak adlandırılmaktadır. Hacmin büyüklüğü ve hacimdeki yüzey kaplama malzemeleri, reverbasyon süresini etkilemektedir. Reverbasyon süresinin uzun olması konuşmanın anlaşılabilirliğini azaltırken, arka plan gürültü düzeyini artırmaktadır (IEC, 2011).
- *Sesin Anlaşılabilirlik İndexi (STI);* ses kaynağının içinde bulunduğu hacmin yanıtından ölçülmekte ve aynı zamanda erken enerji oranı olarak da ifade edilmektedir (Bradley, 2009).

Bir mekanın akustik düzenlemesinin yapılmasında akustik parameter değerlerinin bilinmesi çok önemli olduğu için, mekandaki yüzeylerin ne kadarının ne derecede emici olacağının tasarım aşamasında bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada Autodesk Revit LT 2023 ve ODEON 12.17 Combined yazılımları bir arada kullanılarak kumanda merkezinin akustik tasarım gereksinimlerine göre yapı kabuğu özellikleri ön tasarım aşamasında tahmin edilmeye çalışılmıştır.

2 YÖNTEM

Bu bildiride; metro yapılarının tasarım aşamasında akustik konfor sağlayan optimum bina kabuğunu tahmin etmek için temel tasarım süreci açıklanmaktır. Bu doğrultuda öncelikle, kumanda merkezlerinin akustik performans kriterleri belirlenmiştir. Daha sonra örneklem olarak seçilen hacmin akustiği üç farklı senaryoya göre kabuk özellikleri açıklanmıştır. Bu kabuller doğrultusunda 3 farklı senaryoya ait model simüle edilmiştir. Hacim akustiği parametreleri, mekanda gerçekleşen işlevler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular uluslararası standartlara ve kabullere göre belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır.

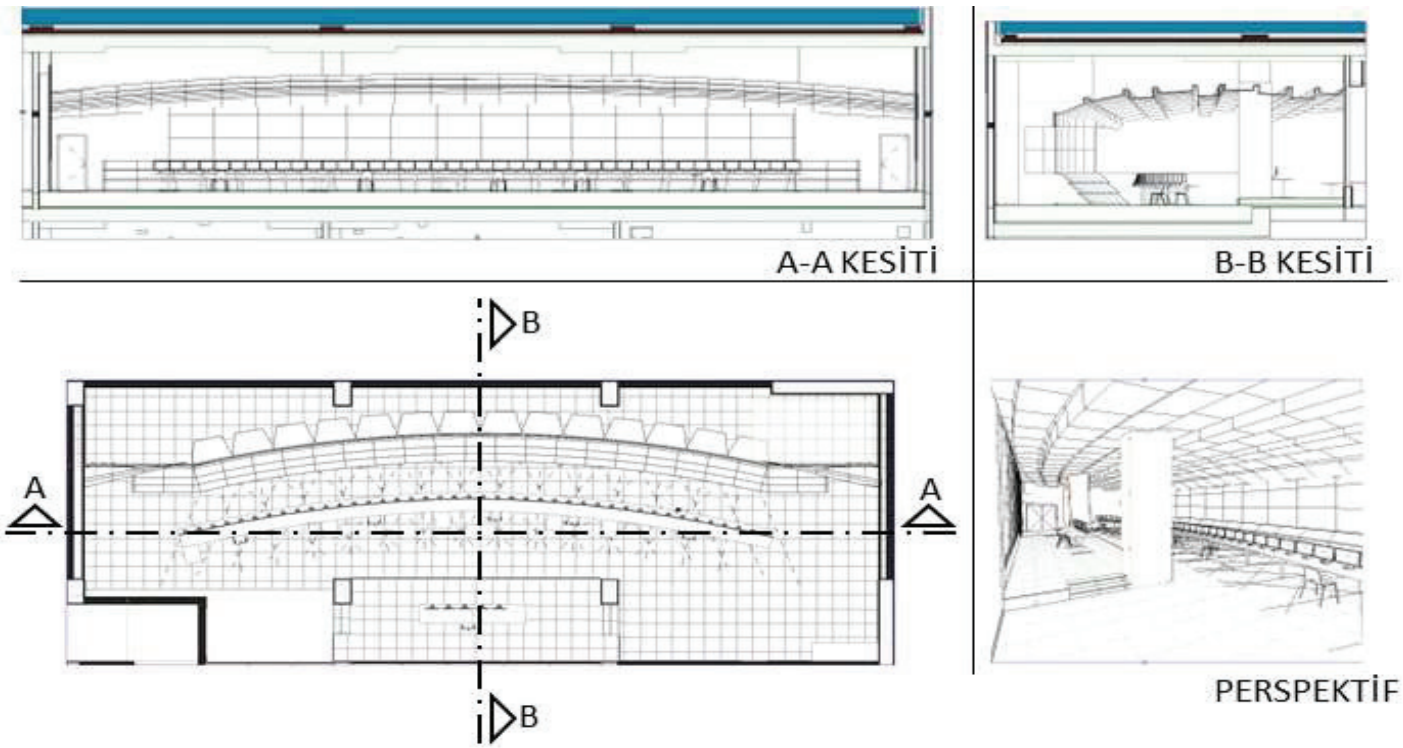
3 DEPO SAHASI KUMANDA MERKEZİNİN AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, akustik performansı etkileyen yapı kabuğu özelliklerinin değişiminin etkilerini karşılaştırmak için bir vaka çalışması önerilmiştir.

Örnek model, metro sistemleri içinde bulunan ve akustik performansı kritik bir önem arz eden "Kumanda Merkezi" mekanıdır. Bina tasarımı, iç ortam koşulları ve gürültü kaynaklarının yeri ve şiddeti akustik analiz sonuçlarını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Bina tasarımına ilişkin veriler ile binaya ait kesit verileri sırası ile Çizelge 1 ve Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Proje bilgileri

Proje Bilgileri: Kabataş Mecidiyeköy Mahmutbey Metro Projesi					
Bina İşlevi	:	İdare	Mahal İşlevi	:	Haberleşme
Yapım Yılı	:	2020	Kullanım Durumu	:	Kullanımda
Konumu	:	İstanbul	Taban Alanı (m²)	:	250,32
Durumu	:	Mevcut			
Kat Adedi	:	B+2	Hacmi (m³)	:	1406,44
Taşıyıcı Sistemi	:	Betonarme			

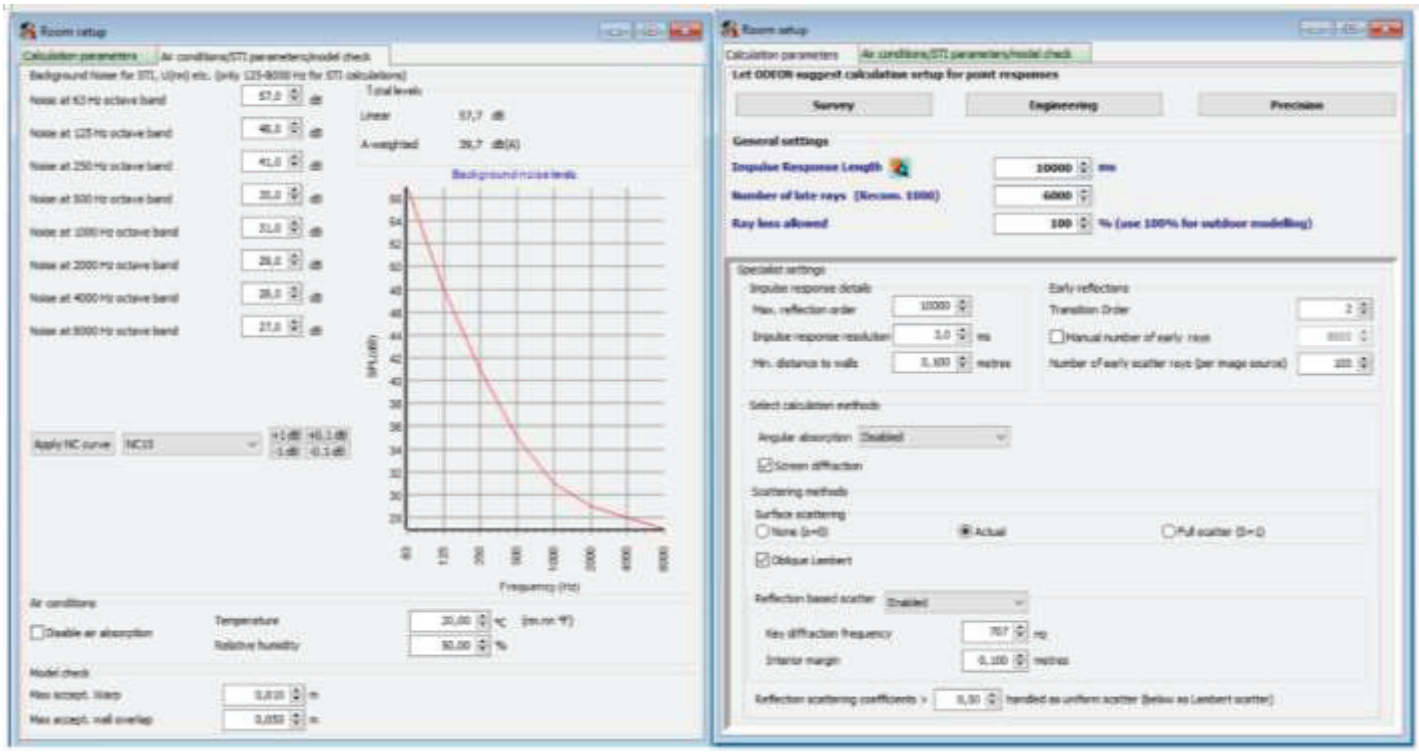


Şekil 1. Bina tasarımına ait kesit verileri

Simüle edilecek modeller için bir ışının maximum reverbasyon süresi 1000 ms, maximum yansıma sayısı 6000, ses kaynaklarının yansıma derecesi %100, arka plan gürültü seviyesi 39,7 dB, ortam sıcaklığı 200°C ve nem oranı %50 olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

Simülasyonlarda 1 adet ses kaynağı ile 3 adet alıcı olduğu varsayılmıştır. Ses kaynağı ile alıcıların konumu, koordinatları ve farklı frekanslardaki ses gücü seviyeleri Çizelge 2'de, konumları ise Şekil 3'te verilmiştir.

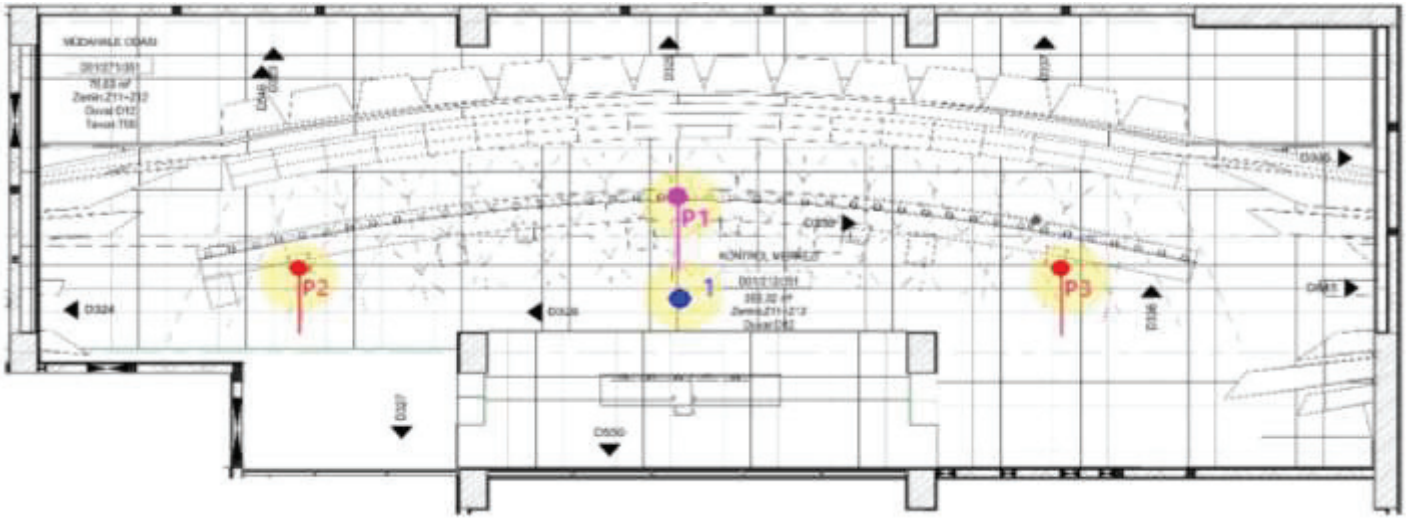
Kabuk özelliklerinin hacim akustiğine etkisinin incelendiği bu çalışmada döşeme ve tavan kaplamaları sabit tutulmuştur. 3 farklı senaryo için yüzey kaplama kabullerine ait malzemeler ve bunların akustik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Hesaplama parametreleri ve iç ortam kabulleri

Çizelge 2. Ses kaynağı, alıcı konumları ve koordinatlar ile ilgili veriler

Ses Kaynağı	Konumu (x, y, z)	Oktav Bant Merkez Frekansı (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
P1	8,20; 0,00; 1,00	55	65,3	69	63	55,8	49,8
P2	9,00; -4,00; 1,00	63	72,1	79,6	80,2	72,9	65,9
P3	9,00; -4,00; 1,00	63	72,1	79,6	80,2	72,9	65,9
Alıcı	9,40; 0,00; 1,00						



Şekil 3. Ses kaynağı ve alıcı konumları.

Çizelge 3. Yüzey kaplama malzemeleri ve malzemelerin akustik özellikleri

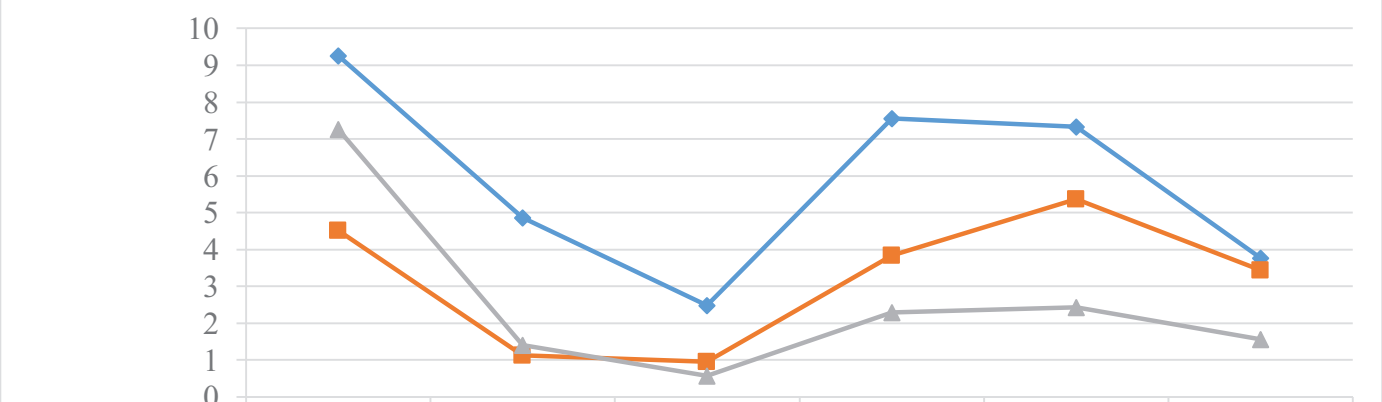
	Saçıcılık						
	Malzeme Adı						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Zemin	0,1	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	PVC Yükseltilmiş Döşeme
Duvar	**0,09**	**0,72**	**0,3**	**0,12**	**0,06**	**0,05**	**Çift yüz çift kat taş yünü dolgulu (30 mm) beton panel**
Tavan	0,05	0,03	0,009	0,002	0,005	0,008	Alüminyum Kompozit Kaplama
Doğrama	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,02	Metal Kapı
Cam	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	Cam
Zemin	0,1	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	PVC Yükseltilmiş Döşeme
Duvar	**0,03**	**0,46**	**0,87**	**0,7**	**0,54**	**0,42**	**Çift yüz çift kat taş yünü dolgulu (60 mm) beton panel**
Tavan	0,05	0,03	0,009	0,002	0,005	0,008	Alüminyum Kompozit Kaplama
Doğrama	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,02	Metal Kapı
Cam	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	Cam
Zemin	0,1	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	PVC Yükseltilmiş Döşeme
Duvar	**0,03**	**0,33**	**0,73**	**0,89**	**0,85**	**0,77**	**Çift yüz çift kat taş yünü dolgulu (100 mm) beton panel**
Tavan	0,05	0,03	0,009	0,002	0,005	0,008	Alüminyum Kompozit Kaplama
Doğrama	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,02	Metal Kapı
Cam	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	Cam

4 BULGULAR

Kabataş Mecidiyeköy Mahmutbey Metrosu Depo Sahası Kumanda Merkezi konuşma ve haberleşme eylemi için hacim akustik parametrelerinden hacim içi reverbasyon süresi ve STI değerleri ele alınmış, karşılaştırılmış ve kaplama özelliklerinin akustik performansa etkileri üzerinde durulmuştur. Farklı ses yutuculuk katsayılarına sahip malzeme ile alternatif modeller oluşturularak, yapı kabuğunun akustik performans üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

Çizelge 4'de farklı frekanslara göre senaryoların alıcı noktalarında farklı frekanslardaki reverbasyon süreleri görülmektedir.

Çizelge 4. Senaryoların farklı frekanslardaki reverbasyon süreleri



	125	250	500	1000	2000	4000
Senaryo 1	9.26	4.87	2.48	7.55	7.33	3.77
Senaryo 2	4.52	1.12	0.95	3.83	5.36	3.44
Senaryo 3	7.27	1.41	0.56	2.29	2.42	1.56

Reverbasyon; ardışık yansımalar yolu ile ses enerjisinin sürdürülmesidir. Ardışık yansımaların her birinde ses enerjisinin bir kısmı yutulur, bu ses basınç düzeyi işitilmezliğe ulaşana kadar sürer. Reverbasyon süresine hacim, yüzeyler, insanlar ve döşemenin yutuculuğu etki eder (Yılmaz, 2007). Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi Yönetimi Yönetmeliğine göre Metro İşletmesi altındaki alanlarda 500 Hz'de maksimum çınlama süresi proje hedef değeri 1.4, Kabul değeri olarak 1.6 saniye olarak belirlenmiştir. Değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.

500 Hz'deki çınlama sürelerine bakıldığında Senaryo 1'de görülen 2,48 sn hedef değerin oldukça üzerindedir. Bu değer yapı kabuğu içerisindeki 30 mm kalınlığında kullanılan taş yününün optimum akustik konfor koşullarını sağlamada yetersiz olduğunu göstermektedir. 500 Hz için Senaryo 2 ve senaryo 3'de ölçülen değerler ise sırasıyla 0,95 ve 0,56'dır. Senaryo 2 ve 3'de belirlenen sürelerin hedef değeri sağladığı görülmektedir. Bu durum ise yapı kabuğu içerisindeki 60 mm ve 100mm kalınlıklarında kullanılan taş yününün optimum akustik konfor koşullarını sağlamada yeterli olduğunu göstermektedir. Yapı kabuğunun yalıtım kalınlığının arttırılması reverbasyon süresini olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Ayrıca salon geometrisi ile birlikte alıcı konumu değerlendirildiğinde alıcı ve ses kaynaklarının ön duvara yakın olduğu bu yüzden yansımayı erken alacağı zaten beklenen bir durumdur.

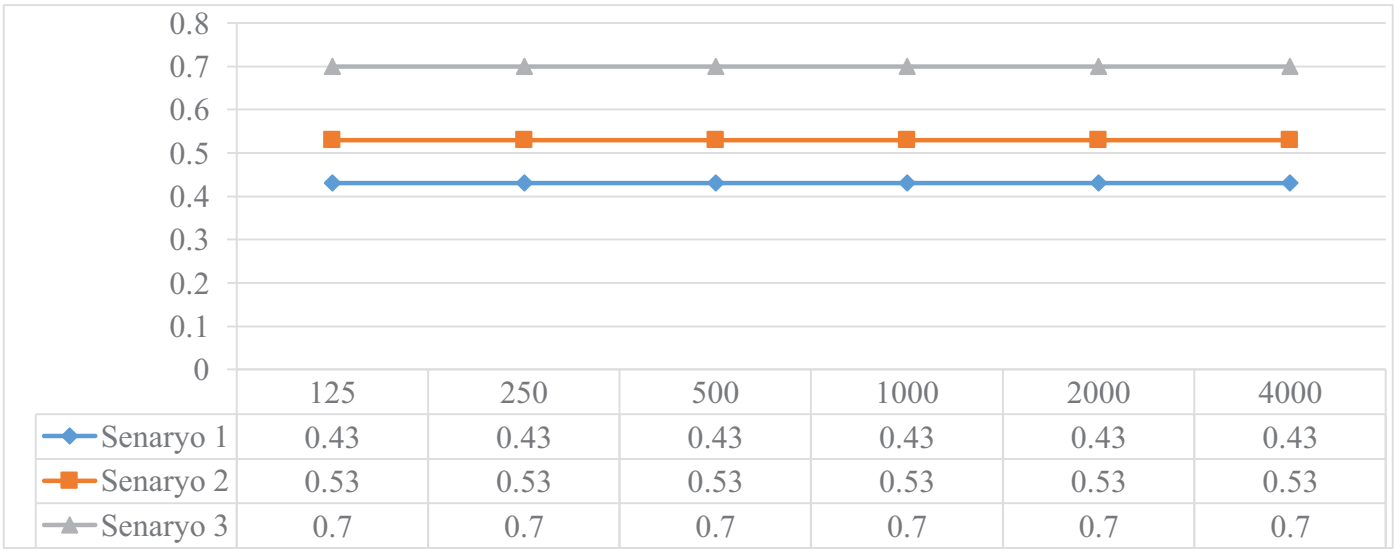
Sesin anlaşılabilirliği dizini (STI), anons sistemleri bünyesinde kullanılan hoparlörlerin yerleşimi, ses gücü ve ses yayma özellikleri de dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler arka plan gürültüsünün 39,7 dBA düzeyinde olduğu kabul edilerek yapılmıştır. Literatür araştırmalarına göre STI değeri için kabul değer aralıkları Çizelge 5'e göre değerlendirilmiştir (IEC, 2011). Anons sisteminin anlaşılabilirliği için yapılan simülasyona göre sonuç değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Uluslararası kabullere göre konuşma anlaşılabilirlik indeksleri kabul değerleri (IEC,2011)

Değer	0-0.3	0.3-0.45	0.45-0.60	0.60-0.75	0.75-1
STI	Anlaşılmaz	Zayıf	Orta	İyi	Çok iyi

Konuşma anlaşılırlığı (STI) 500 Hz'deki sonuç değerlere göre incelendiğinde; yapı kabuğunda 30 mm kalınlığında akustik yalıtım malzemesi kullanıldığında zayıf seviyede, 60 mm kalınlığında akustik yalıtım malzemesi kullanıldığında orta seviyede, 100 mm kalınlığında akustik yalıtım malzemesi kullanıldığında iyi seviyede olduğu söylenebilir. Simülasyon sonuçlarına göre yalıtım değerinin artması konuşma anlaşılabilirlik indeksini de olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır (Çizelge 6).

Çizelge 6. Senaryoların farklı frekanslardaki konuşma anlaşılabilirlik indeksleri (STI)



	125	250	500	1000	2000	4000
Senaryo 1	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
Senaryo 2	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
Senaryo 3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

5 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Kumanda merkezleri metro sistemleri içerisinde kontrol ve otomasyon sistemlerinin yürütüldüğü yer olması bakımından kritik önem arz etmektedir. Çeşitli tasarım ölçütleri ve analizler aracılığıyla uygun iç ortam koşullarının tasarım aşamasında belirlenmesi proje ve yapım verimliliği açısından önemlidir. metro sistemlerinindeki kontrol ve otomasyon işlevlerinin aksamaması için kumanda merkezlerinin uygun akustik iç ortamın sağlanması gerekmektedir.

Yapı kabuğu seçiminin akustik iç ortam koşullarına etkisi irdelenmiştir. Bunun için farklı ses yutuculuk katsayılarına sahip malzeme ile alternatif modeller oluşturularak, yapı kabuğunun akustik performans üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Bu senaryolar Revit ve ODEON yazılımları aracılığıyla modellenmiş ve simüle edilmiştir. Sonuç değerler ulusal ve uluslararası standart ve yönetmeliklerde belirlenen Kabul değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu değerler konuşma ve haberleşme eylemi için hacim akustik parametrelerinden hacim içi reverbasyon süresi ve konuşma anlaşılabilirlik indeksi ölçütlerine göre değerlendirilmiştir.

Sonuçta; yapı kabuğundaki yalıtım değeri artışının STI değeri ve reverbasyon süresini olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Senaryo 2 ve Senaryo 3'de reverbasyon süreleri hedef değeri sağlarken, STI değerinin ise sırasıyla orta ve iyi seviyede çıkmasının hacmin geometrisinden ve alıcı konumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışma erken tasarım aşamasında proje gereksinimlerini ortaya koyması bakımından BIM yazılımlarının kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

A. B. Mclaren, J. Kirke, H.L., Howe, (1934). Acoustics of Cardiff Studios," BBC Res. Dep. Rep. NoB.005/2.

Aknesil, A, E. (2001) "Salonlarda Akustik Tasarım", Brt Reklam Yayını, Ev ve Kültür Sanat Dergisi, 6.

Bradley J.S., Reich R., Norcross S.G. (1999), On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility, Journal of the Acoustical Society of America.

Cury, I., "Directing and Producing for Television 4th ed.", Elsevier Inc., USA, 17-18 (2011).

Demirkale, S.Y., "Çevre ve Yapı Akustiği", Birsen Yayınevi, İstanbul, 215-226, 287-288, 474-477 (2007).

IEC 60268-16 Edition 4.0 (2011), Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.

ISO 3382 (2003), Acoustics. Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.

J. Howe, A.B., McLaren, "Acoustics of The Manchester Studios," BBC Res. Dep. Rep. NoB.011, 1935.

T. Somerville, "Acoustics in The B.B.C.," BBC Res. Dep. Rep. NoB.068, vol. 15,6.

Utterback, A. H., (2007). "Studio-based television production and directing", Elsevier Inc., USA, 4.

TS EN 12354-1,2,3, (2006). Yapı Akustiği - Yapıların Akustik Performansının, Elemanların Performanslarından Hesaplanması - Bölüm 1: Odalar Arasında Hava ile Yayılan Sesin Yalıtımı, Bölüm 2: Odalar Arasında Darbe Sesinin Yalıtımı, Bölüm 3: Hava ile Yayılan Dışarıdaki Sesin Yalıtımı, TSE, I. Baskı, Ankara

Edebiyat ve Sanatta Tüneller ve Tünelcilik
Tunnels and Tunnelling in Literature and Arts

H. Gerçek, T. Ünlü
ZBEÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Emekli Öğretim Üyeleri

ÖZET: Tüneller ve tünelciliğin, bilimsel ve teknik yönleriyle ilgili araştırmalar ile uygulamaların uzun yıllardır başarıyla sürdürüldüğü iyi bilinmektedir. Bu kavramların, mühendislerce fazla bilinmeyen yönleri edebiyat ve sanat ile ilgilidir. Tüneller ve tünelciliğin, edebiyat ve sanattaki örnekleri, bu bildirinin konusunu oluşturmaktadır. Öncelikle, "tünel" sözcüğünün kökenleri üzerinde durulmuş; bu sözcüğün yer aldığı deyimler, deyişler ve güzel sözlerden örnekler verilmiştir. Sonra, konuyla ilgili klasik ve modern edebiyat eserlerine değinilmiş; yazarların, okuyucuların bu kavramlar ile ilgili hayal gücünü geliştirmesine örnekler verilmiştir. Daha sonra, resim ve sinema gibi görsel sanatlardaki tüneller ve tünelcilikle ilgili bazı örnekler sunulmuştur. Son olarak da, müzik sanatında bu kavramlara değinen bazı örneklere yer verilmiştir.

ABSTRACT: It has been well known that the research and applications on the scientific and technical aspects of tunnels and tunnelling have been successfully carried out for years. The lesser-known aspects of these concepts by the engineers are related to the literature and arts. The examples of tunnels and tunnelling in literature and arts are the subject of this paper. First of all, the origins of the word "tunnel" are considered; and the examples are given for idioms, expressions, and words of wisdom which involve this term. Then, classical and modern works of literature related to the subject are mentioned; examples are given for the stimulation of imagination of readers on these concepts by the authors. Later, some visual art examples from paintings and movies on tunnels and tunnelling are presented. Finally, some musical-art examples which involve these concepts are included.

1 GİRİŞ

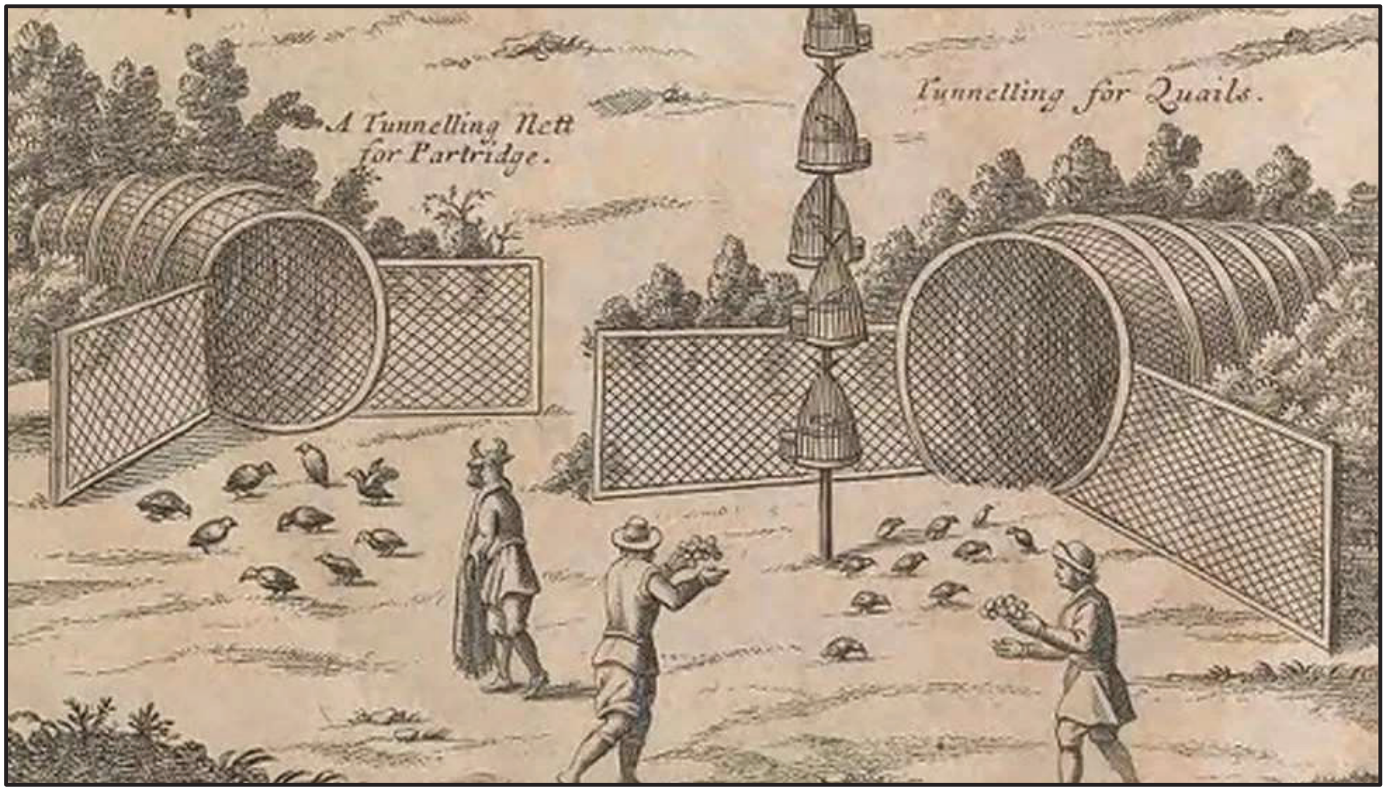
Tüneller ve tünelcilik konusunda çalışan inşaat, maden, jeoloji vb. mühendislik dallarındaki araştırmacılar ile uygulayıcılar, genellikle konunun bilimsel ve teknik yönleri ile ilgilenmektedirler. Bu kavramların; günlük hayatımızda kullandığımız veya karşılaştığımız terimlerde yer alması, çok sayıdaki edebiyat ve sanat eserlerinde işlenmesi, ilginç olduğu kadar eğlenceli bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bildiri kapsamında incelenen bu konu; bir kısmını iyi bildiğimiz, bazılarını yalnızca duyduğumuz ve birçoğunu da ilk defa göreceğimiz örnekler ile işlenmeye çalışılmıştır. Derleme niteliğindeki bu çalışmada; sayı ve çeşit açısından birçok örneği olan konuda, bildiri kısıtlmaları nedeniyle, yalnızca kaynak açısından kolayca ulaşılabilir olanların seçildiğini belirtmekte yarar vardır.

2 SÖZCÜK KÖKENİ

Türk Dil Kurumu'na (TDK) göre; "tünel: 1. bir yandan öbür yana geçebilmek için yer altında açılan yol, 2. çevresi kapalı yol, 3. İstanbul'daki aynı adlı bir yer" olarak tanımlanmaktadır (TDK, 2007).

"Tünel" sözcüğünün önce Fransa'dan İngiltere'ye gittikten sonra da geri dönüş yaptığını belirtmekte yarar vardır (BBC, 2015). Oxford İngilizce Sözlüğü, "tünel"in 15. Yüzyıl'daki ilk tanımını: "keklikleri yakalamak için kullanılan bir ağ" olarak yapmaktadır (Şek. 1). Ancak, "tünel" sözcüğünün boru (örneğin, baca veya huni) şeklindeki yapılar için birçok eski kullanımı da vardı. Sözcüğün, en azından 12. yüzyıldan beri Fransızcada "varil" anlamına gelen "*tonneau* (eskiden *tonel*)" teriminden gelmiş olması nedeniyle bu olgu şaşırtıcı değildir (BBC, 2015). İstanbul'da, Karaköy ile Beyoğlu arasında inşa edilen ve 1875'te açılan yeraltı füniküler (halat çekmeli vagon) hattına, İngilizcesi yerine Fransızca'daki söylenişi taklit edilerek "Tünel" adı verilmesi de ilginçtir (BBC, 2015).



Şekil 1. Keklikleri (solda) ve bıldırcınları (sağda) yakalamak için kullan ve "tünel" adı verilen tüp şekilli ağları gösteren 1678 tarihli bir gravür (BBC, 2015)

"Tünel" sözcüğünün yer aldığı deyimler ve deyişler günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin; "tünel geçmek" sözü, TDK tarafından "aklını yaptığı işe vermemek" şeklinde bir argo deyimi olarak tanımlanmaktadır (TDK, 2011).

Sinir sıkışmalarıyla ilgili "tünel sendromları (eldeki karpal, dirsekteki radyal ve ayaktaki tarsal)" ile görme veya psikolojik sorunlarla ilgili "tünel görüşü (*tunnel vision*)" terimleri, tıp alanında kullanılan ilginç örneklerdir.

Bilim kurgu kökenli "zaman tüneli (*time tunnel*)" kavramı, zaman içinde geleceğe veya geçmişe yolculuk yapmaya olanak sağlayan geçiş yolunu tanımlamaktadır (Wiktionary, 2022). Fizik kökenli "kuantum tünelleme (*quantum tunnelling*)" ise bilimsel bir kavram olup; bir dalga işlevinin, bir enerji engelinin içinden ilerlemesine olanak veren kuantum mekaniksel bir olguyu tanımlamaktadır (Wikipedia, 2022).

Bazı lunaparklarda bulunan "korku tüneli (*horror/terror tunnel*)" ise, genellikle raylı bir sitem üzerinde ilerleyen araca binen sürücülerin karanlıkta seyahat ettikleri; görüntü, ses ve özel efektler içeren sahnelerle karşılaştığı kapalı bir eğlence yolculuğudur.

Stadyumlarda, iç mekandan sahaya doğru çıkışlarda sporcuların (örneğin, futbolcuların) ve görevlilerin (örneğin, hakemlerin) beklediği ve çıktığı, "sporcu çıkış tünelleri (*player exit tunnels*)" bu kanuda başka bir örnektir (Şek. 2a). Genellikle, su geçirmez ve dayanıklı malzemelerden üretilen, katlanabilir özellikleri sayesinde kolayca kurulup kaldırılabilen bu sistemlere, bazen ev sahibi takımın sloganları (örneğin; "Burası Kadıköy, Buradan Çıkış Yok!") da yazılmaktadır.

Son yıllarda kullanılmaya başlanan "tünel piercing (*tunnel piercing*)" terimi, kulak memesine delik delme ya da var olan deliği genişletme işlemini tanımlamaktadır (Şek. 2b). Tünel piercingler en çok kulak memesine yapılmakla birlikte; kulağın kıkırdak kısmına, dile, çeneye veya yanaklara da uygulanabilmektedir.

(a)

(b)

Şekil 2. Tünel sözcüğünün kullanıldığı bazı örnekler: (a) Sporcu çıkış tüneli (Delta, 2020), (b) Tünel piercing (TheYou, 2022)

Bu kapsamda, ayrıca, umudu simgeleyen "tünelin ucundaki ışık" ile ilgili güzel sözler de bulunmaktadır. Bu söz, "hayattaki her zor durumu aşmak zor olsa da, üzerinde çalışmaya devam edersek diğer taraftan daha güçlü çıkacağımızı anlatır. Bu umut ifadesi, 1882'den beri nesiller boyunca, birçok yazar tarafından zorlukları aşmak için, umut ve sabrın neden bu kadar önemli olduğunu ve neden denemekten asla vazgeçmememiz gerektiğini sembolize etmek için kullanılmıştır (TwitSözler, 2022)". Bu güzel söz ilgili bazı alıntılardan örnekler aşağıda sunulmuştur (TwitSözler, 2022):

- "Bazen hayat, sonunda ışık olmayan karanlık bir tünel gibi görünür, ancak ilerlemeye devam ederseniz, daha iyi bir yerde olacaksınız." - Jeffrey Fry (yazar, ABD)
- "Tünelin sonunda ışık mı var? Bizim bir tünelimiz bile yok; tünelin nerede olduğunu bile bilmiyoruz." - Lyndon B. Johnson (devlet başkanı, ABD)
- "Karamsarlara tünelin ucundaki ışık başka bir trendir." - Joan Rivers (komedyen, ABD)
- "Tünelin sonunda bir ışığın görünmesini beklemeyin, aşağıya inin ve o şeyi kendiniz aydınlatın." - Sara Henderson (yazar, Avustralya)
- "Her ışığın sonunda bir karanlık tünel vardır." - Anthony Liccione (şair ve yazar, ABD)
- "Tünelin ucundaki ışık sizin hayatınızdır, geçici olan tüneldir." - Michael Josephson (hukukçu, ABD)
- "Politikacılar, tünelin sonunda ışığı gördüklerinde çıkıp biraz daha tünel satın alan insanlardır." - John Quinton (pilot, İngiltere)

3 EDEBİYAT ÖRNEKLERİ

Olayların, düşünce, duygu ve hayallerin sözlü veya yazılı olarak biçimlendirilmesi sanatı olan edebiyatta, "tüneller ve tünelcilik" konusundaki eserlerin büyük bir çoğunluğu kurgusal özelliktedir. Macera, heyecan, gizem, korku, suç, polisiye, bilim kurgu, fantezi vb. türlerindeki roman ve hikayelerde; yazar, okuyucularda bazı duygu ve düşünceleri uyarmak için tünel ortamını kullanır. Okuyucuda; karanlık korkusu (niktofobi), kapalı alan korkusu (klostrofobi), yalnızlık, dış dünyadan yalıtılmışlık, gün ışığı veya gökyüzü özlemi gibi duygular ile kaygıları uyandıran bu özel gerilim ortamı, yazara çeşitli seçenekler sağlamaktadır.

Çok sayıda olduğu tahmin edilen, "tüneller ve tünelcilik" konusunu işleyen veya tünellerde geçen olayları anlatan edebiyat eserlerinden bir seçki Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Tüneller ve tünelcilik ile ilgili bazı edebiyat eserleri.

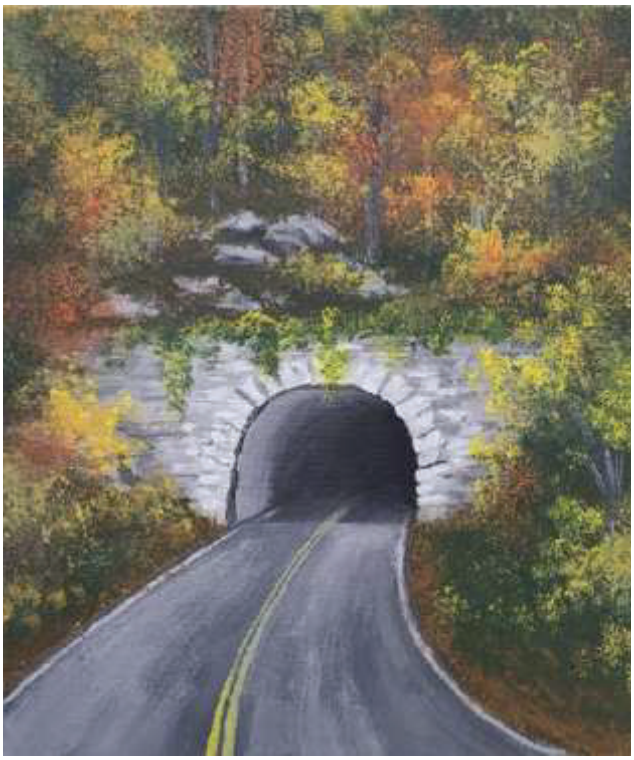
Adı, Yayın Yılı (*Özgün Adı*)	**Yazar(lar)ı**	**Türü**
İki Tünelin Hikayesi, 1897 (*A Tale of Two Tunnels*)	W. Clark Russell	Denizclik, aşk romanı
Tünel, 1913 (*Der Tunnel*)	Bernhard Kellermann	Teknik-ütopyacı roman
Kayıp Tünelin Sırrı, 1950 (*The Secret of the Lost Tunnel*)	Franklin W. Dixon	Ergen romanı (*Hardy Boys* Serisi)
Okyanus Derinliklerinden Geçen Tünel, 1972 (*Tunnel Through the Deeps*)	Harry Harrison	Alternatif tarih romanı
O, 1986 (*It*)	Stephen King	Korku, dehşet romanı
Kuşların Sarkısı, 1993 (*Birdsong*)	Sebastian Faulks	Savaş romanı, aile destanı
Metro 2033, 2001 *Metro 2034*, 2009 *Metro 2035*, 2019	Dmitry Glukhovsky	Bilim kurgu romanları
Tüneller (6'lı seri), 2007-20013 (*Tunnels*)	Roderick Gordon & Brian Williams	Fantezi romanları
Tüneller, 2007 (*The Tunnels*)	Michelle Gagnon	Cinayet, gizem, gerilim romanı
Tünel, 2008 (*The Tunnel*)	Anthony Browne	Resimli çocuk kitabı
Yeraltı Demiryolu, 2012 (*The Subterranean Railway*)	Cristian Wolmar	Kugusal olmayan tarihsel kitap
Tüneller, 2021 (*Tunnels*)	Rutu Modan	Çizgi roman

Şiir sanatında da "tüneller"ile ilgili çok sayıda örnek olduğunu belirtmekte yarar vardır. Örneğin; "Edebiyat Defteri" adlı internet sitesinde, başlığında "tünel" terimi içeren 150 civarında Türkçe şiir listelenmektedir (Edebiyat Defteri, 2022). Doğal olarak, diğer dillerde yazılmış benzer şiirlerin sayısının çok fazla olacağı söylenebilir. Tahmin edilebileceği gibi, bu şiirlerin çoğunda , umudu akla getiren "tünelin sonundaki ışık" veya hüznü çağrıştıran "tüneldeki yalnızlık veya karanlık" gibi simgeler bolca kullanılmaktadır.

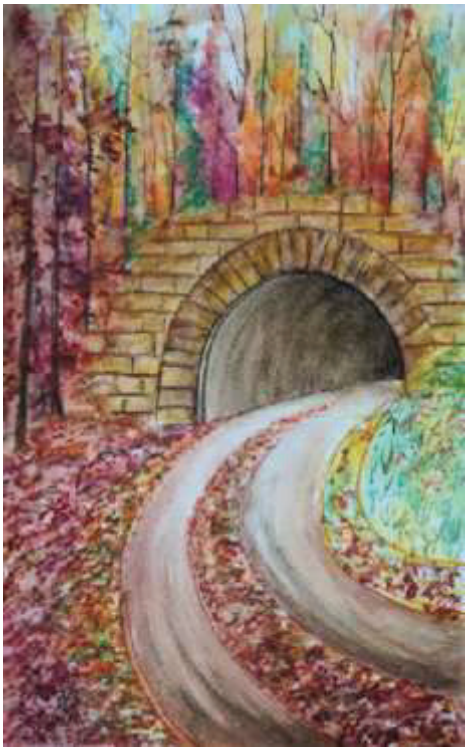
4 SANAT ÖRNEKLERİ

4.1 Resim Sanatı

İnternet yardımıyla ulaşılabilen, çok sayıdaki yağlı boya, sulu boya, karakalem vb. türdeki tünel tablolarına ek olarak bazı duvar resimlerinde de "tünel" konusu işlenmektedir. Söz konusu resimlerden seçilmiş bazı örnekler Şekil 3'te sunulmuştur.



(a) Yağlı boya (*Parkway Tunnel*, Art101) (AllEvents, 2022)



(b) Sulu boya (*Flower Tunnel*, Jagjit Kaur) (Fizdi, 2022)

(c) Duvar resmi (*Tunnelvision,* Blue Sky), Columbia, SC, ABD (StreetArt, 2013).

Şekil 3. Tünel konulu resim örnekleri.

Tünel veya çoğunlukla da metro duvarlarında gördüğümüz yazılar ve resimler, bu bildiride görsel sanatlar kapsamında ele alınmıştır. Tünel duvarlarındaki resimleri, tarihsel açıdan mağara resimlerine benzetmek mümkündür. En eskileri günümüzden yaklaşık 50 bin yıl öncesine dayanan mağara resimlerinin yapılış nedenleri çok çeşitli olmakla birlikte, günümüzdeki tünel/metro duvarı resimlerinin ve yazılarının başlıca amacının "dikkati çekmek" olduğu söylenebilir. Aslında, duvar yazılarının bazısının okuyanları güldürecek kadar mizahi olduğu, bazısının da felsefeyi anımsatacak kadar derin ve düşündürücü anlamlar içerdiğini söylemek mümkündür. Buna unutulmaz bir örnek olarak, 1960'lı yılların meşhur müzisyenleri olan "Simon ve Garfunkel" ikilisinin Sessizliği Sesi (*The Sound of Silence*) şarkısındaki "Peygamberlerin sözleri metro duvarlarına yazılıdır... (*Words of the prophets are written on subway walls...*)" sözleri gösterilebilir.

İşlevi sona erdikten sonra terkedilmiş tünellerin dramatik görüntüsü fotoğraf sanatçılarının ilgisini çekmiştir. Bu tür tünellerin çoğu insan girişine kapalı olmakla birlikte; kısa olanlar, geçit olarak kullanılmakta ve bazen de duvar resmi (*mural*) veya yazısı (*graffiti*) sanatçıları tarafından değerlendirilmektedir. İlginç bir örnek olarak, Edinburgh'daki (İskoçya) Clinton Tüneli gösterilebilir (Edinbugh Tourist, 2020). 1874 -1980 yılları arasında kullanılan bu 140 m'lik demiryolu tünelinin duvar resimleriyle süslenmesi bir projeye dönüştürülmüştür. Buradan ilginç bir örnek Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4. Edinburgh Clinton Tüneli duvar resimi (Webb, 2019)

Resim sanatı kapsamda, genellikle çocuklar için yayınlanan ve "tünel kitabı (*tunnel book*)" olarak adlandırılan, katlanan sayfalı veya halkalı klasör şeklindeki resimli kitapları da unutmamak gerekir. Kitap açıldığında, ortalarındaki gittikçe daralan delikler çevresinde resimler bulunan sayfalar, birbirine paralel olarak konumlanmakta ve üç boyulu bir resimli tünel görüntüsü ortaya çıkmaktadır.

4.2 Sinema Sanatı

Bildirinin bu aşamasında, çok büyük izleyici kitlesine sahip olan sinema sanatındaki "tüneller ve tünelcilikle" ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Beyaz perdede seyrettiğimiz ve hikayesinde "tünel" içeren çoğu filmin asıl konusu, kaçış (örneğin; hapishaneden, esir kampından vb.) veya soygun (örneğin; banka, kuyumcu, müze vb.) amacıyla açılan tüneller ile ilgilidir. Ayrıca, çok çeşitli tünelerde (karayolu, demiryolu, metro, kanalizasyon vb.) geçen; göçükler, kazalar, cinayetler, kovalamacalar vb. konuları işleyen de filmler de vardır (Çizelge. 2).

Çizelge 2. Beyazperde örnekleri (IMDb, 2022)

Filmin Adı (*Özgün Adı*) Yapım Yılı	**Yönetmen**	**Oyuncular**	**Konusu**
Tünel (*The Tunnel*) 1935	Maurice Elvey	Richard Dix Leslie Banks Madge Evans	Bernhard Kellermann'ın *Der Tunnel* (1913) romanına dayanan filmde, Londra'dan New York'a okyanus altından bir tünelin açılması anlatılmaktadır.
Büyük Firar (*The Great Escape*) 1967	John Sturges	Steve McQueen James Garner Charles Bronson R. Attenborough	II. Dünya Savaşı'nda Stalag Luft III adlı Nazi toplama kampından, tünel kazarak kaçmaya çalışan Amerikalı, İngiliz ve Polonyalı savaş esirlerinin maceraları anlatılmaktadır.
Esaretin Bedeli (*Shawshank Redemption*) 1994	Frank Darabont	Tim Robbins M. Freeman	Film, Sephen King'in *Rita Hayworth and Shawshank Redemption* (1982) adlı kısa romanına dayanmaktadır. Filmde, arka arkaya müebbet hapis cezasını çakmekte olan Andy'nin (T. Robbins), hücresindeki girişini Rita Hayworth'un afişiyle sakladığı bir kaçış tünelini çekiç ile 19 yıl süren kazısı anlatılmaktadır.
Günışığı (*Daylight*) 1996	Rob Cohen	S. Stallone A. Brenneman V. Mortensen	New York'ta, Manhattan ile New Jersey arasındaki tünelin her iki ucunda meydana gelen patlamalar sonucunda göçükler oluşur. Bir kahramanın, içeride mahsur kalanları kurtarmak için çalışması anlatılır.
Tünel (*Der Tunnel*) 2001	Roland S. Richter	Heino Ferch N. Krebitz Sebastian Koch	Soğuk savaş sırasındaki bölünmüş Almanya'da, doğudan batıya kaçmak isteyenlerin, Berlin Duvarı altından tünel açmaları konu edilmiştir.
Tünelin Ucunda (*Al Final del Túnel*) 2016	Rodrigo Grande	L. Sparaglia Pablo Echari Clara Lago	Tekerlekli sandalyeye mahkum bir bilgisayar mühendisi; maddi sıkıntı nedeniyle, evinin bir odasını bir genç kadınla kızına kiralamıştır. Ancak, kadının komşu binanın bodrum katından kazı yaparak banka soymayı planlayanlar ile ilişkisi vardır.
Tünel (*Teo-neol*) 2016	Seong Hun Kim	Ha Jung-woo Bea Doona Dal-su Oh	Filmin kahramanı, kızının doğum günü pastasını evine götürürken geçtiği tünelin çökmesi sonucu göçük altıda kalır. Cep telefonuyla yardım istediğinde, acil kurtarma ekipleri yanında, basın ve yayın organları da harekete geçer. Ancak, kurtarma çalışmalarının uzamasıyla, ulusal bir ilgi ve kaygı kaynağı olan olay tartışılmaya başlanır.
Asrın Soygunu, (*El Robo del Siglo*) 2020	Ariel Winograd	G. Francella Diego Peretti Luis Luque	Gerçek bir olaya dayanan bu filimde, 2006 yılında Buenos Aires'in Acassuso semtindeki *Banco Rio*'ya yapılan, 20 milyon dolarlık soygun anlatılmaktadır. Bankaya kapısından giren soyguncular, en alt katta bulunan kiralık kasaları boşaltırlar ve daha önce bu odanın tabanına kadar açtıkları tünelden kaçarlar.
Yeraltı Savaşı (*The War Below*) 2021	J. P. Watts	Sam Hazeldane T. Goodman-Hill Kris Hitchen	I. Dünya Savaşında, bir grup Britanyalı tünel kazıcı silah altına alınarak, Messines köyü (Belçika) yakınlarındaki Britanya ve Alman askeri cepheleri arasındaki sahipsiz bölge altında tünel kazarlar. 7 Haziran 1917 sabaha karşı, Alman siperlerinin altında gerçekleşirilen ve o zamana kadar görülmüş en büyük patlamada on bin civarında Alman askeri ölmüştür.

4.3 Müzik Sanatı

Müzik sanatında da adında ve sözlerinde "tünel" sözcüğünün geçtiği güzel örnekler bulunmaktadır. Bunların bir kısmını içeren ve YouTube (Google'a ait bir Amerikan çevrim içi video paylaşım ve sosyal medya platformu) internet sitesinden (YouTube, 2022) dinlenebilen popüler müzik örnekleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Tüneller ile ilgili popüler müzik örnekleri

Eserin Adı	Müzisyen(ler)	İnternet Adresi (*)
Tünel	Yüksek Sadakat	https://www.youtube.com/watch?v=iEkRHqlAlJI
Tunnel *Song*	The Schuberts	https://www.youtube.com/watch?v=xXLBCXfEhoQ
Welcome to the ***Tunnel***	Be Lion	https://www.youtube.com/watch?v=EY40ukmAGiU
Tunnel *of You*	Cannons	https://www.youtube.com/watch?v=cw4N3J7dEFo
End of the ***Tunnel***	A.Y. Bouzaglou	https://www.youtube.com/watch?v=0rzuJyfAxhQ
Tunnel *of Love*	B. Springsteen	https://www.youtube.com/watch?v=mqoxcav_SxE
Tunnel *Vision*	Justin Timberlake	https://www.youtube.com/watch?v=07FYdnEawAQ
The Light at the End of the ***Tunnel***	Starlight Express	https://www.youtube.com/watch?v=qsQR7iIHBwQ
Tunnel *of Fear*	Joe Dreamz	https://www.youtube.com/watch?v=uniGgNPsOcM
Long Dark ***Tunnel***	Lionel Bastos	https://www.youtube.com/watch?v=7AiERbASLc0
Light in ***Tunnel***	Red Rider	https://www.youtube.com/watch?v=8BFQNltShDI
Digging a ***Tunnel***	sir Was (Joel Wastberg)	https://www.youtube.com/watch?v=jZfBHW9DUOs

(*) Verilen internet adreslerine erişim tarihi: Kasım 2022

Müzikle ilgili olarak, *jazz fusion* (caz müziğinin öğelerini rock, funk, ritm ve blues, hip-hop ve elektronik müzik gibi stillerle birleştiren müzik uygulaması) türü eserleriyle tanınan *Tunnels* adındaki bir yabancı müzik grubu olduğunu belirtmekte de yarar vardır.

5 SON SÖZ

Derleme niteliğndeki bu bildiride, "tüneller ve tünelcilik" konusunda karşılaşılan bazı edebiyat ve sanat eserleri hakkında bilgiler ve örnekler paylaşılmıştır. Konuyla bilimsel ve teknik yönden ilgilenenlerin dikkatini çekmek amacıyla, günlük hayatımızda karşılaştığımız ve iyi bildiğimiz örneklerin yanında; internet yardımıyla kolayca ulaşılabilecek, az bilinen ve ilginç örneklere de değinilmiştir. Doğal olarak, edebiyat ve sanatın çok geniş kapsamlı olması nedeniyle, konuyla ilgili birçok kavram ve örneğe bildiride değinilmemiş olması da kaçınılmaz gerçektir.

Son olarak; bildirinin, edebiyat ve sanat eserlerinin hayal gücümüz üzerindeki olumlu etkisi düşünülerek planlandığını belirtmekte yarar vardır. Tıpkı Albert Einstein'ın (1879 – 1955) dediği gibi (Calaprice, 2005): "Hayal gücü, bilgiden daha önemlidir."

KAYNAKLAR

AllEvents, 2022. Allevents.in, https://allevents.in/mobile/amp-event.php?event_id=200023479945003/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

BBC, 2015. How the word 'tunnel' went from France to England and back, https://www.bbc.com/news/blogs-magazine-monitor-33647830/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Calaprice, A. (ed.), 2005. The New Quotable Einstein, Princeton University Press, Princeton (NJ), 407 s.

Delta, 2020. Stadium Seating, https://www.stadkoltugu.com/urundetay/futbolcu-cikis-tuneli/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Edebiyat Defteri, 2022. Tünel Şiirleri, https://www.edebiyatdefteri.com/tunel/siirleri/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Edinburgh Tourist, 2020. The Clinton Tunnel Mural, https://edinburghtourist.co.uk/blog/colinton-tunnel/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Fizdi, 2022. Fizdi.com, https://www.fizdi.com/flower-tunnel-art_7810_53991-handpainted-art-painting-8in-x-11in/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

IMDb, 2022. Internet Movie Database, https://www.imdb.com/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Mitchell, A., 2022. 'Ninja Turtles'-inspired bank robbers pulled off 'the heist of the century' - but a thief's wife blew it, *New York Post*, 10/08/2022, https://nypost.com/2022/08/10/how-a-thiefs-wife-ruined-the-heist-of-the-century/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

StreetArt, 2013. Graffiti & Streetart, https://streetartandgraffiti.blogspot.com/2014/02/blue-sky-tunnelvision-1975.html/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

TDK, 2007. *Türkçede Batı Kökenli Kelimeler Sözlüğü*, https://sozluk.gov.tr/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

TDK, 2011. *Güncel Türkçe Sözlük*, https://sozluk.gov.tr/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

TheYou, 2022. https://theyou.com/w/piercing/tunnel-piercing/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

TwitSözler, 2022. Tünelin Sonundaki Işık Size Umut Verecek Alıntıları, https://www.twitsozler.com/guzelsozler/tunelin-sonundaki-isik-size-umut-verecek-alintilari-4014/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Webb, H., 2019 Abandoned Colinton railway tunnel in Edinburgh transformed by mural, https://www.bbc.com/news/uk-scotland-edinburgh-east-fife-50389104/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Wikipedia, 2022. *The Free Encyclopedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_tunnelling/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Wiktionary, 2022. *The Free Dictionary*, https://en.wiktionary.org/wiki/time_tunnel/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

YouTube, 2022. https://www.youtube.com/, (Erişim tarihi: Kasım 2022).

Top-Down Yöntemi İle İnşa Edilen Bir Yeraltı Otoparkı Uygulaması: Vaka Analizi

An Underground Car Park Construction by Top-Down Method: Case Study

R. Düzceer, A. Gökalp, Ş. Adatepe
Kasktas A.S., Istanbul

ÖZET: Bildiri kapsamındaki yeraltı otopark projesi İstanbul, Üsküdar'da Mimar Sinan Meydanında inşa edilmiştir. Yoğun yapılaşma ve tarihi yapılar ile çevrili alanda gerçekleştirilen 4 katlı, 956 araçlık zemin altı otopark yapısının yapı oturum alanı 10,250 m² ve iksa derinliği 18 m'dir. Proje kapsamında Yukarıdan Aşağıya (Top-Down), eş zamanlı olarak kazı ve üstyapı inşaatına olanak veren Aşağıya ve Yukarıya (Up&Down) yöntemlerinin bir arada kullanıldığı hibrit bir kazı ve inşaat sistemi uygulanmıştır. Dayanma yapısı hidrolik freze ile imal edilen diyafram duvarlardan oluşmaktadır. Bildiri kapsamında, dayanma yapısının, temel altı çekme kazıklarının ve top-down kazıklarının tasarımı, yapım aşamaları ve uygulama sırasında takip edilen kalite kontrol testleri ile dayanma yapısının performansı hakkında bilgi verilmiştir.

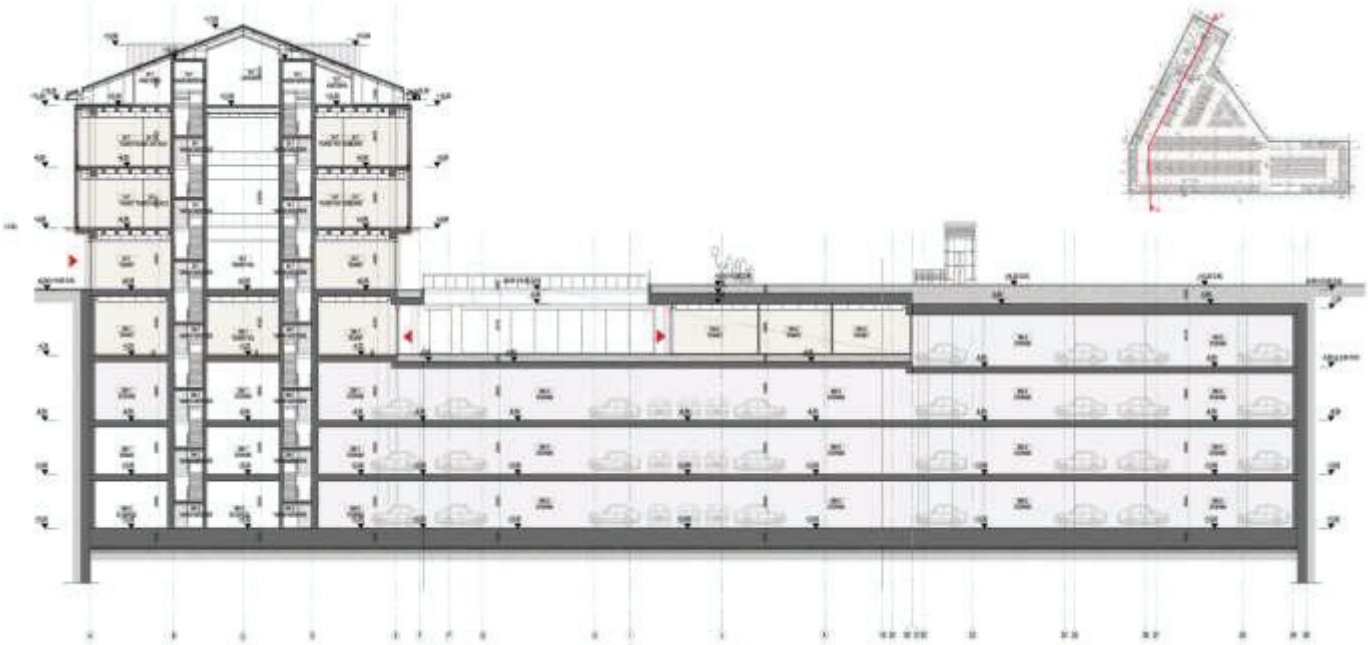
ABSTRACT: The underground car park project within the scope of the paper was built in Mimar Sinan Square in Üsküdar, Istanbul. The underground parking structure with 4-storey and 956 vehicle, which is built in an area surrounded by highly populated area and historical buildings, with a construction area of 10,250 m² and a shoring depth of 18 m. Within the scope of the project, a hybrid excavation and construction system in which Top-Down and Up&Down methods are used together, which allows simultaneous implementation of excavation and superstructure construction works. The shoring structure consists of diaphragm walls executed with hydraulic cutter. Within the scope of the paper, information is given about the design of the retaining structure, sub-base tensile piles and top-down piles, the construction stages and the quality control tests followed during the application and the performance of the retaining structure.

1 GİRİŞ

Üsküdar'ın en yoğun alanlarından olan Hakimiyet Milliye Caddesi'ne komşu olan Üsküdar Belediyesi Binası, katlı otopark yapısı ve Korkmazlar Çarşısı'nın yıkılmasıyla elde edilen alan üzerinde, tarihi Kara Davud Paşa Camii'nin hemen yanında yer alan Mimar Sinan meydanı altında "İç meydan ve park" anlayışıyla tasarlanan 4 katlı ve 956 araç kapasiteli zemin altı otoparkı inşa edilmiştir. Bu otopark ile deniz, kara ve raylı sistem ağlarının kesişim noktası olan transfer merkezi konumundaki bölgeye "park et-devam et" hizmeti kazandırılarak, bölgenin yoğun otopark ihtiyacı karşılanmaya çalışılmıştır. Proje kapsamında meydan ve

zemin altı otoparkının yanında yeni inşa edilen Hakimiyeti Milliye Çarşısı ile bölgenin ticari hayatına da yeni bir canlılık sağlanması amaçlanmıştır. Proje sahasının uydu fotoğrafı ve mimari kesiti Şekil 1'de verilmiştir.

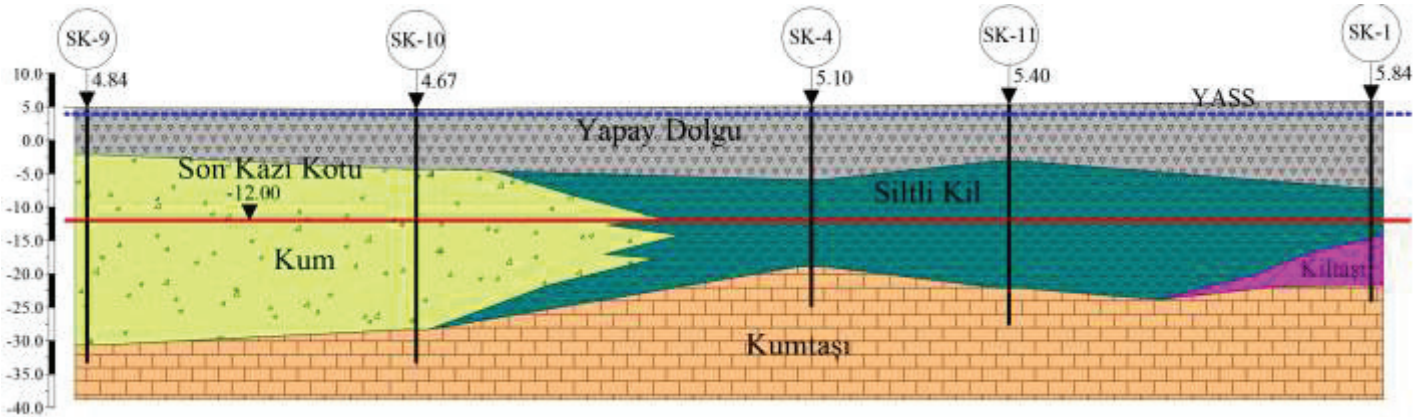
Şekil 1. Çalışma alanı uydu görüntüsü



Şekil 2. Yeraltı otoparkı tipik mimari kesiti

2 ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Çalışma alanında Yapay Dolgu (Yd), Siltli Kumlu Killi Alüvyon (Qal) ve Kiltaşı-Kumtaşı birimlerinden oluşan Trakya Formasyonu (Ct) tabakaları yer almaktadır. İnceleme alanında yapılan sondaj çalışmaları sonucunda; 7.00-10.00 metreler arasında değişen kalınlıklarda Yapay Dolgu, kara tarafında 10.0-15.0 metreye kadar değişken derinliklerde Siltli Kil, deniz tarafında ise 15.0-33.0 m kalınlıkta Kum tabakası devamında kuyu sonlarına kadar Kiltaşı-Kumtaşı birimleri gözlemlenmiştir. Sondaj çalışmalarında yeraltı su seviyesi yüzeyden 1.5 m derinde belirlenmiştir. Sondaj yerleşim planı ve jeolojik kesitler aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. Sondaj yerleşim planı ve tipik zemin kesiti

Geoteknik tasarımda kullanılan zemin parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Zemin parametreleri Altınok Müşavirlik tarafından hazırlanan geoteknik rapordan alınmıştır.

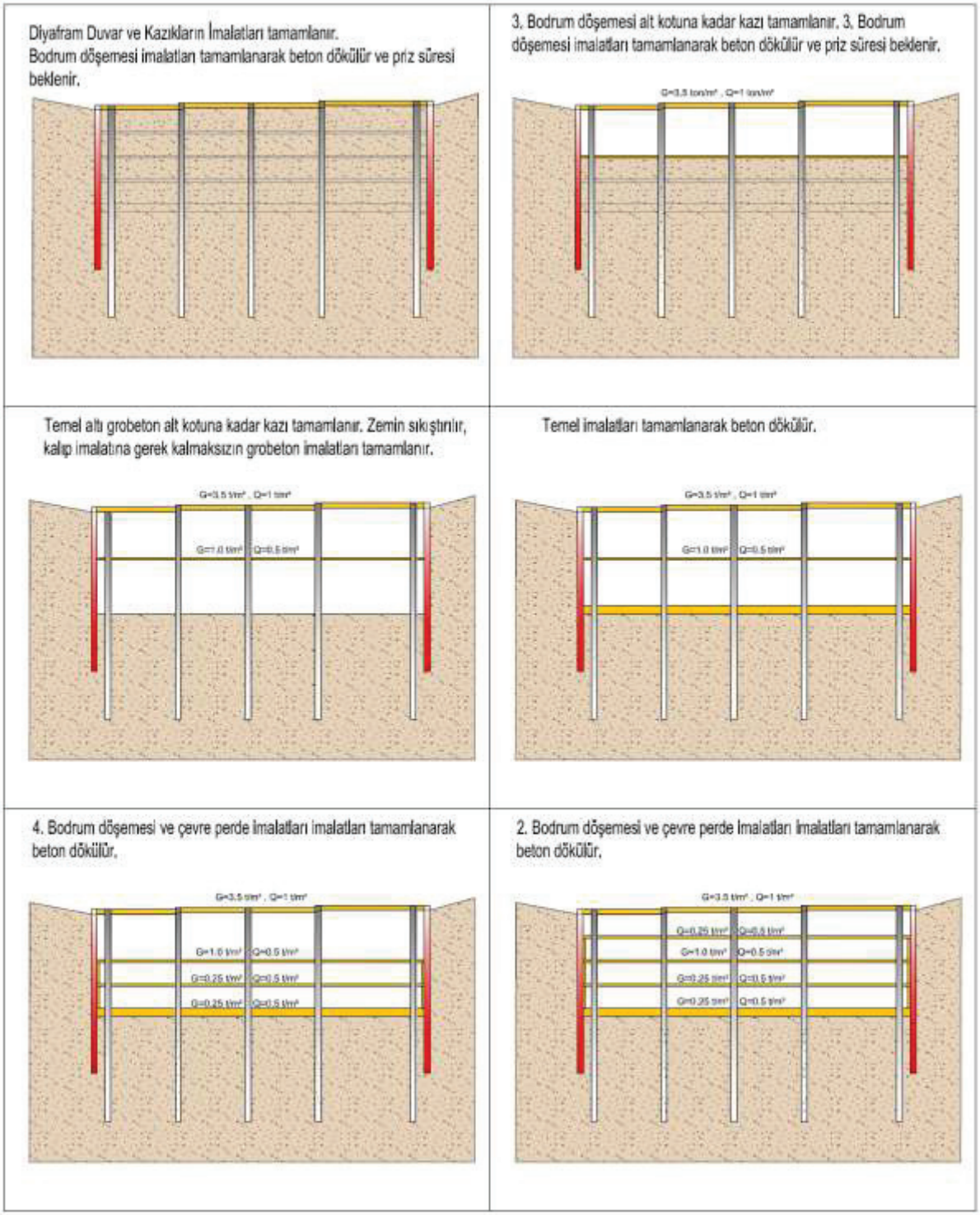
Çizelge 1. Geoteknik tasarım parametreleri

Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)	Efektif Kohezyon (kPa)	Efektif İçsel Sürtünme Açısı (°)	Efektif Deformasyon Modülü (MPa)
Yapay Dolgu	19	10	27	20
Kum	19	1	33	25
Siltli Kil	20	15	28	30
Kiltaşı - Kumtaşı	23	50	33	150

3 GEOTEKNİK TASARIM

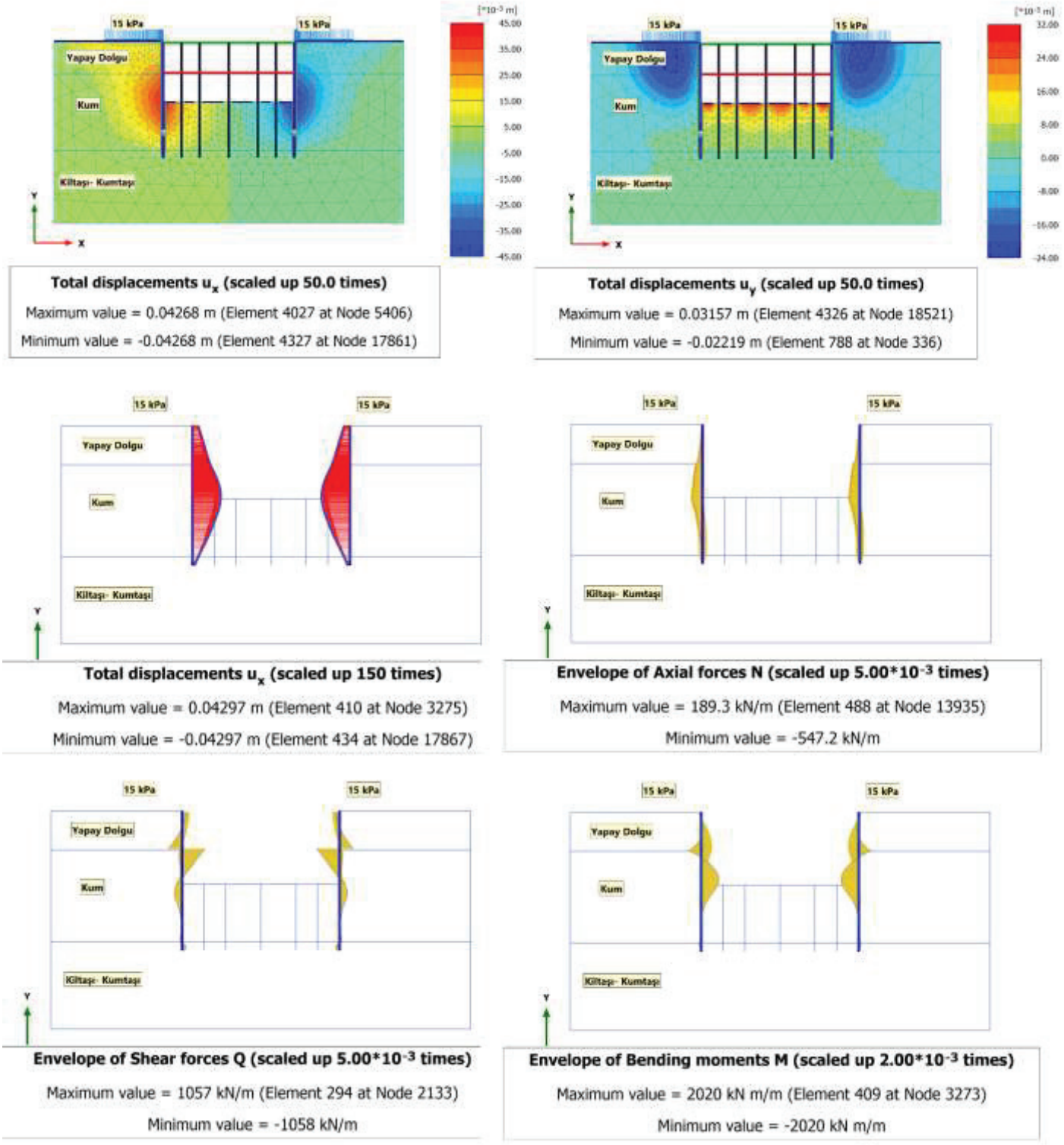
3.1 Dayanma Yapısı Tasarımı

Projenin tamamlanma süresi dikkate alınarak Top-Down olarak yapılacak olan kazı için 4 bodrum olarak inşa edilecek olan otopark yapısında aşağıya inilirken 2 kat bodrum döşemesinin döküleceği bir iksa sistemi projelendirilmiştir. Böylelikle döşeme altında yapılacak olan kazılarda hız artırılmış ve hafriyat süresi önemli oranda azaltılmıştır. Bu amaçla diyafram duvar kalınlığı 100 cm olarak seçilmiş ve zemin kat ile 3. Bodrum kat döşemesinin aşağıya iniş sırasında yapılacağı dikkate alınarak kesit hesapları yapılmıştır. İmalat aşamaları aşağıda verilmiştir.



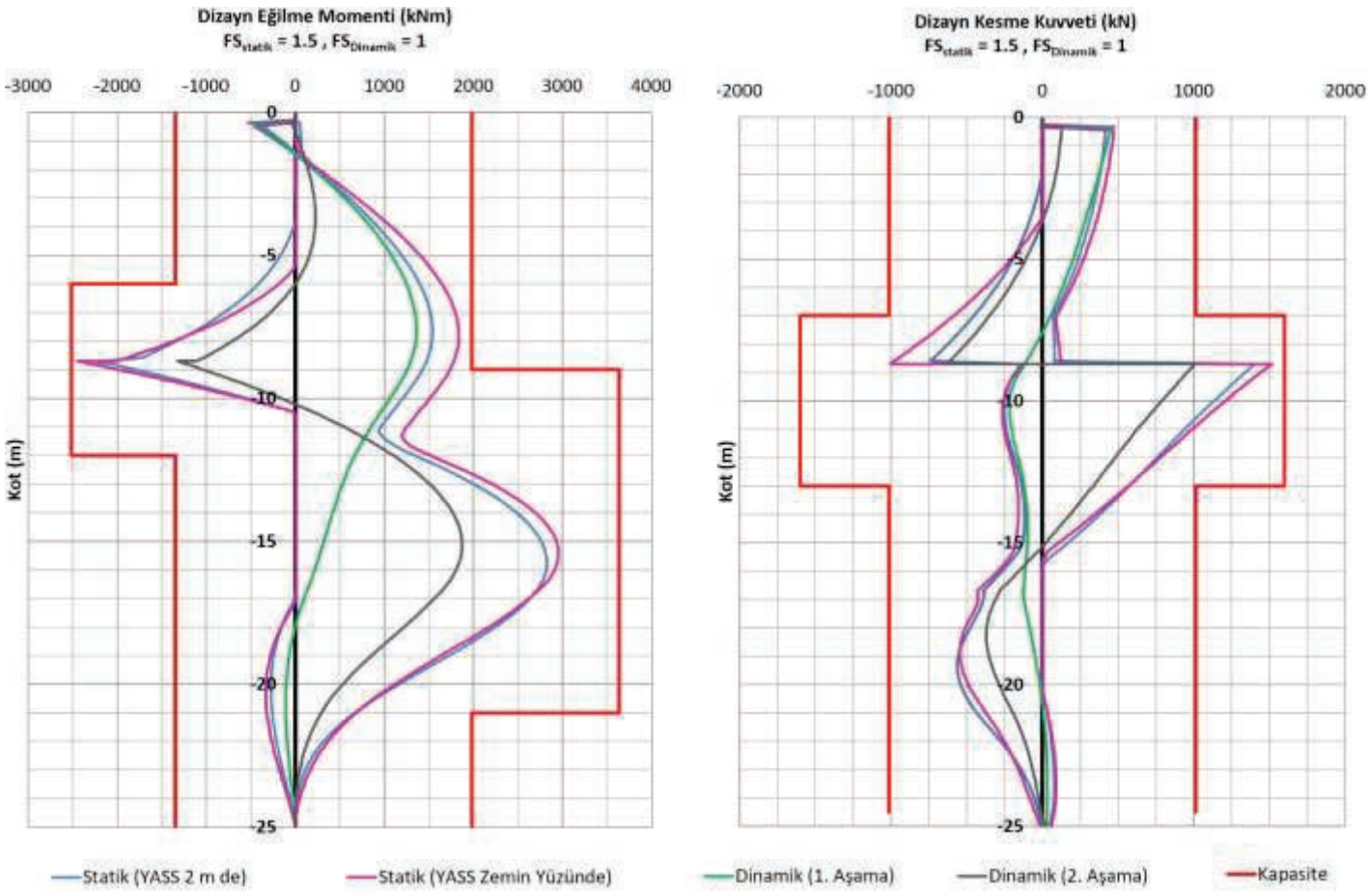
Şekil 4. Top-Down yöntemi imalat aşamaları

Geoteknik hesaplar 3 farklı durum için yapılmıştır. Statik durumda YASS seviyesi yüzeyden 3 m derinde alınmış ve Şekil 4'te verilen aşamalar dikkate alınarak deformasyon analizleri yapılmıştır. İkinci durumda Üsküdar bölgesinde aşırı yağışlar nedeniyle YASS'nin zemin yüzüne kadar çıkması dikkate alınmış, depremli durumda ise a_h=0.20g yatay deprem ivmesi kullanılarak pseudostatic analiz yapılmıştır.



Şekil 5. Geoteknik hesap sonuçları

Diyafram duvar donatı hesapları ACI 318 normu kullanılarak yapılmıştır. Kesitte kullanılan donatı çap ve aralıklarına göre eğilme momenti ve kesme kuvveti taşıma kapasiteleri belirlenmiş ve yük–kapasite diyagramları kullanılarak donatı dağılımı belirlenmiştir. Yük kapasite diyagramında statik durum için hesaplanan kesit tesirleri için yük artırım katsayısı 1.5 olarak dikkate alınmıştır. Depremli durum için hesaplanan kesit tesirlerinde yük artırımı uygulanmamıştır. Diyafram duvar alt kotları sahada kaya tabakasına soketlenecek şekilde yerinde belirlenmiştir. Diyafram duvar boyundan bağımsız olarak yüzeyden 25 m derinliğe kadar donatı kullanılacağı için hesaplar 25 m boy için yapılmıştır.

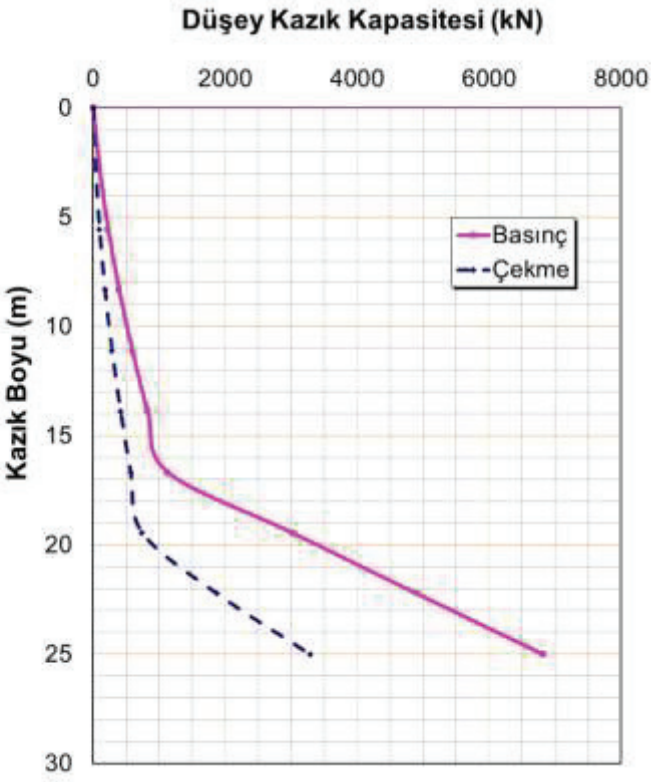


Şekil 6. Betonarme hesap sonuçları ve donatı yerleşimi

3.2 Top – Down Kazıkların Tasarımı

Otopark yapısında C Blok hariç diğer alanlarda yapı zemin kotuna kadar yükselecektir. Kazı derinliği ve YASS seviyesi dikkate alındığında yapı ağırlığının, suyun kaldırma kuvvetini yenemediği görülmektedir. Bu nedenle top-down aşamasında kolonların yerine yapılacak olan kazıklar, aşağıya iniş aşamasında basınç, nihai durumda ise çekme yükü alacaktır. Aşağıya iniş aşamasında hafriyat aşamasındaki hareketli yükler ve stok alanları nedeniyle oluşan ölü yükler dikkate alınmıştır. Son durumda kaldırma kuvveti hesaplarında binanın boş olma durumu kritik olacağı için hareketli yükler dikkate alınmamıştır. Yapılan hesaplar sonucunda fore kazıklara gelecek olan maksimum basınç kuvveti 6,300 kN, maksimum çekme kuvveti ise 1,800 kN olarak belirlenmiştir. Yapılan hesaplar sonucunda kayaya 5 m soketli D=90 cm çaplı fore kazıklar ile bu yüklerin güvenle taşınabileceği belirlenmiştir. Hesap sonuçları aşağıda verilmiştir.

$f_{su} = \alpha\, q_u^{\beta}$				
DESIGN METHOD	q_u (MPA)	α	β	f_{su} (MPA)
Horvath and Kenney 1979	10	0.21	0.50	0.66
Carter and Kulhawy 1988		0.20	0.50	0.63
Williams et al. 1980		0.44	0.36	1.01
Rowe and Armitage 1984		0.40	0.57	1.49
Rosenberg and Journeux 1976		0.34	0.51	1.10
Gupton and Logan 1984		0.20	1.00	2.00
Reese and O'Neill 1988		0.15	1.00	1.50
		Dizayn		1.20



Şekil 7. D=90 cm fore kazık taşıma gücü hesap sonuçları

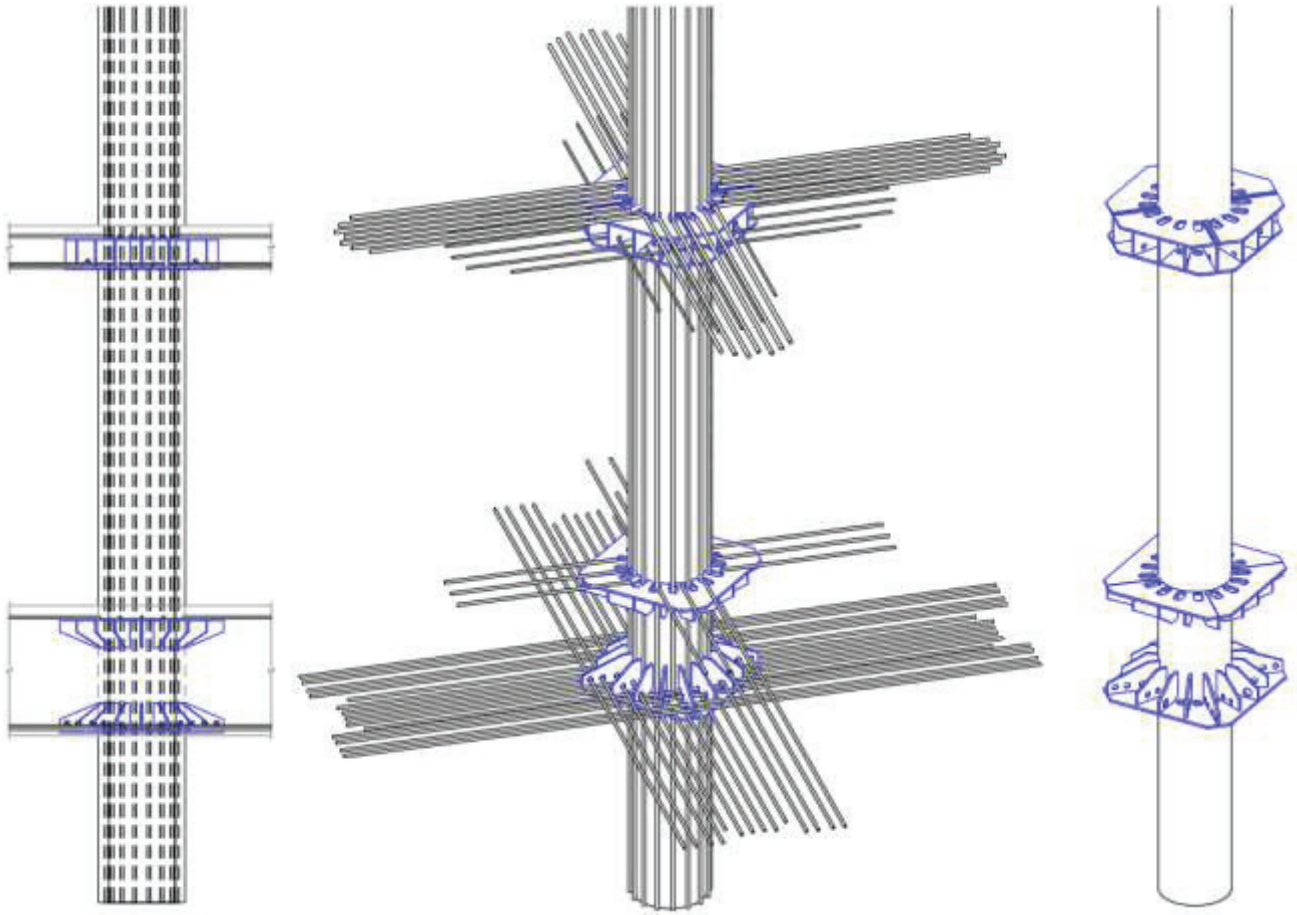
4 STATİK TASARIM

Otopark yapısında statik projeleri Emir Mühendislik tarafından yapılmıştır. Tasarımda C blokta yer alan 3 katlı çarşı binasının inşaatının aşağıya doğru kazı devam ederken tamamlanmasına olanak sağlanmıştır. Bu tasarım sayesinde proje tamamlanma süresi önemli oranda kısaltılmıştır.

Şekil 8. Yukarıya ve aşağıya (up & down) yöntemi

Kazı aşamasında ve nihai durumda kat döşemelerinin top-down kazıklarına yük aktarımlarını sağlamak amacıyla çelik bağlantı elemanları projelendirilmiştir. Bu çelik bağlantı elemanları döşeme kotlarına kazı yapıldığında, top-down kazıkları içerisinde bırakılan çelik borulara rahatça kaynaklanabilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Döşeme donatılarının ve kolon kalıcı donatılarının geçiş bölgelerinde boşluklar bırakılmıştır. Döşeme donatılarının çelik borulara denk geldiği kısımlarda donatılar çelik elemanlara kaynaklanmıştır

.

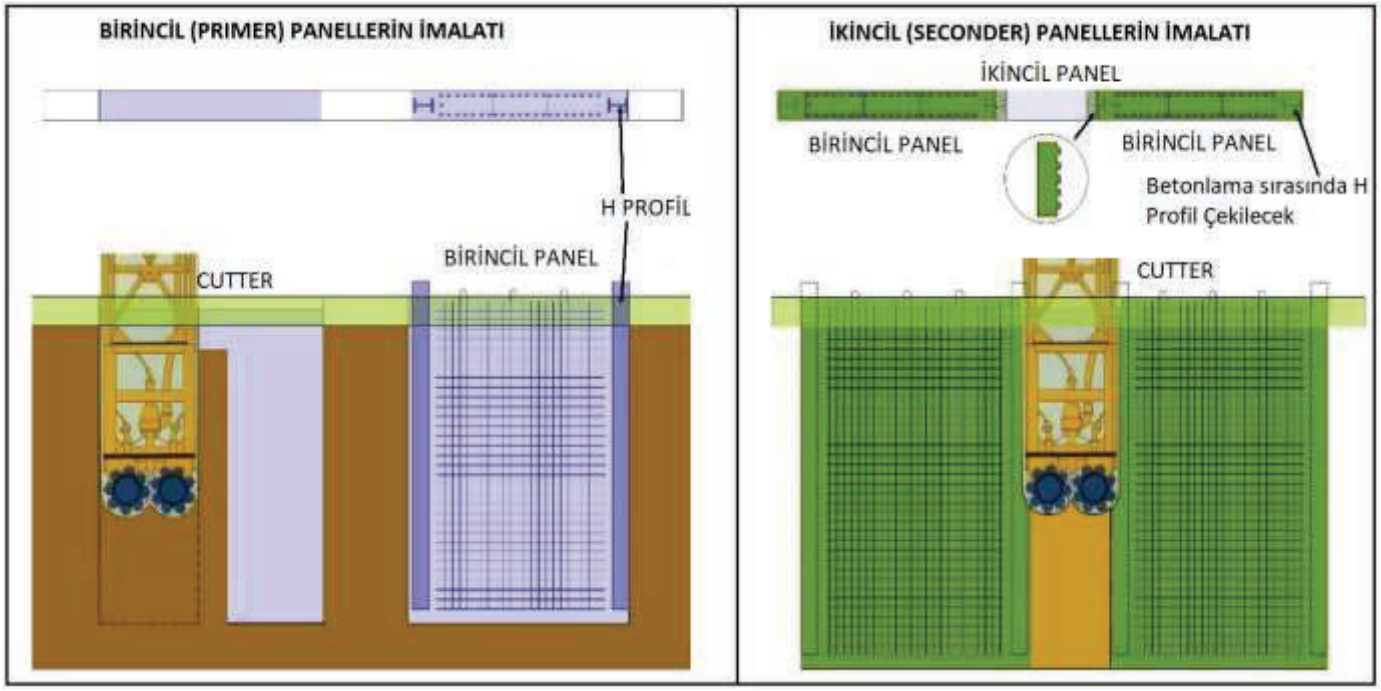


Şekil 9. Çelik bağlantı elamanları

5 DİYAFRAM DUVAR UYGULAMALARI

Diyafram duvar imalatlarına başlanmadan önce tüm sahada kılavuz duvar imalatları yapılmıştır. Diyafram duvar imalatlarının doğru konumda yapılabilmeleri için kılavuz duvarların düzgün yapılmış olması büyük önem taşımaktadır. Diyafram duvar imalatları Hidrolik Freze ile tamamlanmıştır. Freze ile kazıya başlamadan önce kılavuz duvarlar içinden 3 m ön foraj yapılmıştır.

Diyafram duvar imalatlarında birincil panellerin kazıları 6,4 m olacak şekilde 3 ağızlı panel olarak projelendirilmiştir. İkincil paneller ise birincil panelleri 20 cm kesecek şekilde yerleştirilmiştir. Hidrolik freze için tipik imalat sıralaması Şekil 10'da verilmiştir.



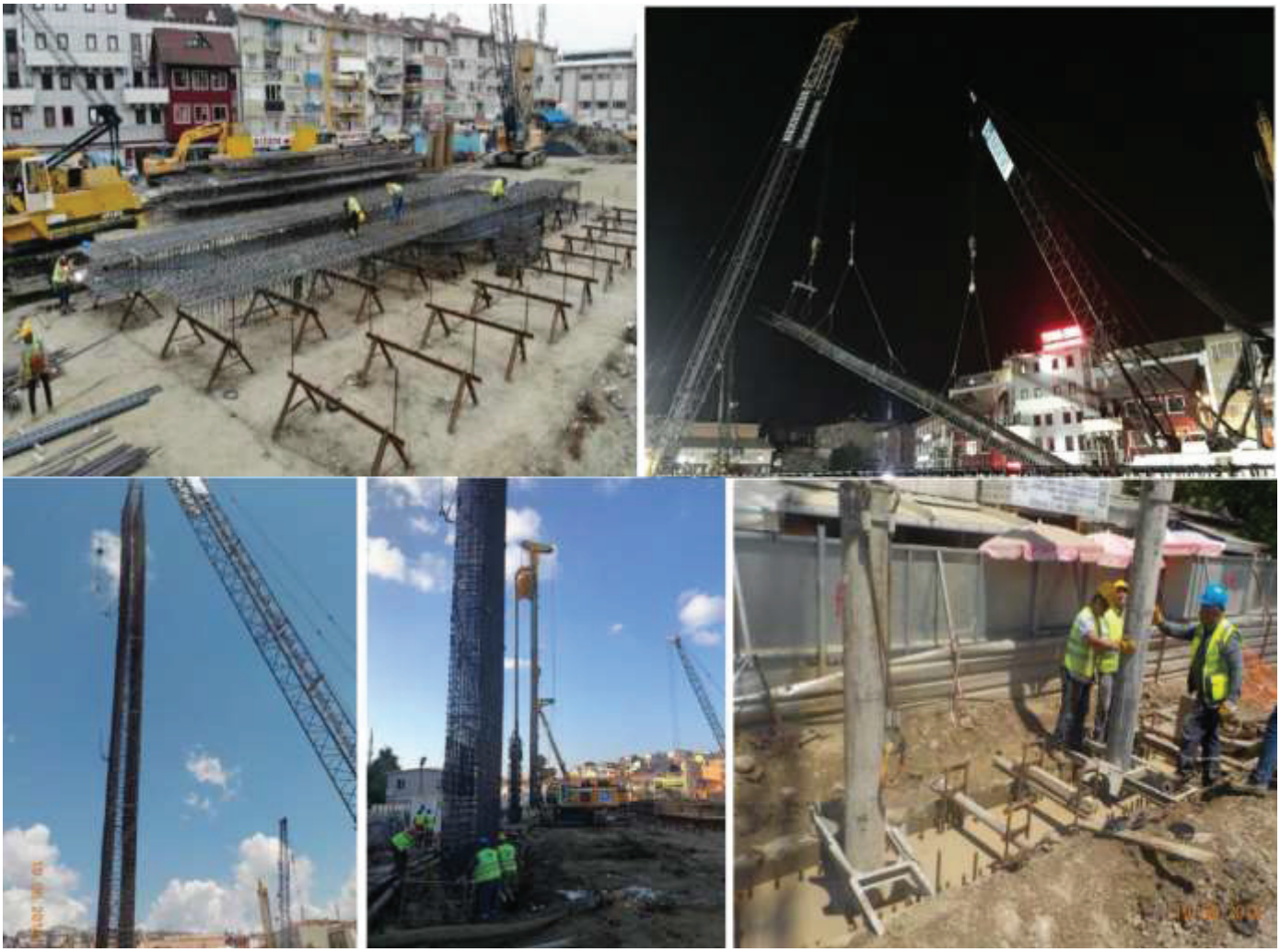
Şekil 10. Hidrolik freze panel imalat sıralaması

Kazı sırasında, kullanılan bentonitin özelliği bozulduğu için kazı tamamlandıktan sonra kuyu içindeki bentonit freze üzerindeki çamur pompası ile çekilerek tesise geri gönderilmiştir. Bu bentonitin yerine, beton dökülebilecek özellikte olan bentonit kuyu ağzından panellere verilmiştir. Kuyudan alınan bentonit örneğinin test sonuçları standartlarda izin verilen değerleri sağlayana kadar yıkamaya devam edilmiştir.

Parametre	*Taze Karıştırılmış Bentonit Bulamacı Sonuç Aralığı*	*Kazı Sırasında Bentonit Bulamacı Sonuç Aralığı*	*Beton Yerleştirilmesinden Önce Hendekte Bulunan Bentonit Karışımı Sonuç Aralığı*
Yoğunluk	<1.10 g/ml	<1.25 g/ml	<1.15 g/ml
Akışkanlık (Viskozite)	32-50 saniye	32-60 saniye	32-50 saniye
pH	7-11	7-12	-
Kum Miktarı	-	-	%4

Şekil 11. Bentonit viskosite ve kum yüzdesi testi ve standart değerler

Donatı kafesi, saha içerisinde hazırlanmış ve kılavuz duvar üzerinde aplike edilen noktalar dikkate alınarak projesine uygun şekilde kuyulara indirilmiştir. Projede belirtilen donatı üst kontuna göre kılavuz duvar üzerinde askıya alınmıştır. Paspayları kuyu başında donatı kafeslere monte edilmiştir.



Şekil 12. Diyafram duvar donatılarının indirilmesi ve betonlama aşamaları

6 FORE KAZIK UYGULAMALARI

Projede geçici ve kalıcı olmak üzere iki tip kolon kazık imal edilmiştir.

- Kalıcı Kolonlar: İmalatlar tamamlandıktan sonra bina ömrü boyunca çalışacak olan kolonlardır. Proje kapsamında 213 adet (6,815 m) kalıcı kolon imal edilmiştir.
- Geçici Kolonlar: Tüm sistem kazı alt kotuna ulaştığında bu kolonlar kesilerek çıkartılmıştır. Proje Kapsamında 50 adet (1,600 m)

Proje kapsamında imal edilen kalıcı kazıklar için 610 mm çapında, 12.5 mm ve 16 mm et kalınlığında çelik borular kullanılmıştır. Bu borular saha içerisinde proje boylarına göre hazırlanmış ve donatı kafesine kuyu ağzında kaynaklanmıştır.

Delgi sırasında yıkıntı yapan, su seviyesi yüksek kısımlarda değişik (18-25m) boylarda muhafaza borusu kullanılmıştır. Muhafaza borusu altında yıkıntı gözlenen kuyulara su verilerek kuyu stabilitesi sağlanmıştır. Dolgu ve killi zeminde kil bagesi ve kil augeri; kaya forajında ise karotiyer ve kaya bagesi kullanılmıştır. Tüm kazıklar (delgi hızı 1m/sa altında kalanlar hariç) minimum 5 m kayaya soketlenecek şekilde imal edilmiştir. Geçici muhafaza borusunun dikeyliğinin sağlanması için ilk 10 m boru sürülünceye kadar işveren harita grubu tarafından

aletsel ölçüm yapılmıştır. Sonrasında operatör, makine ekranından ve su terazisi ile dikeyliği kontrol ederek boru sürme işlemine devam etmiş ve tüm kazıklar 1/200 düşey sapma toleransı içinde imal edilmiştir.

Şekil 13. Top Down kazık donatılarının kuyuya indirilmesi ve betonlama aşamaları

7 TOP-DOWN İMALATLAR

Diyafram duvar ve Top-Down kazık imalatlarının tamamlanması sonrasında, kazı ve betonarme inşaat aşamalarına geçilmiştir. Betonarme imalatlar BARU tarafından yapılmıştır. Aşağıya iniş aşamasında dökülen zemin kaz ve -3.kat döşemelerinin imalatı sırasında zemin yüzünde grobeton atıldıktan sonra, kalıp kurulmuş ve döşeme alt yüzeyinin herhangi bir düzeltme ihtiyacı olmadan imal edilmesi sağlanmıştır.

Şekil 14. Zemin kat döşemesi döküldükten sonra -3.kat döşemesi için kazı aşaması

8 SONUÇLAR

İstanbul, Üsküdar'da inşa edilen Mimar Sinan Yer Altı Otopark Projesi kapsamında, Yoğun yapılaşma ve tarihi yapıların yer aldığı bir lokasyonda derinliği 18 m'yi bulan temel çukur kazısı, 16,100 m² Diyafram Duvar ve 7,300 m Top-Down Kazığı kullanılarak, benzerlerinden farklı olarak Yukarıdan Aşağıya (Top-Down) ve hem Aşağıya hem Yukarıya (Up&Down) yöntemlerinin karma olarak bir arada kullanıldığı inşaat yöntemi ile başarı ile tamamlanmıştır. Geliştirilen bu çözümde, C Blokta yer alan çarşı binasında Up & Down Yöntemi ile yani aynı anda kazı yapılırken eş zamanlı olarak zemin kotu üstündeki betonarme imalatların yapılabilmesine olanak sağlanmıştır.

Proje kapsamında sistem tasarımı, geoteknik hesaplar, diyafram duvar boylarının belirlenmesi, diyafram duvar betonarme tasarımının yapılması ile statik projecinin ihtiyaç duyduğu kat döşemelerine aktarılacak yatay ve düşey yüklerin belirlenmesi geoteknik tasarım kapsamında yapılmıştır.

Bunlara ilave olarak, üst yapı ağırlığının suyun kaldırma kuvvetinden az olması nedeniyle, kazı aşamasında sadece basınç yükü taşıyacak olan Top-Down kazıkları nihai durumda çekme yükü taşıyacak şekilde geoteknik tasarım içerisinde projelendirilmiştir.

Proje sahasının yoğun trafik ve ilgi merkezi olarak bilinen bir bölgede yer alması nedeni ile imalatlar zaman zaman sınırlı çalışma saatleri arasında İSG, kalite kontrol programlarına ve hedeflenen iş sürelerine uygun olarak ve başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

9 TEŞEKKÜR

Top-Down sisteminin projelendirilmesi sırasında birlikte çalıştığımız Emir Mühendislik ve ana yüklenici BARU İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş'ye katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Altınok Müşavirlik Mühendisli, (2016) Üsküdar ilçesi Mimar Sinan Mahallesi Hakimiyeti Milliye Çarsısı ve Zemin Altı Otopark Projesi Zemin Etüt Raporu

Carter, J.P. & Kulhawy, F.H. (1988). Analysis and Design of Drilled Shaft Foundations Socketed into Rock. Report EL-5918, Electric Power Research Institute, Palo, Alto, Calif.

Gupton, C., & Logan, T. (1984). Design guidelines for drilled shafts in weak rocks of south Florida. In South Florida Annual ASCE Meeting.

Horvath, R.G. & Kenney, T.C. (1979). Shaft Resistance of Rock Socketed Drilled Piers, Proc. Symposium on Deep Foundations, ASCE, Atlanta, USA.

Reese, L. (1988). Drilled shafts: Construction procedures and design methods. FHWA A Publication,, 88.

Rosenberg, P., & Journeaux, N. L. (1976). Friction and end bearing tests on bedrock for high capacity socket design. Canadian Geotechnical Journal, 13(3), 324-333.

Rowe, R. K., & Armitage, H. H. (1984). A design method for drilled piers in soft rock. Canadian Geotechnical Journal, 24(1), 126-142.

Williams, A.F., Johnston, I.W. & Donald, I.B.. (1980). The Design of sockets in weak rock. Proceedings, International Conference on Structural Foundation on Rock, Sydney, Vol.1, s:327-347.

Anatolium Marmara Avm ile Kadıköy-Kartal Metro Hattı Hastane İstasyonu Yaya Bağlantı Tüneli Projesi, Şehir İçi Tünelciliğinde Kazı Çalışmaları ve Öngörülemeyen Durumlar

Anatolium Marmara Mall and Kadikoy-Kartal Metro Line Hospital Station Pedestrian Connection Tunnel Project, Excavation Works in the City Tunnelling and Undesirable Situations

M. Tepecik

Sargın İnşaat Makine San. Tic. A.Ş. Ankara

ÖZET: Bu çalışma İstanbul ili, Kartal ilçesinde bulunan alışveriş merkezi ile metro hattı arasındaki yaya geçişlerinin en hızlı ve en güveni yoldan olmasını sağlamak amacı ile yapılmıştır. Dünyada ve ülkemizde yürütülmekte olan yeraltı kazı çalışmaları büyük hayati önem taşımaktadır. Şehir içinde yapılan tünelcilik faaliyetleri de bu çalışmalardan biridir. Şehir içi tünelciliğinde yeraltında inşa edilen kalıcı yapılar kısa, güvenli ve hızlı geçiş yolları olarak önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, şehir içi tünelciliğinde dar alanlarda yapılan altyapı kazılarında beklenmeyen durumlar karşısında alınan uygulanan çözüm önerileri anlatılmıştır.

ABSTRACT: This paper was carried out with the aim of ensuring that the pedestrian crossing between the shopping center in the Kartal district of İstanbul and the metro line are the fastest and safest way. The underground excavation works that are carried out in the world and in our country are of vital importance. Tunnelling activities in the city are one of the Works. Permanent structures built underground in urban tunneling play an important role as short, safe and fast passenger crossings.

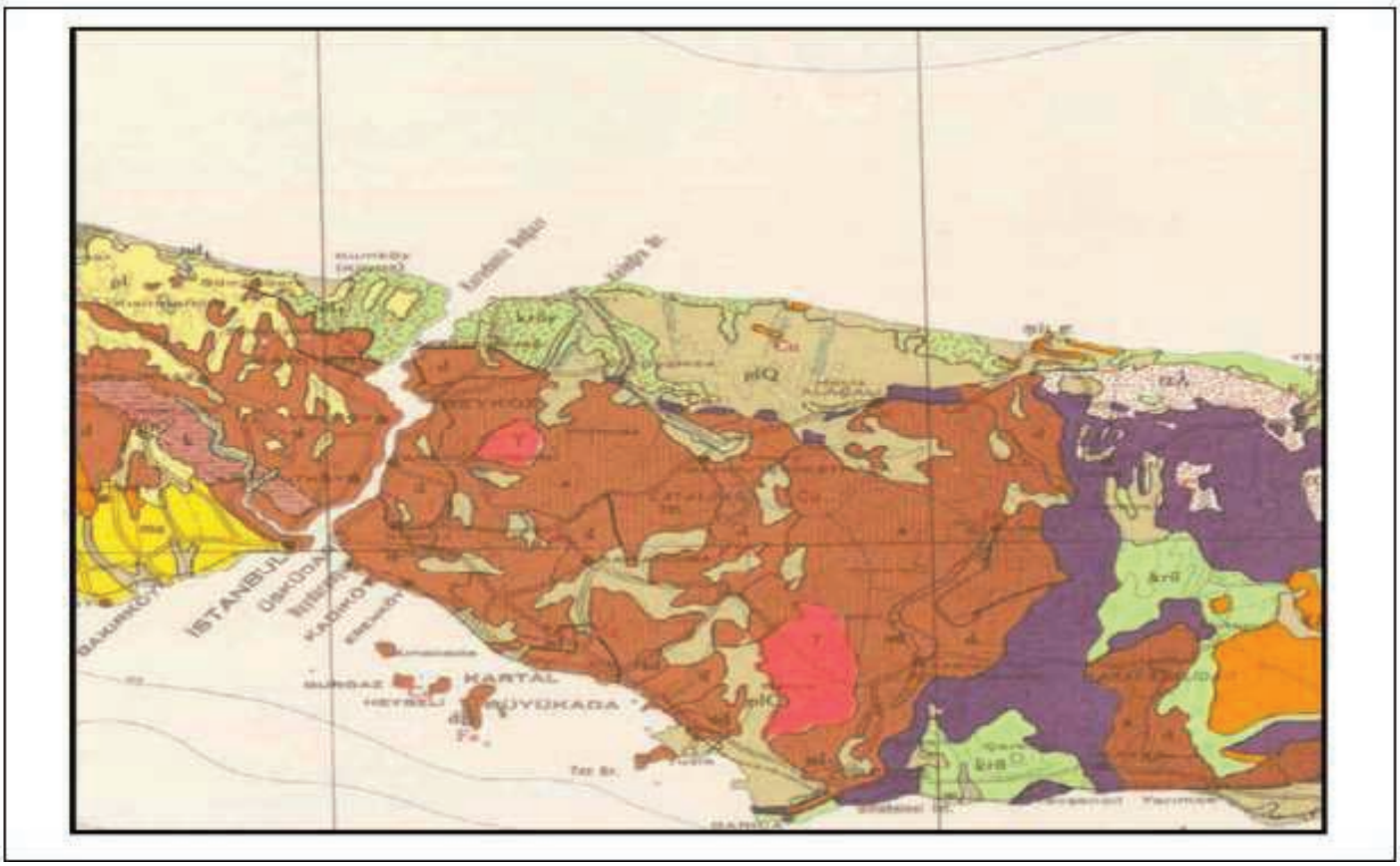
In this paper, the solution proposals applied in the face of unexpected situation in the infrastructure excavations in narrow areas in urban tunneling are explained.

1 GİRİŞ

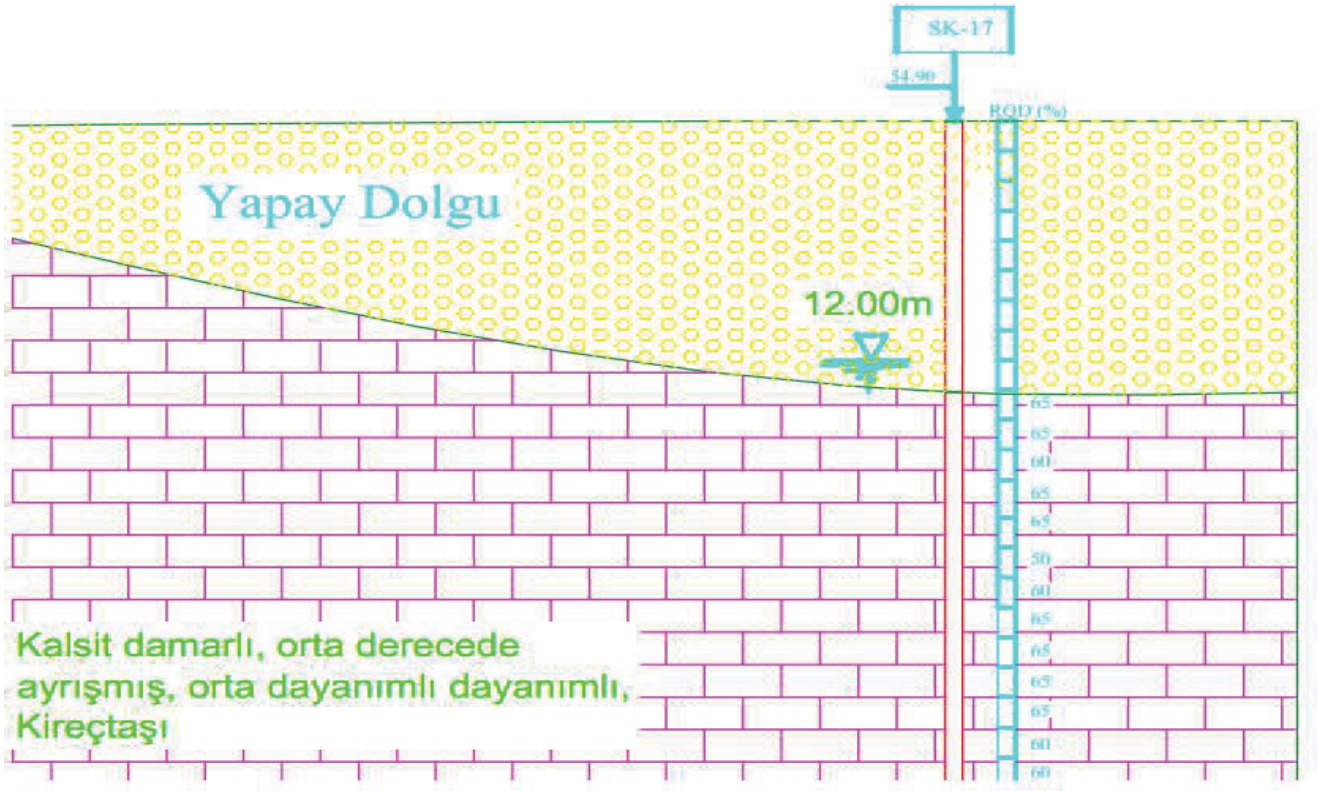
Bu çalışma, Kadıköy-Kartal metrosundan Anatolium Marmara Avm ye yaya geçişlerinin sağlanması için planlanmış 41.5 m uzunluğuna sahip tünel inşaat yapım işlerini kapsamaktadır. Şekil 1'de tünel güzergahı gösterilmektedir. Proje tasarım ve planlamadan önce yapılan çalışma sahasında yapılan jeoteknik çalışmalar doğrultusunda;

- Bölge Genel Jeolojisi – MTA'nın Jeolojik haritasından alüvyon havzası ve dolgu olduğu (Şekil 2)
- Yerel Jeolojisi – Sondaj araştırmaları ile dolgu tabakası olduğu anlaşılmıştır (Şekil 3).

Şekil 1. Tünel güzergahı



Şekil 2. MTA bölge genel jeoloji haritası (MTA 1/500.000)



Şekil.3 Jeolojik zemin profili

Sondaj Raporu – Zemin inceleme için 2 adet sondaj yapılarak belirlenmiştir (Çizelge 1)

Çizelge 1. Sondaj Raporu

Sondaj No.	Ağız Kotu (m)	Derinlik (m)	Alt Kotu (m)	Dolgu Kalınlığı (m)
SK15	+53.30	40.00	+13.30	10.00
SK17	+55.00	40.00	+15.00	13.50

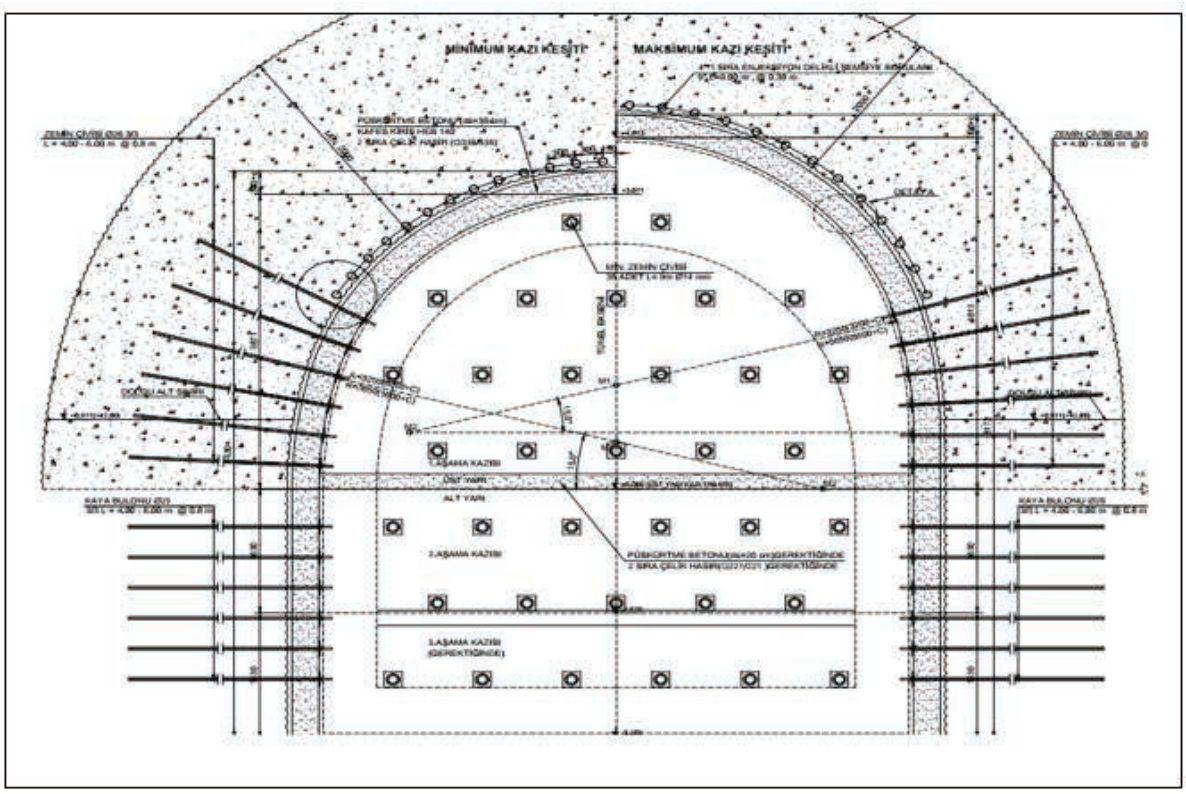
Şaft ve tünel kazı güzergahlarının dolgu malzeme ve aşırı zayıf dayanımlı kayaç (RMR<20) içerisinde olduğu Şekil.2 ve 3 ve Çizelge 1'de görülmektedir. Ayrıca Çizelge 2'de zeminden alınan numunelere yapılan basınç dayanım testinin sonuçları da görülmektedir.

Çizelge 2. Basınç dayanım sonuçları

Birim Hacim Ağırlık, Nokta Yükleme ve Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları					
Sondaj No.	Numune No	Derinlik (m)	D.B.H. A (kN/m^3)	qu (kg/cm^2)	Is (kg/cm^2)
SK15	K-1	20.00	25.70	620	-
SK17	K-1	16.50	26.30	701	-

Yapılan jeoteknik çalışmalar göz önünde bulundurularak İBB tünel destek sınıfları arasından A4 sınıfı tahkimat tipi seçilerek proje tasarımı yapılmıştır (Şekil 4).

Bu çalışmada, şehir-içi tünelciliğinde yapılan kazı çalışmaları ve saha uygulamalarında beklenmeyen durumlarda alınan çözümler anlatılacaktır.



Şekil.4 Tünel kazı-destek projesi

2 SAHA VE KAZI ÇALIŞMALARI

Öncelikle tünel taban kotuna ulaşıp ayna kazılarına başlamak için 15 m derinliğinde şaft (kuyu) yapılmıştır. Şaftın çapı 11 m olup mekanik kazı yöntemiyle başlanmıştır.

Fakat şaft (kuyu) kazısı esnasında, Şekil 5'te de görüldüğü gibi, belirlenen zemin jeolojisinin dışında bir formasyon (kireçtaşı) ile karşılaşılmıştır. Esasen kireçtaşı formasyonunun 12 m den sonra gözlenmesi beklenirken, 3 m den sonra tamamen kireçtaşı formasyonunun içerisinde kazıya devam edilmiştir. Mekanik olarak (ekskavatör yardımı ile) kazılmaya çalışılan zemin, kayaç sertliğinden dolayı buna imkan vermemiştir. Öncelikle zeminden numune alınarak basınç deneyleri yaptırılmıştır ve sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

Şekil 5. Şaft kazısı

Çizelge 3. Kayaç basınç deney sonuçları

Tarih/Date: 11/23/2017	LABORATUVARDA VEYA ARAZİDE UYGULAMA: *Application in laboratory or field*	ÖRNEK SABİTLEME GERECİ: *Type of specimen holder*				
ÖRNEK NO. *Sample No.*	ÖRNEKLEME DERİNLİĞİ *Depth of Sampling* (m)	*ÇEKİCİN KONUMU *Hammer Position*	DARBE SAYILARI, N *Rebound Numbers* (10 adet / 10 rebounds)	ORTALAMA N Average N	BİRİM HACIM AĞIRLIK *Unit Weight* γ (kN/m³)	** σ_c (MPa)	KAYAÇ TANIMI *Rock Description*
1		1	51-46-54-43-48-36-48-51-43-46	50	25.6	130±47	Foto ya Bakınız
2		1	46-40-53-42-48-50-49-39-48-49	50	25.0	125±25	
3		1	43-40-36-38-43-33-32-33-30-38	40	26.2	88±30	

** σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı (Şekil 8.6' daki grafikten)/*Uniaxial Compressive Strength (from the chart given in Figure 8.6)* * ÇEKİCİN KONUMU / *Position of Hammer*

Sonuçlardan da görüldüğü üzere kayaç dayanımı, proje aşamasında belirlenen (Çizelge 2) kayaç dayanımlarından çok daha yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. Tünel kazı aynası Şekil 6'da gösterilmiştir.Planlanmış olan A4 Tahkimat sınıfının bu formasyon yapısına uygun olmadığı, saha uygulamasında ve bilimsel çalışmalar neticesinde görülmüştür. Tünel güzergahının, araç trafik yoğunluğunun fazla olduğu D-100 karayolunun 4 m altından geçiyor olması, patlayıcı madde (dinamit) ile kazı yapılmasına engel teşkil etmektedir. Çünkü yukarıdan gelen yayılı ve dinamik yüklerin tünel konverjans sınırlarını zorlamaması istenmektedir. Farklı bir alternatif olarak daha emniyetli kazı yöntemlerinden biri olan kaya çatlatma yönteminin uygulanabileceği sunulmuştur (Şekil 7 ve 8). Böylelikle kayaç üzerinde süreksizlikler oluşturularak mekanik olarak kazı yapılabilmesine olanak sağlanacaktır.

Kaya çatlatma yönteminde kullanılan makine ekipmanlar;

- Martoperfaratör – Pnömatik sehpalı delici tabanca (Şekil 7)
- Kaya çatlatıcı kartuş (Şekil 8)
- Bağlantı kablosu
- Manyeto (12 Volt)

Şekil.6 Tünel kazı aynası

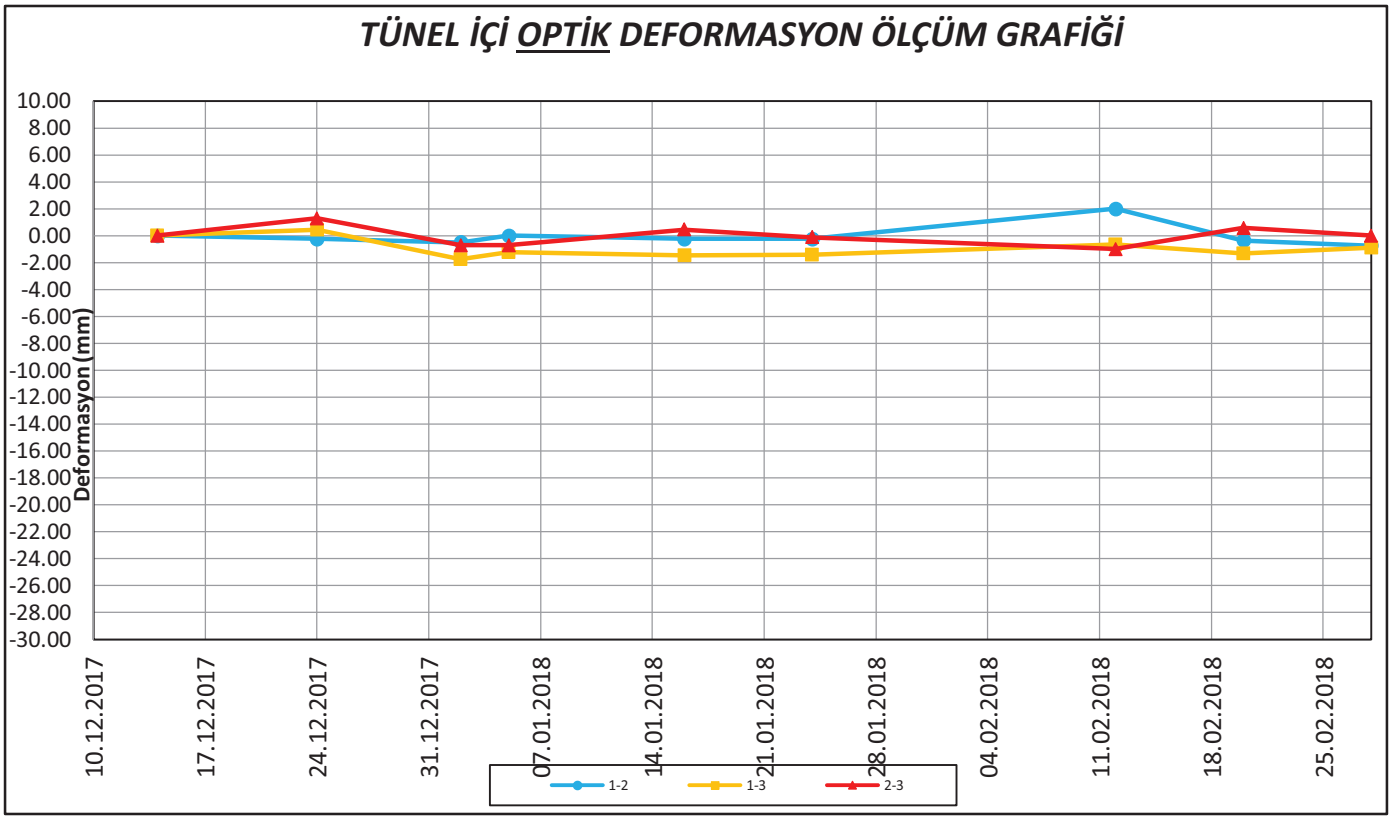
Şekil.7 Kaya çatlatma için delgisi yapılması

Şekil.8 Kaya çatlatıcı kartuş ve uygulaması

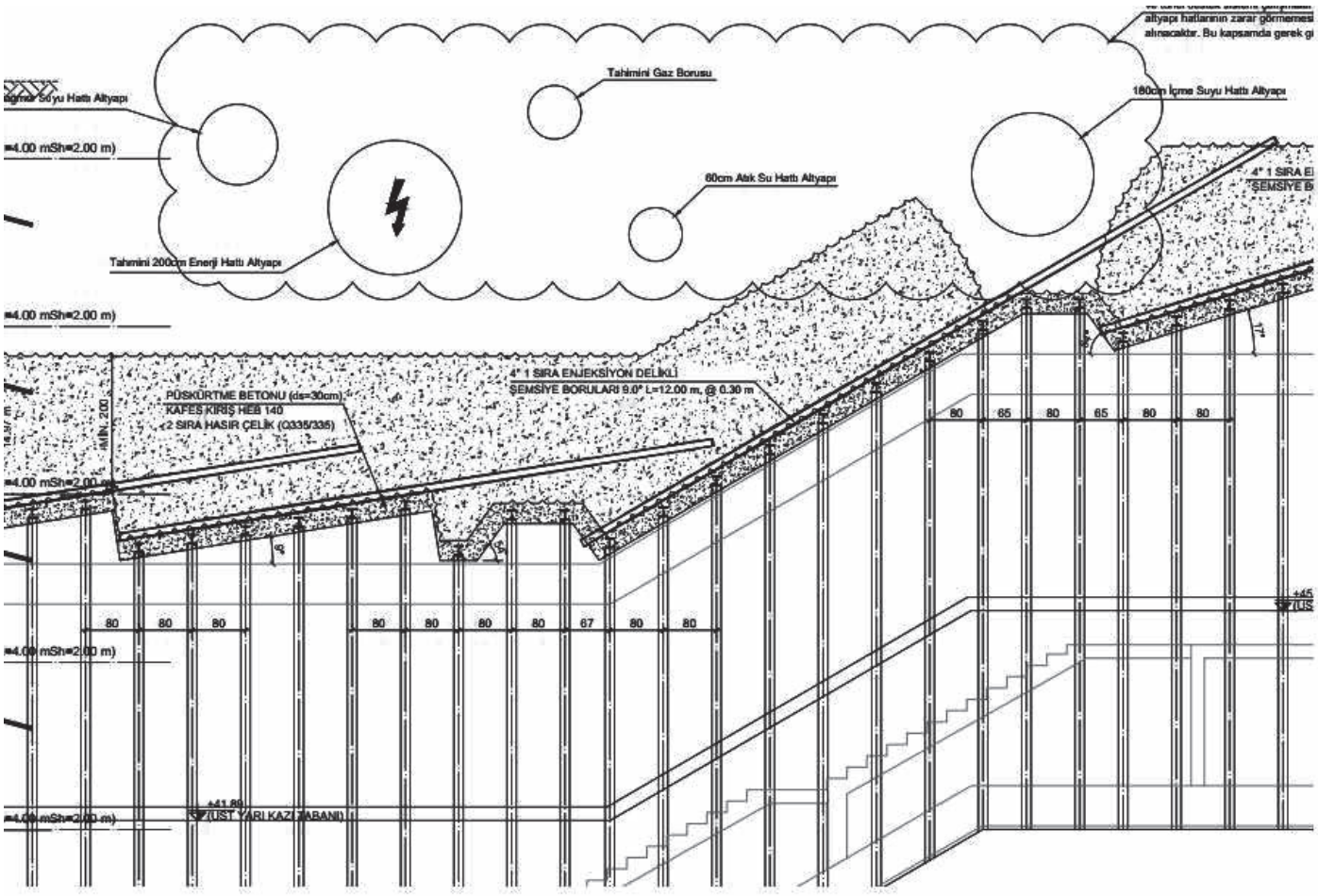
Öncelikle çatlatma yapılacak kayaç bölgeleri belirlenerek işaretleme yapılmaktadır. Daha sonrasında havalı delgi tabancası ile delgi yapılıp, yetkinliğe sahip bir personel tarafından kartuşlar deliklere yerleştirilmektedir (Şekil 8). Bağlantı kablolarının yardımıyla paralel akım yöntemine bağlı kalınarak manyetoya bağlanan kartuşlar düşük enerji ile ateşleme yapılarak kayacın çatlamasını sağlamaktadır (Şekil 9 ve 10). Kabul gören kazı yöntemi ile hem tünel içerisinde oluşabilecek deformasyon (Şekil 11) riski ortadan kaldırılmıştır, hem de deplasesi yapılmamış olan enerji, doğal gaz, atık su, yağmur suyu, içme suyu hatlarının altından emniyetli bir şekilde geçilmiştir (Şekil 12). Tünel güzergah planı Şekil 13'de, tünelin mevcut durumu ise Şekil 14'de gösterilmiştir.

Şekil.9 Manyeto

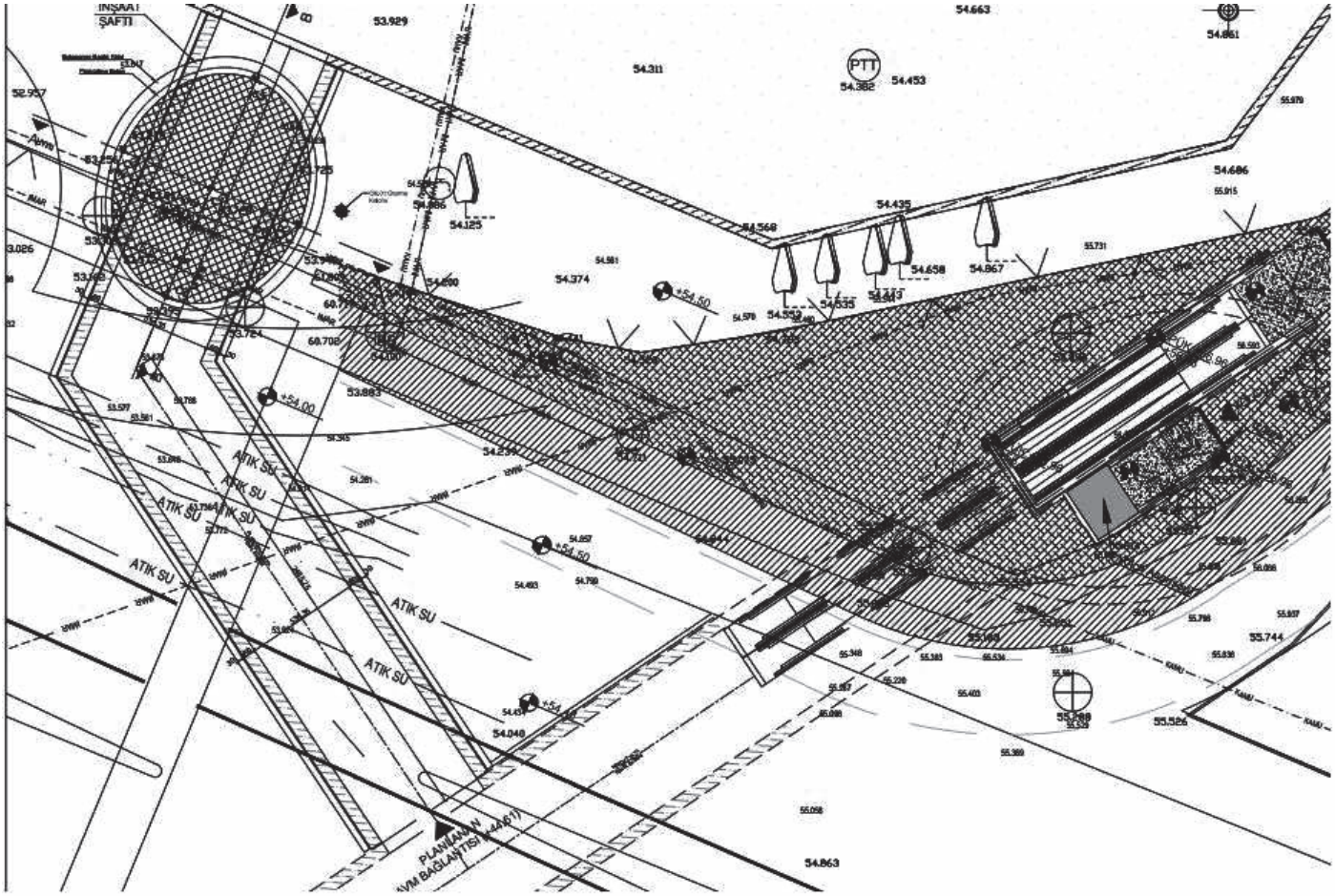
Şekil 10. Kazı aynasına kaya çatlatıcı kartuş dolumu



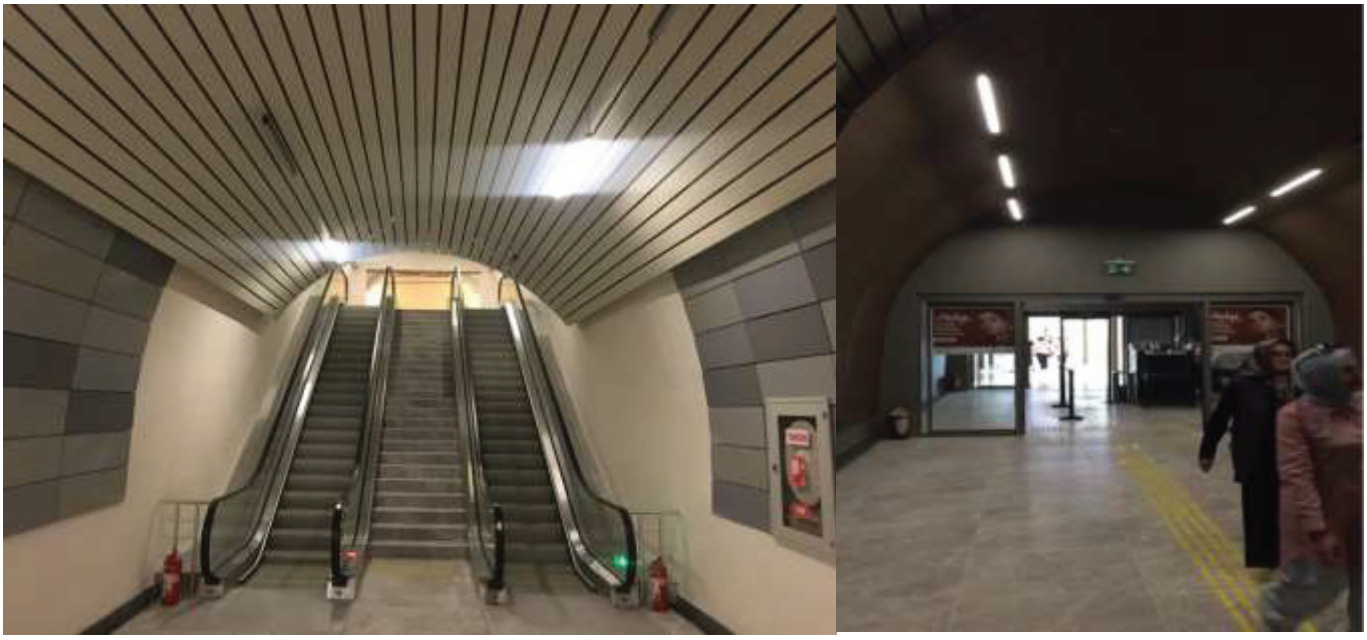
Şekil 11. Tünel içi optik deformasyon ölçüm grafiği



Şekil 12. Deplase edilmemiş altyapı hatları



Şekil.13 Tünel güzergah planı



Şekil 14. Tünel mevcut durumu

3 SONUÇLAR

Sonuç olarak şehir içi tünelciliğinde jeoteknik hesap raporu oluşturulmadan önce, tünel yapılması planlanan güzergah üzerinde daha fazla sondaj yapılmalıdır. Böylece elde edilen

veriler doğrultusunda doğru tasarım yapılmış olunacaktır. Ayıca saha çalışmalarına başlanmadan önce, deplasesi yapılması gereken altyapı hatları mutlak suretle belirlenmelidir.

Aksi taktirde olası kazaların gerçekleşmesi kaçınılmazdır. Tünel güzergahı üzerinden geçen araç yolunu deforme etmeden, Kaya Çatlatıcı Kartuş yardımı ile kazı işleri tamamlanmış olup, proje hayata geçirilmiştir.

KAYNAKLAR

MTA, 1/500 000 ölçekli jeoloji hairitası.

Tünel-Derin Kazı Etkileşimi, (Çekmeköy Sultanbeyli Metro Hattı Sarıgazi İstasyonu Vaka Analizi)

Tunnel-Deep Excavation Interaction, (Çekmeköy Sultanbeyli Metro Line Sarıgazi Station Case Study)

K. Yıldırım, A. S. Peker, B. K. Beşli, Y. E. Susuz

Tekfen Mühendislik, İstanbul

ÖZET: Metro yapım çalışmaları tüm dünyada zorlu bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Bunun temel nedenleri, istasyonların birçok fonksiyonu bir arada barındıran kompakt yapısı, metro güzergahının çoğu zaman yoğun yapılaşma alanlarından geçmesi sebebiyle oluşan yüzey etkileşimleri ve iş programındaki kritik sürelerdir. Bu kısıtlar altında efektif çalışma koşullarının oluşturulabilmesi için yüzey etkileşimlerine ek olarak, yapım iş programına uygun tasarımların oluşturulması önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, istasyon derin kazı iksa çalışmaları ile tünel kazı destek çalışmalarının etkileşimine ilişkin bir vaka çalışmasının anlatılması amaçlanmaktadır. Doğu – Batı doğrultulu Çekmeköy – Sultanbeyli metro hattı ile Kuzey – Güney doğrultulu Taşdelen – Yenidoğan metro hattının kesişiminde bulunan Sarıgazi istasyonu bir aktarma istasyonu olarak projelendirilmiştir. İş programı sebebiyle öncelikli olarak tünel kazı destek çalışmaları tamamlanması, ardından istasyon derin kazı iksa kazılarına başlanması planlanmıştır. Tasarımda yapım aşamaları dikkate alınarak tünel kazı destek ve iksa kazı aşamaları modellenmiştir. Tasarım aşamasında düşey ve yatayda oluşacak iki tür etkileşimin etkileri incelenmiştir. Birinci durum derin kazı nedeniyle tüneller üzerinde oluşacak yukarı yönlü zemin/kaya birimin ferahlama (unloading) etkisi, ikinci durum ise sığ seviyedeki tünellerin yanlarında yapılacak kazıya bağlı yanal deformasyon etkisidir. Analiz sonuçlarında aşağıdaki bulgular tesbit edilmiş ve bunlar yapım aşamasındaki deformasyon gözlemleri ile de teyit edilmiştir. Birinci durumda kaya kütlesinin ferahlamasının (unloading) kaya rijitliğine bağlı olduğu ve kaya ferahlamasının (unloading) beklenenden düşük olduğu belirlenmiştir. İkinci durumda ise, tünellerin yanal deformasyona karşı çok hassas olduğu tespit edilmiş, mevcut tünel imalatlarının yanında yapılacak kazılar esnasında sahadaki duruma uygun tasarım yapılmasının önemi vurgulanmıştır.

ABSTRACT: Metro construction works constitute a challenging work area all over the world. The main reasons for this are the compact structure of the stations, which combine many functions, the surface interactions that occur due to the alignment passing through dense construction areas, and the critical times in the work schedule. In order to create effective working conditions under these constraints, in addition to surface interactions, it is important to create designs suitable for the construction work schedule. In this study, it is aimed to describe a case study on the interaction of station deep excavation support system and tunnel excavations. Sarıgazi station, located at the intersection of the Çekmeköy - Sultanbeyli metro line in the East - West direction and the Taşdelen - Yenidogan metro line in the North - South direction, was designed as a transfer station. Due to the work schedule, it is planned to complete the tunnel

excavation support works first and then start the station deep excavation of station. In the design phase, the tunnel excavation support and excavation support system stages are modeled, considering the construction stages. The effects of two types of interaction, which will occur in the vertical and horizontal, were examined during the design stage. The first case is the unloading effect of the upward soil/rock layer that will occur on the tunnels due to deep excavation, and the second case is the lateral deformation effect due to the excavation to be made on the sides of the shallow tunnels. The following findings were determined in the analysis results, and these were also confirmed by the deformation observations during the construction phase. In the first case, it was determined that the unloading of the rock mass was dependent on the rock stiffness and the rock unloading was lower than expected. In the second case, it has been determined that the tunnels are very sensitive to lateral deformation, and the importance of designing according to the situation in the field during the excavations to be made besides the existing tunnel constructions has been emphasized.

1 GİRİŞ

Şehir içinde yapılan yer altı kazıları tüm dünyada çoğu zaman çok zorlu bir iş olmuştur. Özellikle metro işleri gibi göreceli daha büyük kazıların olması, yoğun yapılaşmanın ve sıkışık iş programlarının olduğu projelerde işverenlere büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Bu çalışmada bir metro projesindeki, istasyon derin kazısı ile bu bölgede bulunan tünellerin etkileşimi incelenecektir. Proje; Çekmeköy-Sancaktepe Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane)–Taşdelen-Yenidoğan Metro Hattı Projesi (ÇSS-YCE) her iki ana hat ve bağlantı hatları ile birlikte toplam ~17 km uzunluğunda imal edilecek metro hattı; ana hat tünelleri ve toplamda 13 adet istasyon yapısı içermekte olan bir toplu taşıma sisteminden oluşmaktadır. Çalışmaya konu olan ise iki hattın kesişim istasyonu olan Sarıgazi İstasyonu'dur. Bu istasyon iki hattın kesişim istasyonu olması sebebiyle, istasyon bölgesinde farklı kotlarda çok sayıda tünel bulunmaktadır. Bu sebeple kazı destek sistemi tasarımı yapılırken bu tüneller de göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 1'de iki hat güzergahı ve ikisinin kesişim istasyonu olan Sarıgazi istasyonu bulunmaktadır.

Şekil 1. Proje güzergâhı yer bulduru haritası

Jeoteknik tasarımda esas olan, sahadaki imalat aşaması ile modellenen durumun birbirine uygun olmasıdır. Bu metro imalatında, daha önceden belirtildiği gibi çok sıkı iş programından dolayı tünel imalatları öncelikle yapılmış, kalıcı kaplamaları bitirilmiş, daha sonra istasyon derin kazısına geçilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ve farklı tasarımlar incelendiğinde, genel olarak tüneller ile kazıların bağımsız ele alındığı veya daha çok tünellerin veya kazıların mevcut durumdaki üst yapılarla olan ilişkisinin incelendiği görülmektedir. Ayrıca yeni açılacak olan bir tünelin mevcutta bulunan tünellere etkisinin de incelendiği çok fazla sayıda akademik çalışma bulunmaktadır. (Lee, 1994; Tang, 2006; Erçelebi, 2005; Shui-Long Shen, 2014; Allen, 2010).

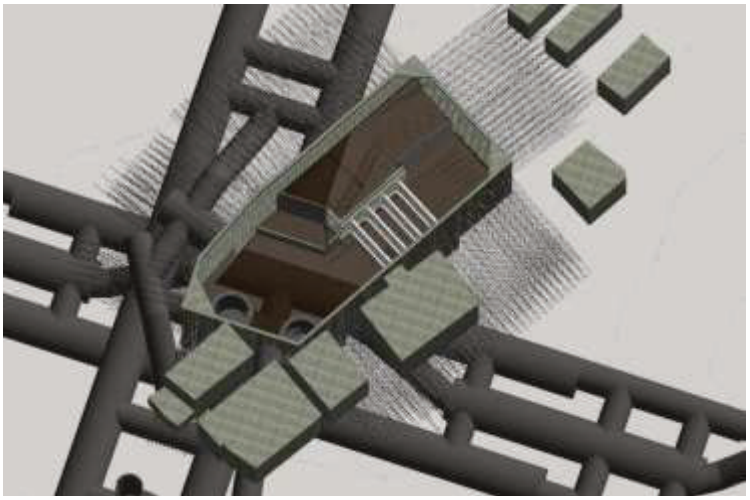
Bu çalışmada, Sarıgazi istasyonu derin kazısı ile ÇSS ve YCE hatlarına ait tünellerin etkileşimi incelenmiş ve sahada alınan verilerle analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Derin kazı tasarımı yapılırken istasyon kazısı kotundaki YCE tünelleri ile daha derinde olan ve istasyon kazısının altından geçen ÇSS tünelleri için farklı yaklaşımlar yapılmış ve sahadaki gözlemlerle sonuçlar kıyaslanmıştır.

2 PROJE ÖZELLİKLERİ

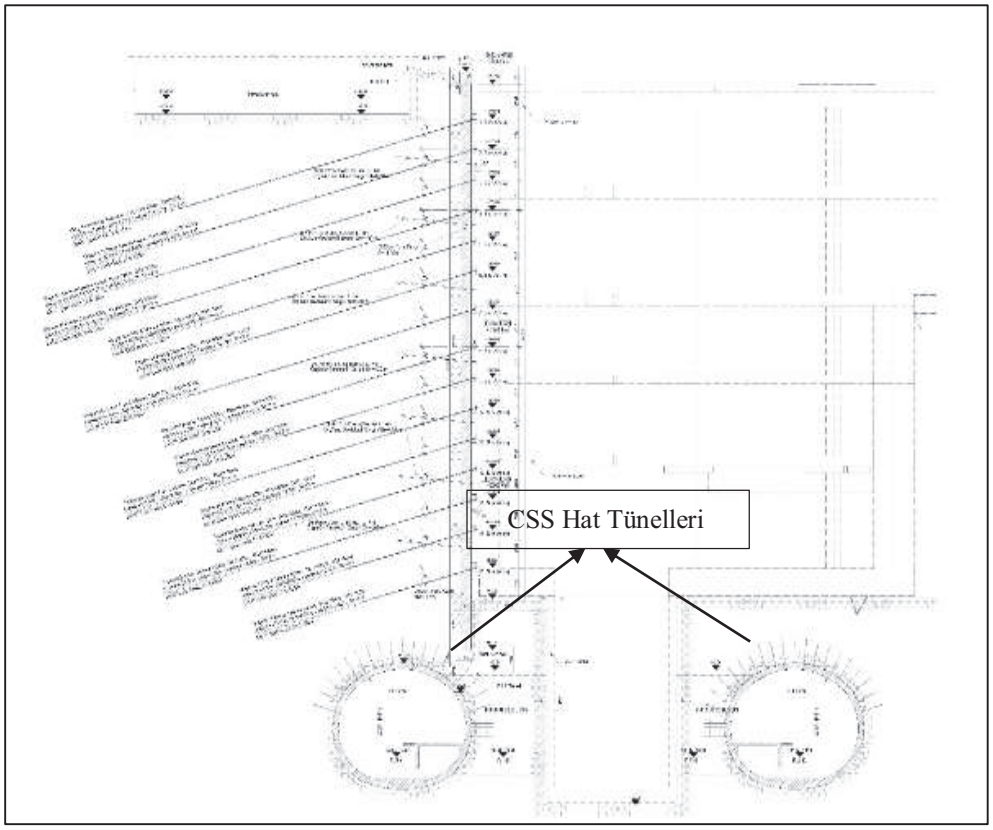
Sarıgazi İstasyonu ÇSS ve YCE hatlarının kesişim istasyonudur. İstasyon kazısı minimumda 15.5m, maksimumda ise 34.65m'dir. (Şekil 2). ÇSS hat tünelleri kalıcı kaplama üst kotu 38.9m derinde iken YCE hat tünellerinin ise 19.4m derinliktedir. Şekil 2' de istasyon derin kazı destekleme tasarımı, ÇSS ve YCE hat tünelleri ve çevre yapılar gösterilmiştir. Şekil 2'den de görüleceği gibi ÇSS hat tünelleri iksa kazısı altından geçmekte iken, YCE hat tünelleri ise istasyon içinden geçecek şekilde tasarlanmıştır.

İksa sistemi 100cm arayla yerleştirilmiş Ø80cm çapında, 15-40m uzunlukta kazıklardan ve en kritik kesitte 15 sıra 3x 0.6' ve 4x 0.6' ankrajlardan oluşmaktadır. Orta bölgede ise YCE tünellerinde deplasmanı engellemek amacıyla çelik borulu bir destek sistemi seçilmiştir. ÇSS tünelleri ile destek sistemi Şekil 3'te, YCE tünelleri ile destek sistemi ise Şekil 4'te verilmiştir.

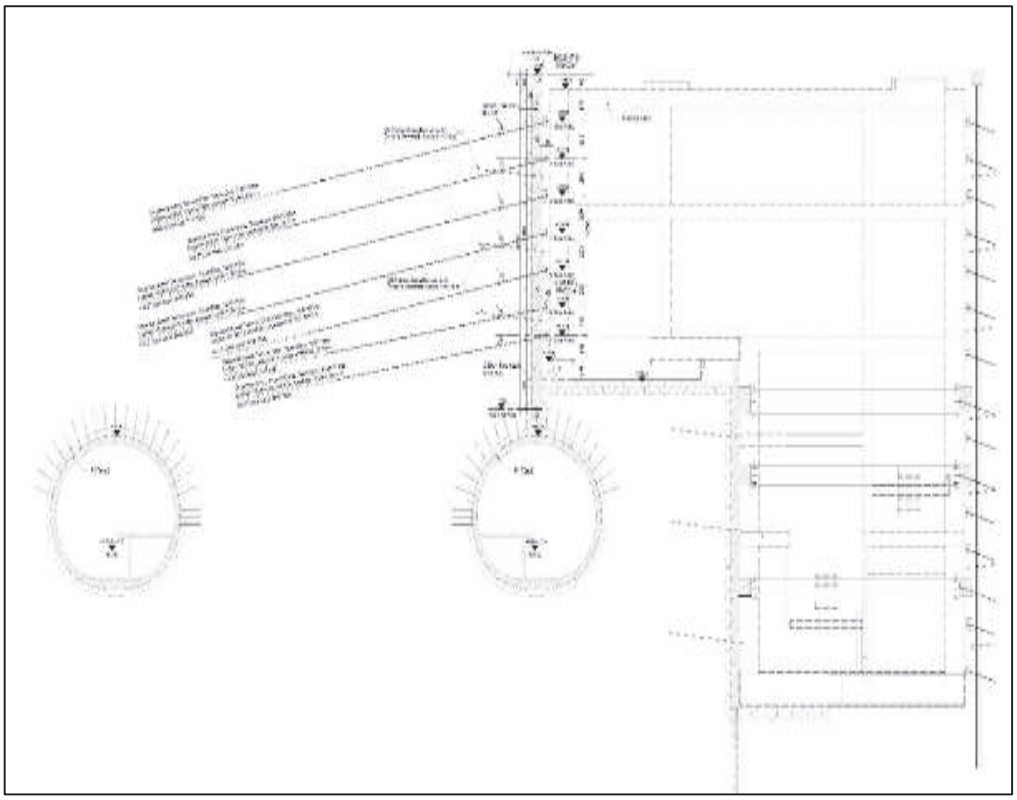
ÇSS hat tünelleri kazıları genel olarak A3 destek sisteminde ve sürenli olarak yapılmıştır. Kazı esnasında ara ara yoğun su akışlarının olduğu bilgisi saha tarafından iletilmiştir. YCE tünelleri ise genel olarak A4 destek sisteminde umbrellalı olarak açılmıştır. Kazı esnasında genel olarak aynaların kuru veya nemli olduğu, kaya biriminin ise ayrışmış-çok ayrışmış özellikte olduğu belirtilmiştir. Kayanın iyi olduğu yerlerde de A3 destek sistemi de kullanılmıştır.



Şekil 2. Sarıgazi İstasyonu derin kazı destek sistemi ve çevresinde bulunan tüneller ve yapılar



Şekil 3. ÇSS hat tünelleri ile kazı destek sistemi (Kesit 1)



Şekil 4. YCE hat tünelleri ile kazı destek sistemi (Kesit 2)

3 JEOLOJİK FORMASYON

Hat üzerinde genel itibariyle Pelitli Formasyonu, Pendik Formasyonu ve Sultanbeyli Formasyonu bulunmaktadır. Formasyonun genel birimleri aşağıda verilmiştir. Devamında bölgesele jeoloji ve saha çalışmaları anlatılmıştır.

3.1 Genel Jeoloji

3.1.1 Pelitli formasyonu (SDp)

Pelitli Formasyonu büyük bölümüyle kireçtaşından oluşur; değişik düzeylerinde değişen oranda kil ara katkılıdır. Resif ve sığ deniz kireçtaşlarıyla başlar, üst kesiminde yumrulu kireçtaşlarıyla son bulur.

3.1.2 Pendik Formasyonu (Dp)

Pendik Formasyonu büyük bölümüyle, mika pullu, kil-mil boyu ince kırıntılı kayaçlardan oluşur; belirli düzeylerinde özellikle üst kesimlerinde kireçtaşı arakatkılıdır. Bol makrofosil kapsamasıyla ayırtman olan ve bu özelliği ile sahada kolay izlenebilen formasyon, İstanbul'un Anadolu yakasında geniş alanlar kaplar.

3.1.3 Sultanbeyli Formasyonu (Ts)

Sultanbeyli, Kurtköy, Orhanlı, Kurnaköy köyleri arasında ve Kılıçlı – Riva (Çayağzı) dolaylarında geniş alanlar kaplayan kum, çakıl birikintileri için (Özgül, 2005) Ömerli Formasyonu kapsamında "Sultanbeyli Üyesi" adını kullanmıştır.

3.2 Yerel Jeoloji

Çekmeköy-Sultanbeyli metro hattı projesi kapsamında Çekmeköy-Meclis Mahallesi- Sarıgazi-Samandıra istasyonu bölgelerinde yapılan sondaj çalışmalarına göre; genel olarak üst seviyelerde Sultanbeyli Formasyonu (Ts) kumlu, çok katı-sert kil, killi sıkı-çok sıkı kum birimleri, derinlere doğru ve yer yer üst seviyelerde Pendik Formayonu (Dp); kırıklı çatlaklı, parçalı, zayıf-orta kaliteli kireçtaşı, birimleri gözlenmiştir.

3.3 Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları

Sarıgazi istasyonu bölgesinde yapılan CSS-08, CSS-09, ICSS-10, ICSS-11, ICSS-12 ve ICSS-13 sondajlarına göre, yüzeyde dolgu, dolgunun altında ise kumlu/çakıllı kil, daha sonra kiltaşı/kireçtaşı birimleri görülmektedir. Sondaj bilgileri Çizelge 1'de verilmiştir.

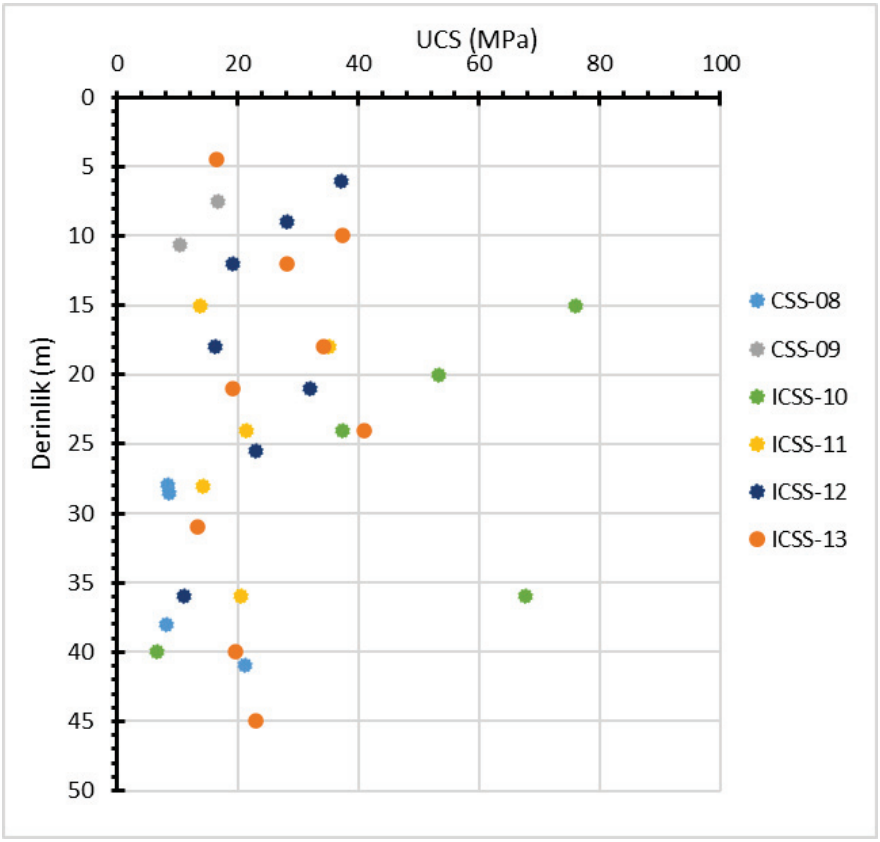
İnceleme alanında yapılan sondajlara göre sahada kiltaşı ve kireçtaşı birimleri bulunmaktadır. Yapılan laboratuvar deneyleri göz önünde bulundurulduğunda kaya birimlerinin birbirine benzer dayanımda olduğu görülmektedir. (Şekil 5) Bundan dolayı iki birim birlikte tek bir kaya birimi olarak değerlendirilmiş ve aynı parametre kullanılmıştır. Kaya birimi için kullanılacak parametreler hesaplanırken öncelikle Hoek-Brown ve eşdeğer Mohr-Coulomb parametresi hesaplanmış daha sonra bunlar göz önünde bulundurularak, güvenli tarafta kalmak suretiyle parametre seçilmiştir.

İksa sistemlerinde, tünellerden farklı olarak kaya birimlerindeki çatlak ve tabakalanmalar sistemdeki yapısal elemanlarda ciddi bir tesir artışına sebep olmaktadır. Tünellerde ise kemerlenme etkisinden dolayı, tünel kaplamasında bu şekilde bir yük artışı gözlenmemektedir.

Bununla birlikte, aç-kapa kazılarında imalat kalitesinin ve hava koşullarının bütün sistemin güvenliğine etkisinin öngörülemeyecek derecede fazla olması sebebiyle, dayanım parametresi en kritik durum göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Çizelge 1. Sarıgazi İstasyonu bölgesinde gerçekleştirilen sondajlar

Sondaj No	Ağız Kotu (m)	Sondaj Derinliği (m)	Dolgu Kalınlığı (m)	Zemin Derinliği / Kayaya Giriş Derinliği (m)	Yass (m)
CSS-08	130.4	54.0	1.7	9.0	5.6
CSS-09	131.8	54.0	0.9	0.9	14.6
ICSS-10	132.9	55.0	1.0	10.0	3.5
ICSS-11	131.3	40.0	1.5	12.0	8.5
ICSS-12	130.5	40.0	1.5	3.7	8.0
ICSS-13	133.8	55.0	1.5	4.0	9.0



Şekil 5. UCS değerlerinin derinlikle değişimi

Sondaj karot sandık fotoğrafları ve UCS çizelgesi göz önünde bulundurulduğunda kaya birim için bir geçiş görülmediğinden, iksa analizlerinde kaya birimi tek bir tabaka olarak alınmış ve güvenli bir parametre seçilmiştir (Çizelge 2).

İdealize profiller oluşturulurken YCE ve ÇSS hatlarının tünel kotları ve deplasman etkileşimleri göz önünde bulundurularak parametre seçimi yapılmıştır. Buna göre YCE tünelleri Şekil 4'ten de görüleceği üzere iksa sisteminin kazı içine doğru olan hareketinden etkileneceği için bu tünel kapasiteleri iksa parametreleri ile çözülen modellerle kontrol edilmiştir. ÇSS hat tünelleri ise Şekil 3'te de görüleceği üzere iksa sisteminin kazı içine olan deplasmanın ziyade üstündeki örtü yükünün kaldırılmasından dolayı oluşacak hareketten etkilenecektir. Bu sebeple ÇSS hat tünelleri kaya parametresinin daha rijit hareket edeceği göz önünde bulundurularak ayrı bir parametre seti ile analiz edilerek kapasiteleri kontrol edilmiştir. Buna göre ÇSS ve YCE tünel analizlerinde kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir. Birim derinlikleri iksa eksenine göre belirtilmiştir. Sondaj konumuna göre kil birimi derinliğine göre idealize profil düzenlenmiştir.

Çizelge 2. ÇSS hat tüneli analizlerinde kullanılan parametreler

Birim	**Tabaka Kalınlığı**		**γ**	**c'**	**Ø'**	**E**
	Baş.	**Bitiş**				
-	m	m	kN/m^3	kPa	^{o}	MPa
Dolgu	0.0	1.5	18	1	28	15
Katı Kil	1.5	10.0	19	10	29	25
Ayrışmış Kireçtaşı	10.0	15.0	22	79	26	117
Orta Sağlam Kireçtaşı	15.0	-	26	168	35	498

Çizelge 3. YCE hat tüneli ve iksa analizlerinde kullanılan parametreler

Birim	**Tabaka Kalınlığı**		**γ**	**c'**	**Ø'**	**E**
	Baş.	**Bitiş**				
-	m	m	kN/m^3	kPa	^{o}	MPa
Dolgu	0.0	1.5	18	1	28	15
Katı Kil	1.5	4.5	19	10	29	25
Kireçtaşı	4.5	-	26	100	38	250

4 ANALİZLER VE SONUÇLARI

Analizler yapılırken Bölüm 3'te anlatıldığı gibi YCE hat tünelleri, kazıkların iksa içine doğru deplasmanın etkileneceği göz önünde bulundurularak iksa parametreleriyle, ÇSS hat tünelleri ise kaya biriminin ferahlama etkisinden dolayı yukarı yönlü hareket edebileceği göz önünde bulundurularak tünel parametreleriyle çözülmüştür. ÇSS tünellerinin olduğu bölgedeki iksa elemanları iksa parametresiyle ayrıca çözülmüştür.

Analizler ayrıca sahada iksa sistemi içerisinden alınan verilerle kıyaslanmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Çalışmalar Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir Analizlerde zemin ve kayanın inelastik, lineer olmayan davranışının modellenmesinde "Pekleşen Zemin-Hardening Soil Model" modeli kullanılmıştır. Bu model, Mohr-Coulomb modelinden farklı olarak gerilmeye bağlı olarak rijitlik değişimini hesaplayabildiği için deformasyonları daha gerçekçi göstermektedir. Bölüm 3'te verilen zemin parametreleri ve idealize zemin profili kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde deformasyonlar belirlenmiş ve tünellerdeki kapasite diyagramları kontrol edilmiştir.

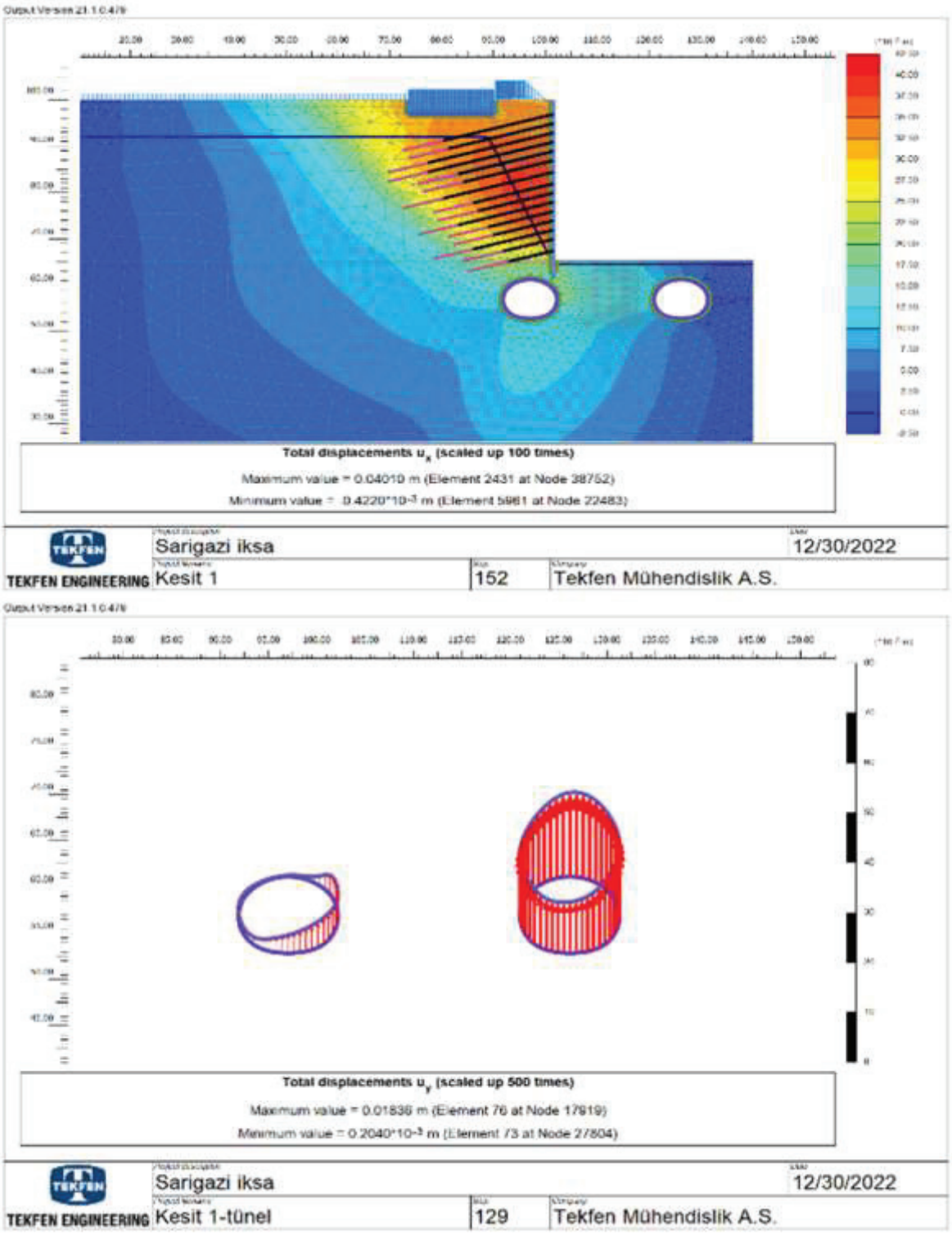
4.1 Deplasman Kontrolü ve Kapasite Tahkiki

Deplasman kontrolleri yapılırken iksa kazıkları deplasmanına ve tünel deplasmanlarına ayrı ayrı bakılmıştır. Kazık deplasmanları için literatürde yaygın olarak kazı yüksekliğinin % 0.2 ise % 0.5'i arasında kalması önerilmektedir. (T.C.Ç.Ş.B. 2018) Kontroller bu çerçevede yapılmıştır. Tüneller için ise deplasmanlar çok düşük düzeylerde olduğu için kapasite diyagramları üstünden kontroller yapılmıştır. Analiz sonuçları ve kapasite diyagramları aşağıda verilmiştir.

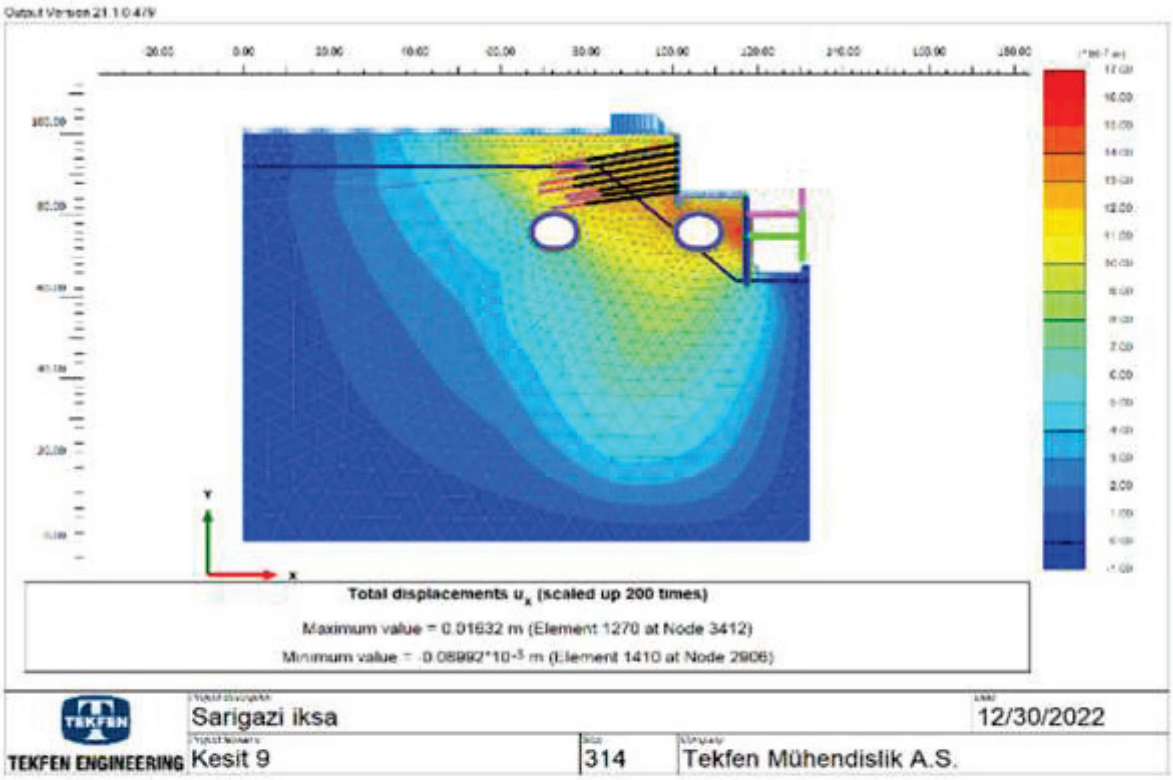
Buna göre, ÇSS tünel bölgesinde iksa kazıklarında maksimum 4cm deplasman beklenirken, ÇSS hat tünellerinde ise yukarı yönlü 1.84cm deplasman oluşması beklenmektedir (Şekil 6). Kazık deplasmanları teknik olarak herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Kapasite diyagramları kontrol edildiğinde kazık arkasında kalan ÇSS Hat 2 tünellerinde herhangi bir sorun beklenmezken, üstünden yük kaldırılan, derin kazı sisteminin altından geçen ÇSS Hat 1

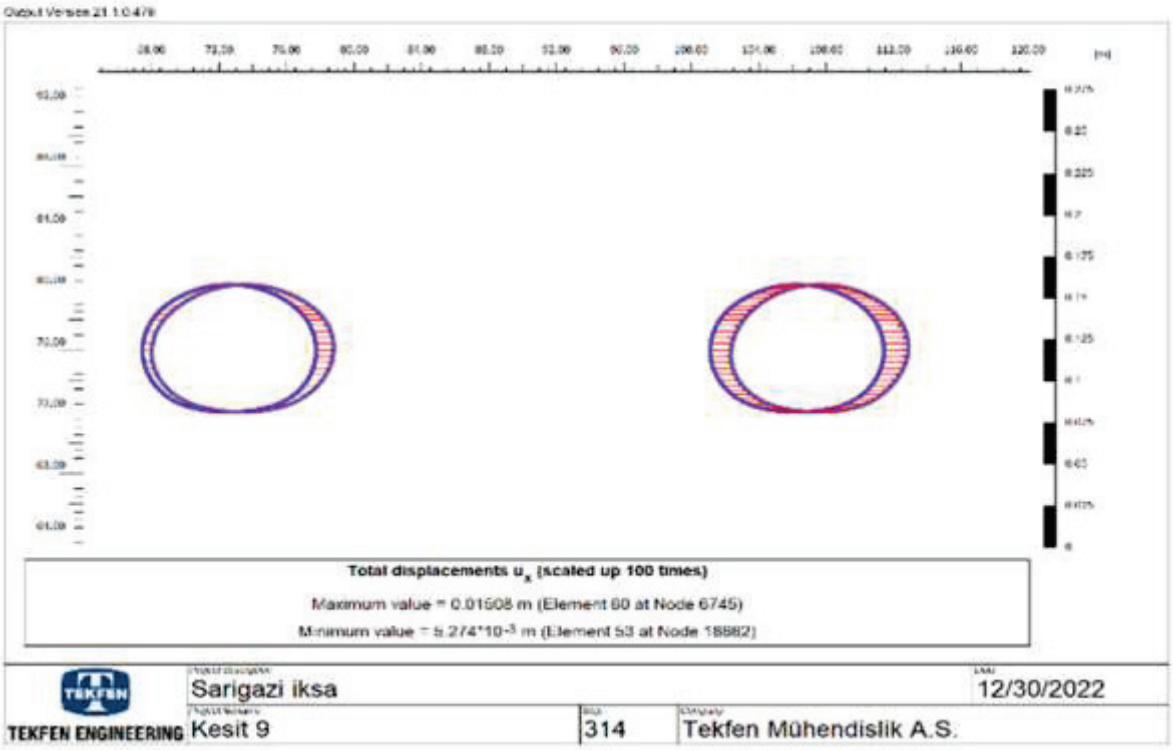
tünellerinde ise moment ve eksenel kuvvetin ciddi ölçüde arttığı görülmektedir. Fakat kapasite olarak herhangi bir sorun beklenmemektedir (Şekil 6).

YCE tünelleri bölgesinde ise, özellikle alt bölgede boru destekli rijit bir sistem seçildiği halde kazıklarda 1.6 cm deplasman oluşurken, tünellerde ise yatay yönlü 1.51cm deplasman oluşması beklenmektedir (Şekil 7). Kapasite diyagramlarında ise YCE hat tünellerinin çok kritik olduğu görülmektedir (Şekil 8).

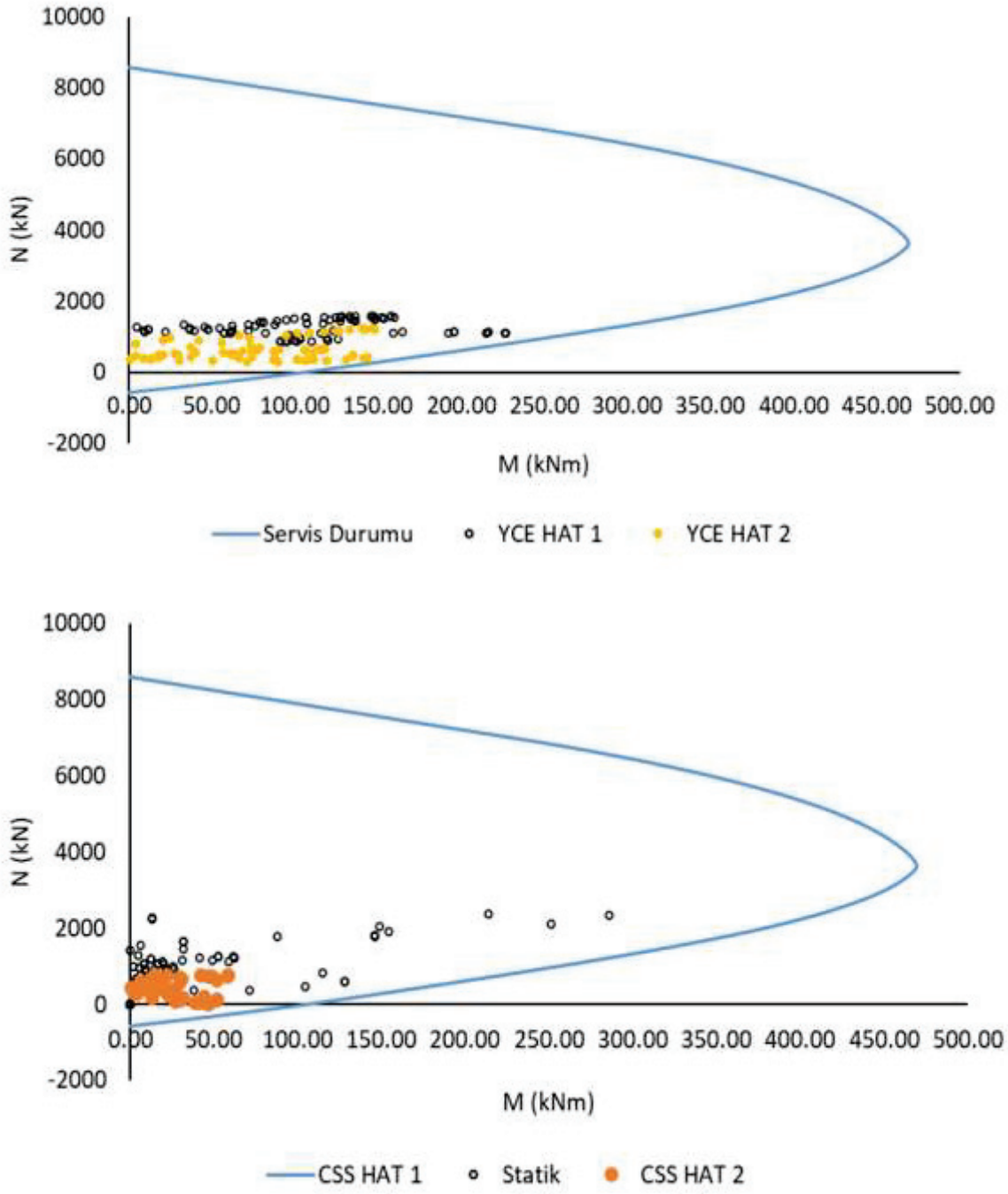


Şekil 6. CSS hat tünelleri bölgesi iksa ve tünel deplasmanları





Şekil 7. YCE hat tünelleri iksa ve tünel deplasmanları

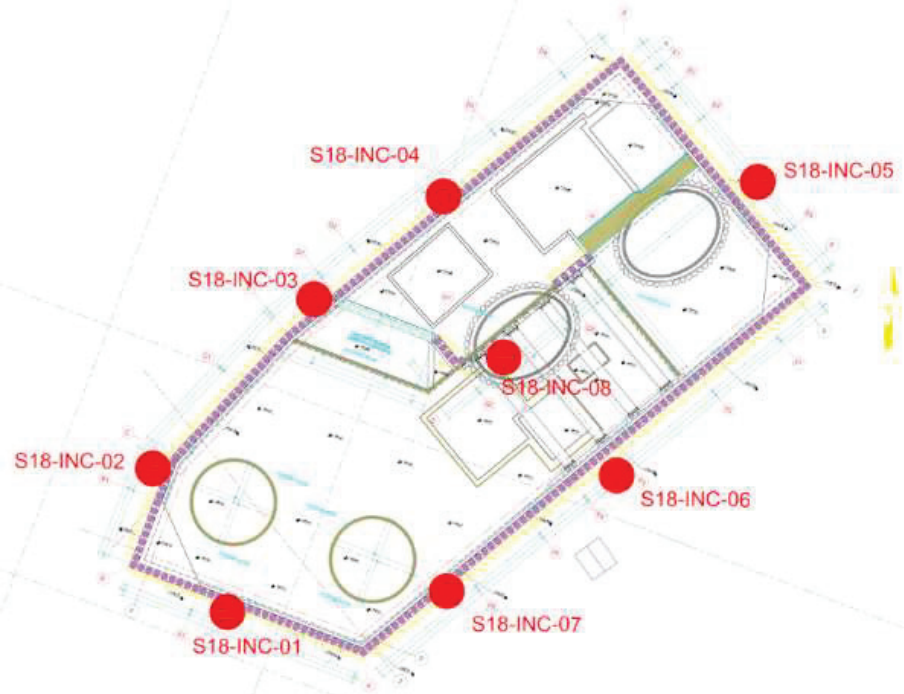


Şekil 8. ÇSS ve YCE hat tünelleri kapasite diyagramları

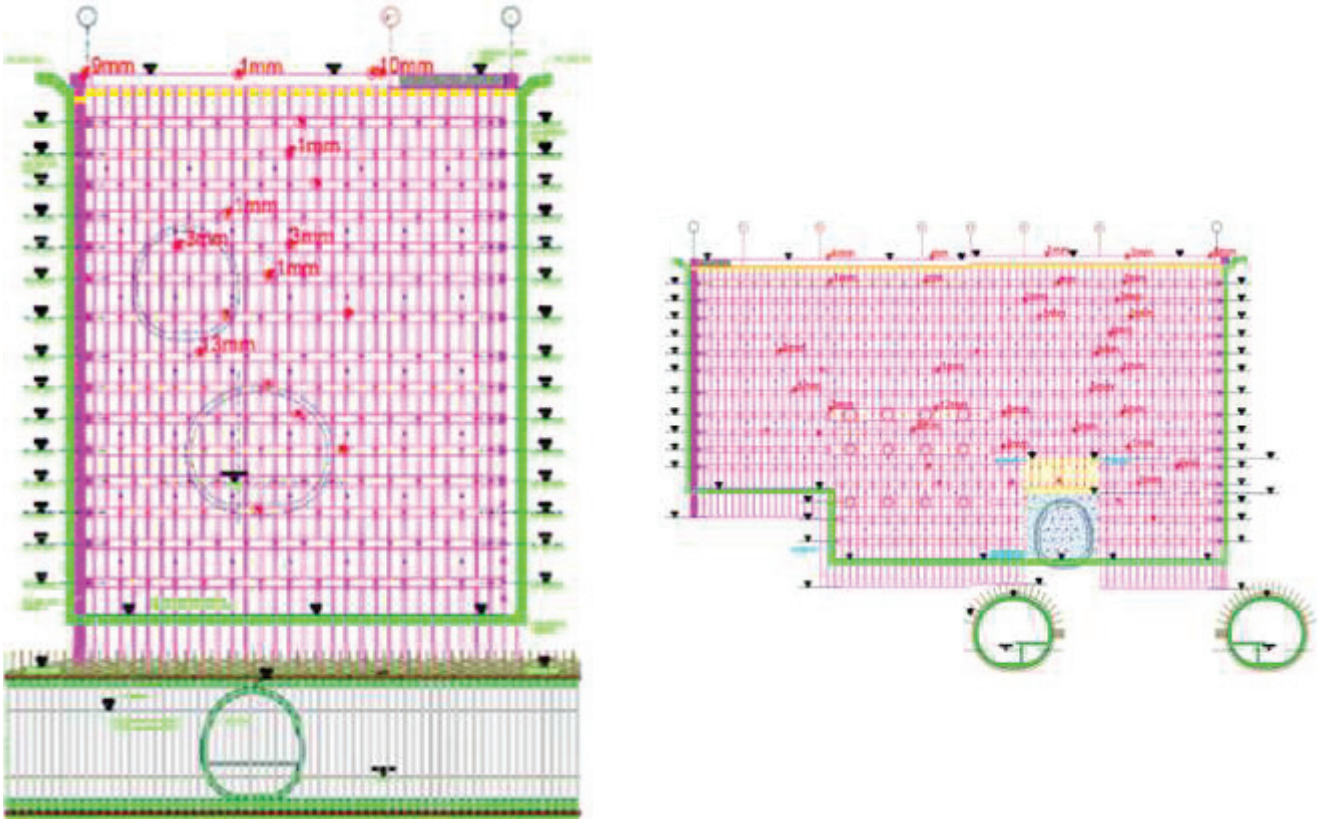
4.2 Saha Ölçümleri ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kazı çalışmaları sırasında inklinometre, reflektör, gerinim ölçer ve ekstansometre gibi çok sayıda geoteknik enstrümantasyon kullanılmıştır. İnklinometre planı Şekil 9'da verilmiştir.

ÇSS tünellerinin bulunduğu A-B aksından alınan inklinometre (INC-01) ve reflektör okumalarına göre bu cephede 1.0-1.3cm mertebesinde deplasman görülmüştür. Benzer yüksekliklere sahip F-A aksında (INC-07) ise tam kazı durumunda 4cm'e varan deplasmanlar görülmüş, üst yapı imalatının devam etmesi ile birlikte deplasmanlar 2.5cm'e düşmüştür (Şekil 10 ve Şekil 11).



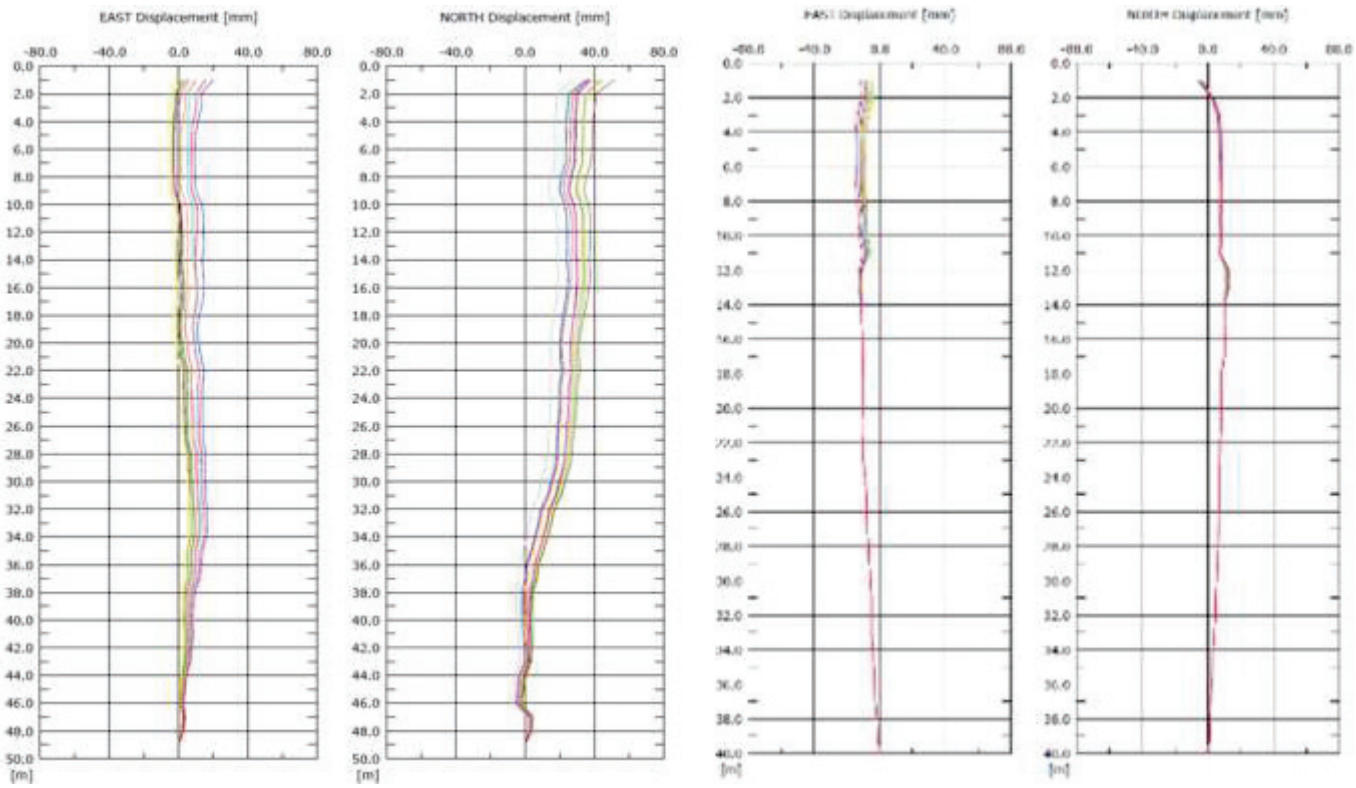
Şekil 9. İnklinometre planı



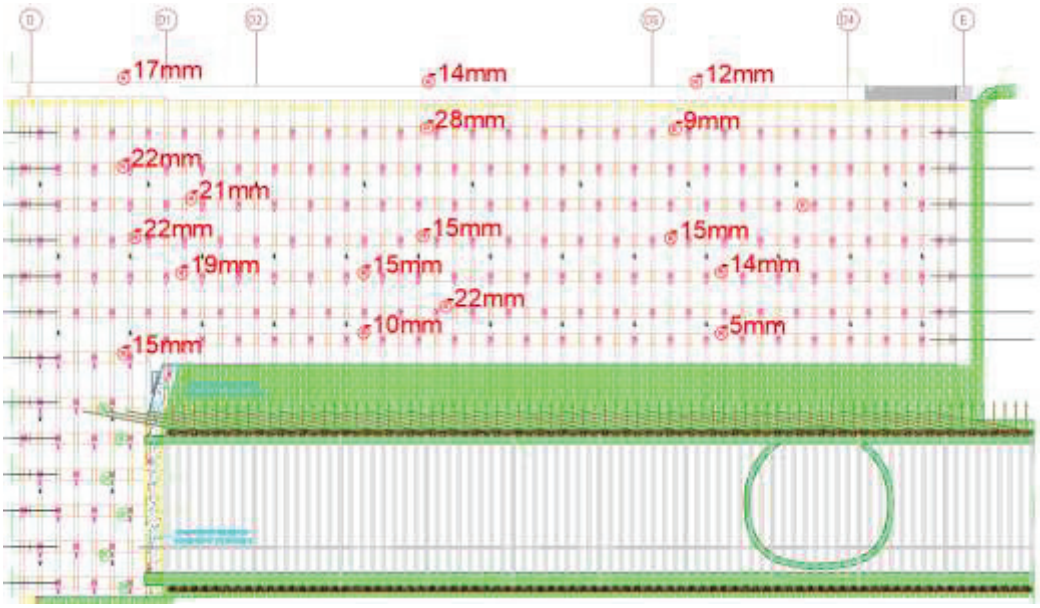
Şekil 10. A-B ve F-A cepheleri reflektör ölçümleri

Saha ölçümleri ile analiz sonuçları göz önünde bulundurulduğunda iksa parametrelerinin uyumlu olduğu, beklenen seviyede deplasmanların oluştuğu görülmektedir. Tünel içindeki kalıcı kaplamalar döküldüğü için ölçümler alınamamıştır. Fakat düzenli yapılan kontrollerde kalıcı kaplamalarda herhangi bir çatlak vs. gözlenmemiştir. YCE tünellerinin bulunduğu D-E aksında, inklinometre (INC-04) ve reflektör okumalarına göre 2.0-2.5cm, G2-H aksında ise inklinometre (INC-08) ve gerinim ölçer okumalarına göre ise 4mm-5mm mertebesinde deplasmanlar oluşmuştur. (Şekil 12 ve Şekil 13). Analiz sonuçları ile saha ölçümleri kıyaslandığında, üst bölgede beklenenden daha fazla deplasman oluştuğu görülmektedir. Sarıgazi istasyonu çalışma sahası çok küçük olduğundan dolayı, pasa sahası olarak D-E

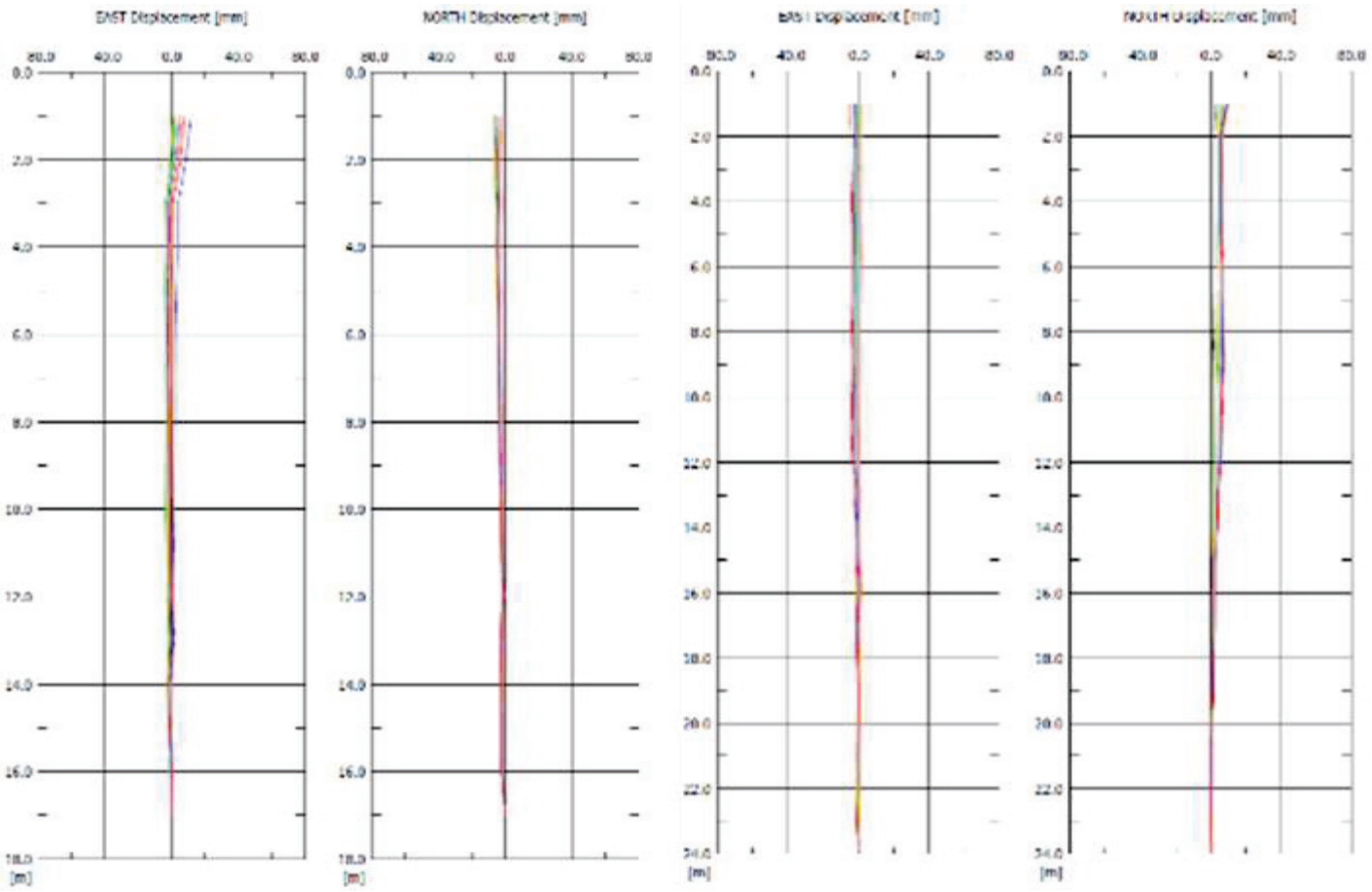
cephesinin arka kısmı kullanılmıştır. Bu sebeple öngörülenden daha fazla pasa yükü oluştuğu için deplasmanlar da beklenenden daha fazla oluşmuştur. G2-H aksında reflektör ve gerinim ölçer okumaları göz önüne alındığında beklenenden biraz daha az deplasmanlar oluşmuş, strut sistemleri beklenenden daha rijit davranmıştır. Deplasmanların daha az olması da YCE tünelleri noktasında güvenlik sayılarının daha yüksek olmasını sağlamıştır. YCE tünelleri içinde düzenli olarak yapılan kontrollerde de kalıcı kaplamalarda herhangi bir sorun görünmemektedir.



Şekil 11. A-B (INC-01) ve F-A (INC-07) Cepheleri İnklinometre Ölçümleri



Şekil 12. D-E cephesi reflektör ölçümleri



Şekil 13. D-E (INC-04) ve G2-H (INC-08) cepheleri inklinometre ölçümleri

5 SONUÇLAR

Altyapı çalışmaları çok yoğun yapılaşma yerlerinden geçmesi ve sıkışık iş programları sebebiyle zorlu imalatlardır. Bu çalışmada, İstanbul Anadolu yakasında imalatı devam eden ve benzer yoğunluğa sahip Sarıgazi İstasyonundaki tünel-derin kazı etkileşimleri incelenmiş ve sahadan alınan ölçümlerle analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu hareketlerden ilki, iksa deplasmanından dolayı oluşan kazı içine doğru yatay harekettir. Analizlerde bu hareketin kapasite diyagramları üstünde büyük etkisi olduğu görülmüştür. Bu sebeple iksa sistemi tasarımında, bu hareketten etkilenen YCE hattı tünelleri bölgesinde boru destekli rijit bir sistem tasarlanmıştır. Sahada yapılan kontrollerde de YCE tünellerinde herhangi bir sorun görülmemiştir. İkinci hareket ise, tünel üstündeki örtü yükünün kaldırılmasından dolayı, kayadaki ferahlama etkisi sonucu oluşacak yukarı yönlü harekettir. Analizlerde tünellerin üstündeki kayanın kaldırılması sonucu kayada ciddi bir oranda ferahlama olduğundan yukarı yönlü bir hareket oluşmaktaydı. Bu da tünel üstündeki birimlerdeki kemerlenme etkisini ortadan kaldırmakta olduğu görülmekteydi. Fakat reel durumda kaya biriminde bu seviyede bir ferahlama beklenmediği için ÇSS farklı bir parametre seti belirlenmiş ve analizler bu çerçevede gerçekleştirilmiştir. Sahada yapılan ölçümler sonucunda, iksa sisteminde oluşan deplasman ile analizlerde beklenen deplasman seviyelerinin birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tünellerde yapılan kontrollerde de herhangi bir problem olmadığı öngörülmüştür. Bu da tasarımda öngörülen tünel-iksa parametre setlerinin uyumlu olduğunu kanıtlamaktadır. yapılan çalışma bir kez daha göstermiştir ki yeraltı yapılarının tasarımları yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vardır. İmalat öncesinde tünel-derin kazı etkileşimleri mutlaka incelenmelidir. Parametre seçimi yapılırken tünellerde oluşacak hareketin yönü ve kapasite diyagramının etkileme durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Kayadaki çatlaklar ve kırıklar

iksa sistemlerinde kazı içine doğru olan rijitliği azalttığından iksa sistemlerinde kaya birimi güvenli tarafta kalınarak belirlenmelidir. Fakat tünellerdeki kemerlenme etkisi ile kayalar beklenenden daha rijit davranmakta ve ferahlama öngörülenden daha az olmaktadır. Tasarımlar yapılırken bunlar göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proceedings of NARMS-Tac, 1(1), 267-273.

Möller, S. C., 2006. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Universitat Stuttgart.

Özgül, N., 2005, İstanbul İl Alanının Genel Jeoloji Özellikleri, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul Büyükşehir Belediyesi.

R.G. Lee, Turner A.J., Whitworth L.J., 1994. Deformations Caused By Tunnelling Beneath A Piled Structure, XIIII CSMFE, 1994. New Delhi, India.

S.G. Ercelebi, H. Copur, N. Bilgin, C. Feridunoglu, 2005. Surface settlement prediction for Istanbul metro tunnels via 3D FE and empirical methods, Taylor & Francis Group, London.

Shui-Long Shen, Huai-Na Wu, Yu-Jun Cui, Zhen-Yu Yin, 2014. Long-term settlement behavior of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai, Tunnelling and Underground Space Technology 40 (2014) 309–323.

Tang D.K.W., Ng C.W.W., 2006, Influence of lagging distance on the interaction of two open face parallel tunnels, Taylor & Francis Group plc, London, UK.

T.C.Ç.Ş.B, 2018. Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uyulacak Esaslar.

W. Allen Marr and Martin Hawkes, 2010. Displacement-Based Design for Deep Excavations, Earth Retention Conference.

DRILLING AND BLASTING
DELME VE PATLATMA

Galeri ve Tünel Patlatmalarında Kötü Atım Sonuçlarının Nedenleri, Çözüm Önerileri ve Uygulamalardan Örnekler

Causes of Bad Shot Results in Gallery and Tunnel Blasting, Suggestions for Solutions and Examples of Practices

Ü. Kılıç
Madser Patlayıcı Maddeler Ltd. Şti. Ankara

E. Aygar
Fugro Sial Yer Bilimleri Müh. Müş. Ltd. Şti. Ankara

ÖZET: Galeri veya tünel patlatmaları tek bir serbest yüzeye doğru yapıldığı için yüzey patlatmalarına göre daha zordur. Patlatılıp sökülecek kaya daha fazla hapsolmuş durumda olduğu için bu patlatmalarda daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulur. Bununla birlikte sadece enerjiyi arttırmak yeterli olmayabilir ve başarılı atım sonucu için kayaç yapısını da dikkate alan doğru uygulama kritik öneme sahiptir.
Ortam kayaç yapısına bağlı etkiler, yöntem seçimindeki hatalar ve uygulamadaki hatalar başarısız atım sonuçlarının temel sebepleridir. Bu çalışmada galeri-tünel patlatmalarında başarısız atım sonuçlarının nedenleri ve çözüm önerilerine değinilerek uygulamadan örneklere yer verilmiştir.

ABSTRACT: Tunnel or gallery blastings are more difficult than surface blastings, because it is done with single free face. Since rock to be blasted is more confined more energy is needed in these blasts. However, just increasing energy may not be enough and correct application considering rock structure is critical for successful blast result.
Rock structure effects, incorrect method selection and mistakes during application are main causes of bad blast results. In this study, the causes of bad blast results and recommendations in gallery-tunnel blasting are mentioned and some case studies are given.

1. GİRİŞ

Yeraltında kısıtlı bir alanda yapılan tünel- galeri patlatmalarında hedeflenen ilerlemenin gerçekleşip gerçekleşmediği daima merak konusudur. Çünkü aynı kayaçta aynı parametrelerle çalışılsa dahi bir sonraki atımda istenen sonuca ulaşılacağının garantisi yoktur. Bunun sebebi ise tünel-galeri patlatmalarının doğasından kaynaklı zorluklardır. Bu bildiride, galeri-tünel patlatmalarında başarısız atım sonuçlarının nedenleri ve çözüm önerilerine değinilerek uygulamadan örneklere yer verilmiştir. Başarısız atım sonucundan kastedilen hedeflenen ilerlemenin altında kalınmasıdır. Genel olarak hedeflenen ilerlemenin %90'ın üzerinde ilerleme kaydedilen atımlar başarılı kabul edilir.

2. TÜNEL PATLATMALARININ ZORLUKLARI

Bir patlatma işinde atım verimini etkileyen en önemli unsurlardan biri serbest yüzeyin varlığıdır. Yer üstünde yapılan bir basamak patlatmasında 2 veya daha fazla serbest yüzey varken tünel-galeri atımlarında tek serbest yüzey mevcuttur. Bu nedenle tek serbest yüzeye doğru yapılan tünel-galeri atımları yer üstü patlatmalarına göre daha zordur. Bu atımların başarısı için ikinci bir serbest yüzey oluşturmak elzemdir. Bu amaçla çeşitli tünel patlatma yöntemleri geliştirilmiş olup en fazla tercih edilen yöntemler Orta Çekme (V-Kesme) ve Paralel Kesme yöntemleridir.

Belirli bir kaya kütlesini delme-patlatma yoluyla bulunduğu yerden söküp hedeflenen boyutlarda parçalanmış malzeme (tünellerde pasa, maden galerilerinde pasa veya cevher) haline getirmek için belirli bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji miktarı, 1 m^3 kayacın bulunduğu ortamdan sökülerek pasa haline gelmesi için kullanılması gereken patlayıcı madde miktarını tanımlar ve Özgül Şarj olarak ifade edilir. Tünel-galeri patlatmalarında, patlatılıp sökülecek kaya daha fazla hapsolmuş durumda olduğu için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulur. Bununla birlikte sadece enerjiyi arttırmak yeterli olmayabilir ve başarılı atım sonucu için kayaç yapısını da dikkate alan doğru uygulama kritik öneme sahiptir. Güzergah boyunca kayaç yapısının değişmesi, doğru tasarımın ve doğru uygulamanın önemi, insan faktörü gibi etkenler tünel-galeri patlatmalarını daha zor hale getirirler. İlerleyen bölümlerde bu zorluklar uygulamadan örneklerle desteklenerek daha detaylı anlatılacaktır.

3. KÖTÜ ATIM SONUÇLARININ GENEL NEDENLERİ ve ÖNERİLER

3.1 Kayaç Yapısına Bağlı Nedenler

Patlatma sonucuna etki eden en önemli parametre kayaç yapısı olup değiştirilemez. Bu nedenle patlatma tasarımı yapılırken öncelikli olarak dikkate alınmalı ve patlatmalar devam ederken kayaç yapısı değiştiğinde, gerekirse tasarım yenilenmelidir.

Bu bölümde tünel-galeri atımlarında, kayaç yapısının atım sonucu ve özgül şarj üzerine olan etkilerine değinilmiştir.

3.1.1 Plastik davranış gösteren kayaçlardaki sorunlar

Patlatma operasyonlarında kayaç ve patlayıcı etkileşimi atım verimi açısından önemlidir. Plastik karakterli kayaçlar, patlayıcının detonasyonu sonucu ortaya çıkan şok enerjisine karşı direnç gösterir ve kayaçta çatlak gelişimini zorlaştırır. Bu nedenle bu tip kayaçlarda çatlak oluşumuna yeterli zamanı verebilmek için detonasyon hızı düşük patlayıcılar tercih edilmelidir. Böylesi kayaçlarda yüksek detonasyon hızına sahip patlayıcıların kullanılması durumunda, delik içerisindeki patlayıcı çok hızlı detone olacak ve kayaçtaki çatlak gelişim süreci tamamlanmadığı için, açığa çıkan yüksek basınçlı gazlar kaya kırma ve taşıma işlerine yeterince katkı yapamayacaktır. Bunun sonucu olarak verimsiz atım sonuçları ortaya çıkacaktır ki bu durum kendini uzun ve genişlemiş kamara (atımdan sonra deliğin aynada kalan bölümü) olarak gösterir. Şekil 1-3'de plastik karakterli bir formasyonda yapılan atım sonucu görülmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde, atımdan sonra bazı patlatma deliklerinin genişlemiş halde kaldığı ve aynanın genelinde ilerleme sağlanamadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 1. Atım sonucu-1

Şekil 2. Atım sonucu-2

Şekil 3. Atım sonucu-3

Plastik karakterli kayaçlarda yapılan tünel-galeri patlatmalarında çoğu kez atım sonrasında ilerlemenin yeterli olmadığı ve aynada kuş yuvası şeklinde genişlemiş kamaraların kaldığından şikâyet edilir. Nispeten daha zayıf dayanıma sahip bu tip kayaçlarda başarısız atım sonuçlarının ortaya çıkması kafa karışıklığına yol açar ve tasarım değişikliği vb. çareler aranır. Böyle durumlarda kayaç yapısına uygun patlayıcı kullanmak en basit ve ekonomik çözüm yoludur. Ancak, yeraltında yapılan delme-patlatma operasyonlarında küçük çaplı deliklerin (genellikle 45 mm) kullanılması ve patlayıcının gaz kalitesi gibi etkenler uygun patlayıcı tedariğini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle genellikle sorun özgül şarjın arttırılması ile çözülmektedir.

Özet olarak, plastik davranış gösteren kayaçlarda yapılan delme patlatma çalışmalarında, patlayıcının detonasyonu sonuca açığa çıkan ve kayaçta çatlak oluşturmaktan sorumlu şok enerjisine karşı bir direnç gelişir. Bunun sonucu olarak kayaçta kırılma ve taşınma verimli olmaz. Bu tip formasyonlarda, uygun patlayıcı seçimi yaparak veya enerjiyi arttırarak daha verimli atım sonuçları elde edilebilir.

3.1.2 Çatlaklı kayaçlarda yaşanan delme patlatma sorunları

Delme-patlatma işinde sorun çıkaran başka bir kayaç yapısı da sert ama kırıklı çatlaklı kayaç yapılarıdır. Sağlam olmaları nedeniyle patlatmalı kazı yöntemiyle kazılan bu tip formasyonlarda şu sorunlarla karşılaşılmaktadır:

- Delik delmede yaşanan sorunlar
- Delik dolumunda yaşanan sorunlar
- Patlatma sırasında enerji kaçışına bağlı sorunlar
- Patlayıcıların duyarsızlaşması sorunu
- Deliklerin bozulmasına bağlı sorunlar
- Fazla kazı ile ilgili sorunlar

Kırıklı çatlaklı yapılardaki en belirgin sorunlar, delik delme ve delik dolumu sırasında ortaya çıkmaktadır. Günümüzde delici makine ve aksesuarlarını üreten firmalar konuyla ilgili bazı çözümler üretmişlerse de bu tip formasyonlar da delme işlemi sırasında delik içerisinde delici takımının sıkışması, kırılması gibi sorunlarla karşılaşılmaktadır. Bu sıkıntılar delme maliyetini arttırdığı gibi daha önemlisi delme süresinin uzamasına da neden olmaktadırlar. Kırıklı, çatlaklı yapılarda delme işleminin yanında, delik dolumu da zor ve zaman alıcıdır. Delinen delik içerisine küçük kayaç parçalarının düşerek deliği tıkaması veya deliğe doldurulmaya çalışılan patlayıcı kartuşunun çatlaklardan dolayı deliğin dibine doğru sürülememesi gibi sorunlar sıkça

yaşanmaktadır. Çatlaklı-kırıklı yapılarda patlayıcı kartuşları deliklere sürülürken daha yavaş ve dikkatli çalışılmalıdır. Galeri-Tünel patlatmalarında delikler küçük çaplı olduğundan temizliği zor bir işlem olup dolum işleminde gecikmeye neden olabilir. Bazı durumlarda delik tamamıyla temizlenemez. Bu durumdaki delikler temizlenebildiği kadarıyla doldurulur veya bazen doldurulmasına olanak bulunmadığından doldurulamaz.

Kırıklı çatlaklı yapıdaki kayaçlarda delik delme ve dolum işleri sırasında yaşanan sorunlar delme ve dolum sürelerinin artmasına neden olur ki bu durum tünel-galeri ilerleme hızını etkiler. Bu tip kayaç yapılarında delik boyunu kısa tutmak kontrolü kolaylaştırmakta hem delme işinin hem de dolum işinin nispeten daha kolay ve hızlı yapılmasına olanak verebilmektedir.

Sık eklem takımına sahip kayaçlarda yapılan atımlarda karşılaşılan başka bir sorun pasadan çıkan patlamamış patlayıcılardır. Patlayıcı maddelerde herhangi bir sorun olmadığını kabul edersek, atım sonrasında detone olmamış patlayıcılara rastlanmasının sebepleri şunlar olabilir:

- Zemin hareketi sonucu, sırasını bekleyen deliklerin bozulması
- Duyarsızlaşma

Çatlaklı yapılarda, önce patlayan deliklerin etkisi sonucu, zemin hareketine bağlı olarak sırasını bekleyen delikler bozulabilir. Bu bozulma sonucu delikteki patlayıcı kolonu bölünebilir veya patlayıcılardan bazıları boşa düşebilir. Bu nedenlerden dolayı deliklerdeki patlayıcı maddeler atım sonrası patlamamış halde çıkabilir.

Çatlaklı formasyonlarda yapılan patlatmalarda patlayıcıların duyarsızlaşması riskine de dikkat edilmelidir. Duyarsızlaşma sorunu, önce patlayan deliklerden yayılan şok dalgalarının ve/veya detonasyon sonucu ortaya çıkan basınçlı gazların çatlaklardan sızarak sırasını bekleyen delikteki patlayıcıları etkilemesi ile ortaya çıkar. Her iki durum (zemin hareketi ile patlayıcı kolonunun bozulması veya duyarsızlaşma) güvenlik açısından risk oluşturduğu gibi atım sonucunu da etkileyerek kötü ilerleme ve/veya tünel-galeri kesitinde kötü açılmaya neden olabilir ve sonuçta daha fazla tarama işi çıkabilir. Bu tip çatlaklı yapılarda, yukarıda belirtilen sorunlarla (pasadan patlamamış ürün çıkması, duyarsızlaşma) sık karşılaşılmakta olup delik-yük mesafelerini uygun şekilde artırarak veya gecikme aralıklarını azaltarak sorunun oluşma sıklığı azaltılabilir.

Eklemli kayaçlarda yapılan atımlarda eklemlerin durumuna göre atım sonucu galeri-tünel kesitinde fazla açılma olabilir. Kimi zaman bu tip zeminlerde tavan delikleri daha içeriden delinir ve daha hafif şarjlanarak fazla kazının önüne geçilmeye çalışılır. Bu durumda atım sonrası fazla kazı oluşmayabilir ancak tarama sırasında kırıcı darbeleriyle eklem sınırından dökülmeler yaşanabilir ve sonuçta kontrolsüz boşluklar oluşabilir. Fazla kazı sorununun yaşandığı eklemli kayaçlarda delik boyu kısa tutulabilir ve son kesme (smooth blasting) tekniği kullanılarak fazla kazı önlenmeye çalışılır. Ancak son kesme uygulaması ile başarılı sonuçlar elde etme şansı kayaç yapısına bağlıdır (ISEE, 2011).

3.1.3 Kayaç yapısına uygun özgül şarjın kullanılmaması

Kayaç yapısı ve özgül şarj ilişkisi, kayacın dayanımı, eklem durumu, elastik veya plastik özellikte olması ve patlatmaya verdiği cevap gibi unsurlara bağlıdır. Genel olarak, daha zayıf dayanıma veya kapalı eklem takımlarına sahip (delme ve dolum açısından sorun oluşturmayan) kayaçlar, sağlam, daha yoğun ve masif kayaçlara göre daha düşük özgül şarj değerlerine ihtiyaç duyarlar. Bununla birlikte bölüm 3.1.1'de anlatıldığı gibi dayanımı nispeten zayıf olan ama plastik davranış gösteren kayaçlarda patlatmaya karşı bir direnç söz konusudur ve özgül şarjın yüksek tutulması gerekebilir (Kılıç ve Demir, 2013).

3.2 Tasarım ve Uygulama Sırasındaki Hatalara Bağlı Nedenler

Tünel-galeri patlatmalarının doğasından kaynaklı zorluklar nedeniyle tasarım ve uygulama adımlarının doğru ve titiz yapılması, atımların başarısı için bir gerekliliktir. Ülkemizde çoğu tünel-galeri kazı projelerindeki delme patlatma işleri yeterli ciddiyetle ele alınmayıp delici operatörü ve ateşçilerin inisiyatiflerine bırakılmaktadır. Özellikle delici operatörleri usta çırak ilişkisi ile yetiştikleri için bildiği ve tecrübe ettiği uygulamaların dışına çıkamamaktadırlar. Ateşleyiciler sahip oldukları belgeyi almak için yazılı ve sözlü sınava tabii tutuldukları için çalışma alanlarıyla ilgili nispeten daha bilgili oldukları söylenebilir. Ancak ateşleyicilerinde rutin uygulamalardan farklı uygulama görme ve eğitim faaliyetlerine katılma imkanları kısıtlıdır. Bununla birlikte delme-patlatma işine ciddiyetle yaklaşan ve uzmanlardan teknik destek alan, personeline düzenli eğitim vermeye çalışan işletmelerde, kayaç yapısına göre uygulanacak delgi düzeni bellidir ve uygulama sırasında gerek delici operatörleri gerekse ateşleyicilerden kaynaklı hatalara sık rastlanmaz.

Bu bölümde, yazarlar tarafından nezaret edilen çok sayıda tünel- galeri patlatma uygulamaları sırasında en sık gözlenen hatalar anlatılmaya çalışılmıştır.

3.2.1 Orta Çekme (V Kesme) yönteminin uygulaması sırasında yapılan hatalar

Ülkemizde ağırlıklı olarak kullanılan tünel-galeri patlatma yöntemi Orta çekme yöntemidir. Tünel-galeri patlatmalarında ikinci serbest yüzey kesme bölgesi ile yaratıldığı için Orta Çekme yönteminde de kesme bölgesinin uygun şekilde tasarlanması çok önemlidir. Bu yöntemde ortadaki V'nin açısının 60 dereceden az olmaması istenir. Eğer V şeklinde delinen kesme delikleri daha düşük açılarla delinirse kesme bölgesinin boşaltılması zorlaşır ki bu durumda şarj miktarını arttırmak dahi çözüm olmayabilir. Orta çekme uygulamasında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar; kesme deliklerinin V açısının mümkün olabildiğince geniş tutulması, kesme deliklerinin yükünün doğru tasarlanması ve deliklerin tünel aynasında doğru konumlarda delinmesidir.

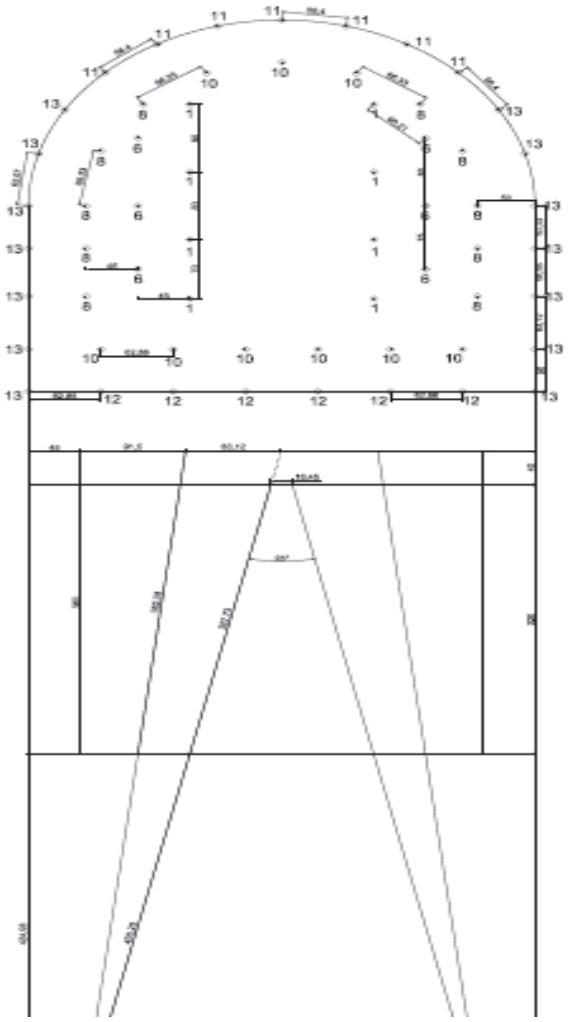
Bu yöntemin tasarımında ve uygulamasında gözlenen hatalar genellikle şunlardır:

- Dar kesitli tünellerde bu yöntemin uygulanmasında ısrar edilmesi.
- Kesme deliklerinin yük mesafelerinin doğru şekilde belirlenmemesi
- Kesme deliklerinin doğru uzunlukta delinmemesi
- Deliklerin ayna gerisindeki konumlarının dikkate alınmaması

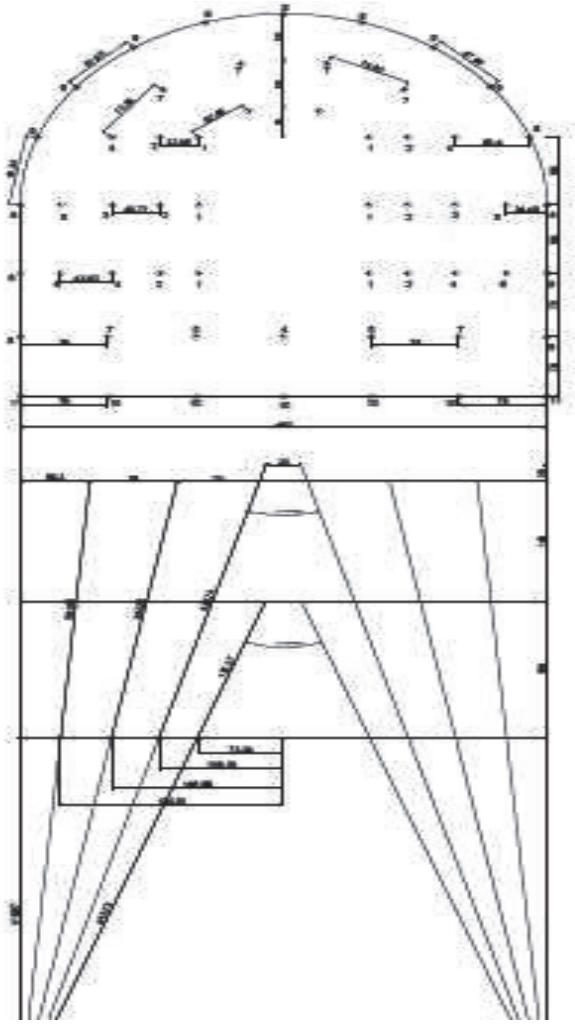
Yukarıda belirtildiği gibi Orta Çekme uygulamasında V şeklinde delinen kesme deliklerinin arasındaki açının 60 dereceden az olmaması istenir. Oysa delici makinelerin kol (boom) uzunlukları ve kızak boyları dikkate alındığında küçük çaplı tünellerde-galerilerde bu açıyı vermek mümkün olamamaktadır. Bu durum uygulamayı zorlaştırmakta, delik boyunu düşürmekte ve yüksek özgül şarj ile çalışılmasına neden olmaktadır. Dar kesitli tünellerde paralel kesme yönteminin denenmesi daha uzun delik boyları ile çalışılmasına imkan verebilir. O halde ülkemizdeki küçük çaplı tünellerde neden hala orta çekme yöntemi çok daha fazla kullanılmaktadır? Bu sorunun tek cevabı var; alışkanlık. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi tünel-galeri patlatmaları genellikle usta-çırak ilişkisi ile yetişmiş delici operatörleri ve ateşleyicilerin inisiyatifine bırakılmaktadır. Bu nedenle, ülkemizde bazı büyük yeraltı maden işletmeleri dışında paralel kesme yöntemi yok denecek kadar az kullanılmaktadır. Oysa tünel-galeri kazı işlerinde patlatmalardan sorumlu mühendisler, gerektiğinde uzman desteği alarak paralel kesme yöntemini uygulayabilir ve yöntemler arasında bir mukayese yapabilirler.

Tünel-galeri patlatmalarında kesme bölgesi verimli şekilde boşaltılabilirse işin en zor kısmı başarılmış olur. Diğer yöntemlerde olduğu gibi, kesme bölgesinin tasarımı sırasında uygun yük mesafelerinin belirlenmesi orta çekme yönteminin başarısı için en önemli noktalardan biridir.

Bu yöntemin uygulanması sırasında en sık yapılan hatalardan biri, kesme deliklerinin yükünün doğru belirlenmemesidir. Çoğu uygulamada kesme bölgesindeki deliklerin boyu, hedeflenen ilerleme boyu kadar alınmaktadır. Bu durumda kesme bölgesinde yük mesafesi artmakta ve atım sonucunda yetersiz ilerleme ve kamara sorunu ortaya çıkmaktadır (Şek. 4). Oysa içe yardımcı V delikleri delinerek kesme bölgesinin yükü hafifletilebilir ve bu bölge daha verimli boşaltılabilir (Şek. 5) (Kılıç vd., 2013).



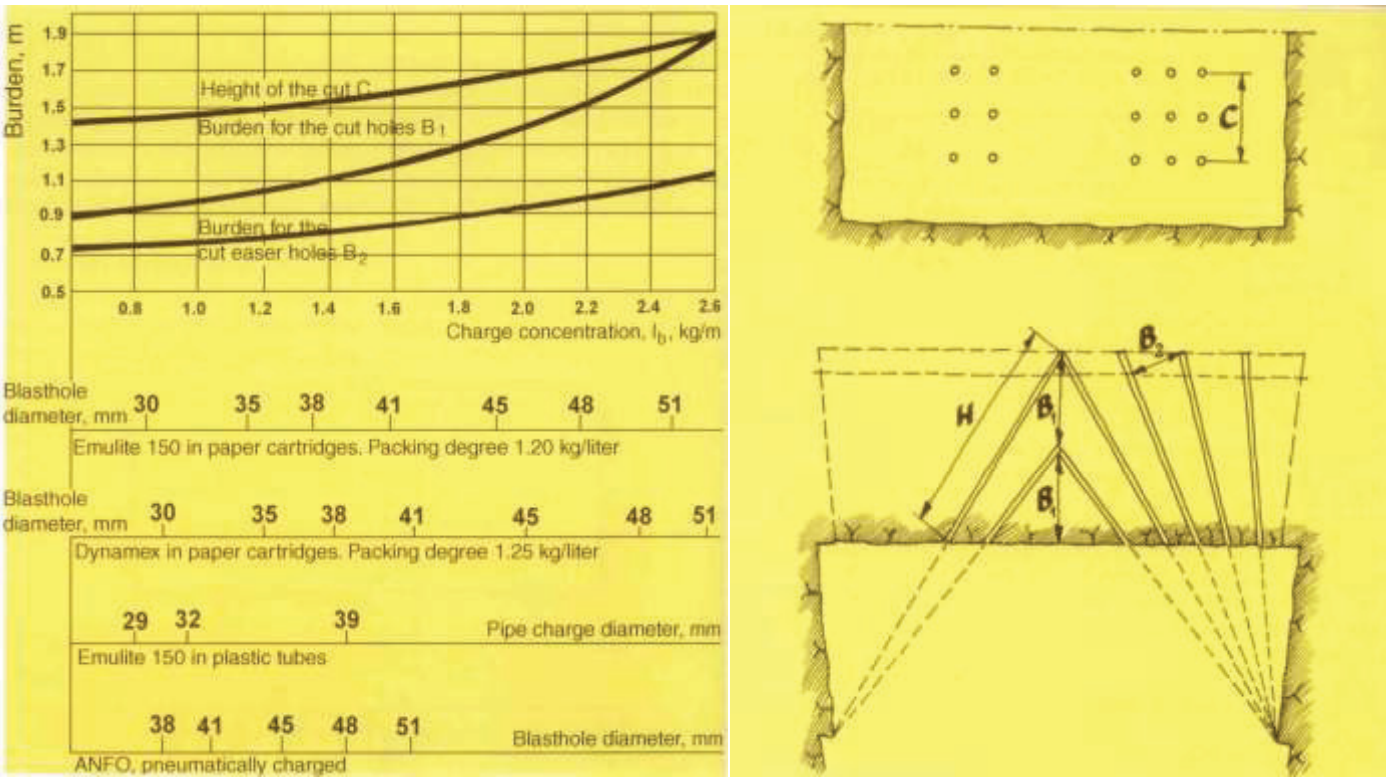
Şekil 4. Uygun olmayan kesme bölgesi yükü



Şekil 5. Uygun kesme bölgesi yükü

Şekil 4'deki örnekte 3.60 m ilerleme hedeflenmiş ve kesme delikleri 3.30 m olarak delinerek kesme bölgesinin yükü 3.20 m olarak ayarlanmış. Zaten yeterli açıya sahip olmayan kesme deliklerinin, bu yükü verimli şekilde boşaltması mümkün değildir. Aynı tünelde kesme bölgesi 2 kademede daha verimli boşaltılabilir. Bunun için Şekil 5'deki gibi 1. Kesme deliklerinin yükü 1.60 m (daha geniş açıyla patladıkları için 2. Kesmenin yükünden fazla) ve 2. Kesmenin yükü 1.40 m olarak ayarlandığında daha doğru bir tasarım yapılmış ve kesme bölgesinin başarılı şekilde boşaltılma şansı arttırılmış olur.

Kesme deliklerinin yük mesafelerinin tasarımı konusunda çeşitli kaynaklardan yararlanılabilir. Örneğin Şekil 6'da verilen Olofsson yaklaşımı kullanımı kolay olup tasarım aşamasında yol gösterici olabilir.



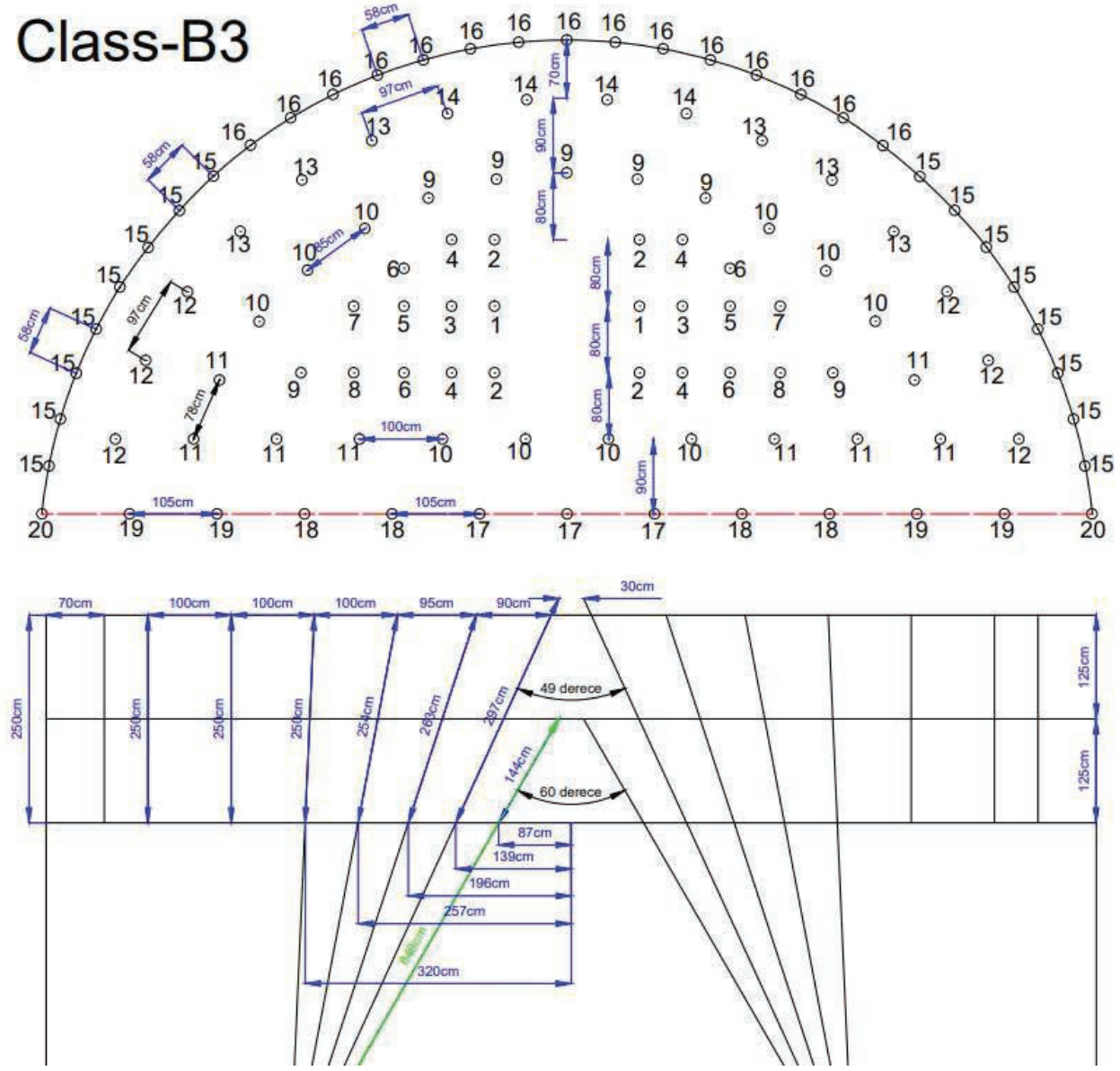
Şekil 6. Orta Çekme yönteminde yük mesafesi tayini (Olofsson, 2002)

Orta çekme uygulamalarında sık yapılan bir diğer hata deliklerin hepsinin aynı boyda delinmesidir. Örneğin hedeflenen ilerlemenin 2.50 m olduğu bir V-Cut uygulamasında kesme dahil tüm delikler 2.50 m olarak delinmektedir. Oysa kesme delikleri açılı ve hedeflenen ilerlemeden 15-20 cm daha uzun, kesmenin yanındaki tarama delikleri giderek dikleşen açılarla delindikleri için tüm delikler aynı boyda delinmemelidir. Şekil 7'de bir karayolu tüneli için orta çekme yöntemi ile yapılmış bir tasarım verilmiştir. Bu örnekte, hedeflenen ilerleme 2.50 m olarak belirlenmiş ve içteki kesme (1.V) deliklerinin boyu 1.44 m, 2.V deliklerinin boyu 2.97 m'dir. Kesme bölgesinin hemen yanındaki 1. tarama deliklerinin boyu 2.63 m ve bir sonraki tarama deliklerinin boyu 2.54 m'dir. Daha sonrasında delinen tarama delikleri dikleşmiş olup aşağı doğru patlayan taramalar, tavan ve çevre delikleri gibi 2.50 m uzunluğunda tasarlanmıştır.

Orta çekme yönteminde delgi sırasında dikkat edilmesi gerekli en önemli konu, kesme delikleri dahil açılı delinen deliklerin aynı nişan noktasından delinmesidir. Bunun için delici makinenin kolları ayna gerisinde sabit bir noktadan kesme deliklerini delmeye başlar ve aynı nişan noktasından dışa doğru giderek dikleşen açılarla delmeye devam eder. Tüm deliklerin ayna gerisindeki yük mesafelerini planlandığı gibi elde edebilmek için deliklerin aynada planlanan konumda ve uzunlukta delinmesi gereklidir. Eğer bu yapılmaz ise deliklerin ayna gerisindeki yük mesafeleri planlanandan farklı olur ve atımın başarısı etkilenebilir. Tüm patlatma operasyonlarında olduğu gibi orta çekme uygulamasında da deliklerin titiz delinmesi en önemli konuların başında gelmektedir. Özellikle doğru delinmesi daha zor olan açılı deliklerin, tasarıma uygun şekilde delinebilmesi için aynı nişan noktasından delinmesine dikkat edilmelidir Şekil 7).

Orta çekme uygulamalarında, ayna gerisindeki delik konumunun dikkate alınmaması sıkça yapılan hatalardan biridir. Oysa delinen deliğin ayna gerisindeki konumu pratikteki yük mesafesini belirlemektedir. Burada yapılan hata kesme bölgesindeki 2.V deliklerinin ve/veya kesme bölgesinin etrafındaki tarama deliklerinin delinmesi sırasında ortaya çıkmaktadır. Kesme delikleri belirli bir açıyla delindikleri için ayna gerisinde delik dipleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Deliklerin yük mesafesi, ayna yüzeyinden değil ayna gerisindeki delik konumları dikkate alınarak belirlenmelidir. Şekil 7'de görüleceği gibi 1.V ve 2.V delikleri

arasındaki mesafe ayna yüzeyinde 57 cm (196 cm-139 cm: 57 cm) iken ayna gerisinde gerçek yük mesafesi 125 cm olmaktadır. Eğer yanlış bir uygulamayla bu yük mesafesi (125 cm) ayna yüzeyinden delinseydi ayna gerisindeki gerçek yük çok fazla olacaktı ve muhtemelen atım sonucu başarısız olacaktı.



Şekil 7. Örnek bir Orta Çekme yöntemi (Alabas ve Kılıç, 2013)

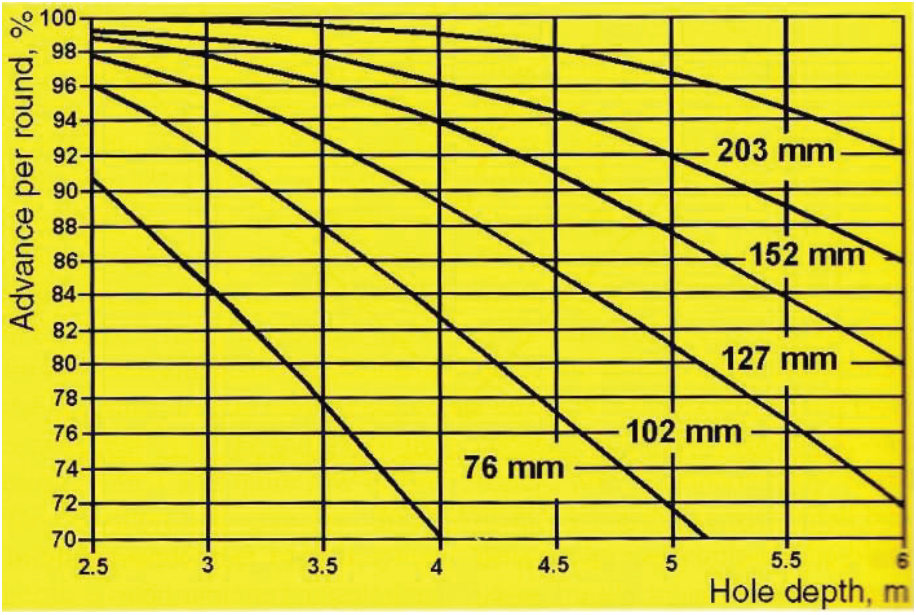
3.2.2 Paralel Kesme uygulaması sırasında yapılan hatalar

Ülkemizde Paralel Kesme yöntemi bazı büyük yeraltı maden işletmelerinde uygulanmakta olup baraj, yol, metro vb. inşaat faaliyetlerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni bir önceki bölümde anlatılmıştır. Deliklerin tamamının aynaya dik ve birbirlerine paralel olarak delindiği bu yöntemde de en kritik konu kesme bölgesinin verimli şekilde boşaltılmasıdır. Bu yöntemin tasarım ve uygulaması sırasında gözlenen hatalar aşağıda belirtilmiştir:

- Kesme bölgesindeki boş delik hacminin yeterli olmaması
- Özellikle 1.kesme bölgesinde (ilk karede) boş delik ile dolu delik arasındaki mesafenin uygun olmaması
- Kesme bölgesindeki deliklerin titiz şekilde birbirine paralel olmaması

- Özellikle kesme deliklerinde yeterli sayıda gecikme kullanılmaması

Bu yöntemde, delinen boş delikler birer tahliye deliği gibi çalışır ve ilk kesme bölgesinde patlayan deliğin önündeki kırılmış kayaçların tahliyesini sağlar. Dolayısıyla boş deliğin hacmi, bu tahliye işini verimli şekilde yapacak kadar büyük olmalıdır. Eğer boş deliğin hacmi yeterli olmaz ise boşaltma verimli gerçekleşmeyebilir ve kesme bölgesinde olması gerektiği gibi bir serbest yüzey elde edilemeyebilir. Verimli bir atım için boş deliğin hacmi, ilk kesme bölgesinin %10'u, tercihen %15'i kadar olması önerilmektedir. Bu konuyla ilgili Olofsson tarafından verilen grafik yol gösterici olabilir. Şekil 8'de, boş delik hacmi artarsa atım veriminin de arttığı görülmektedir.



Şekil 8. Boş delik çapı ile atım verimi arasındaki ilişki (Olofsson, 2002)

Gerek tasarım gerekse uygulamada en çok dikkat edilmesi gerekenlerin başında ilk karedeki boş delik ile patlatma delikleri arasındaki mesafe gelmektedir. Bu mesafe gereğinden fazla olursa kesme bölgesi verimli şekilde boşaltılamayabilir. Gereğinden yakın olursa deliklerin kesişme riski artar ve yabancı literatürde "recompaction" olarak geçen olay meydana gelebilir. Bu mesafenin tayininde değişik kaynaklardan ve yapılan örnek çalışmalardan yararlanılabilir.

Deliklerin tasarıma uygun delinmesi her patlatma operasyonunda olduğu gibi paralel kesme için de elzemdir. Bu yöntemde özellikle ilk karede deliklerin çok yakın delinmesi delgi işini zorlaştırmaktadır. Kesme bölgesindeki deliklerin sapması deliklerin yükünü değiştirerek atımın verimini etkileyebilir. Bu nedenle aynada delik yerlerinin çizilmesi ve delgi sırasında delik aralıklarının korunarak birbirine paralel olmasının sağlanması önemlidir.

Paralel kesme yönteminde ortadaki boş deliklerin yardımıyla yaratılan küçük bir serbest yüzeyin kademeli olarak büyütülmesi söz konusudur. Kesme bölgesinde var olan küçük serbest yüzeyden patlatma deliklerinin önünde bulunan yükün kırılarak tahliyesi kademeli yapılmalıdır. Aksi halde küçük bir hacme sahip boşluktan fazla bir miktarda kırılmış kayacın boşaltılması mümkün olmayabilir. Bunun için özellikle ilk 2 karede deliklerin teker teker ateşlenmesini temin edecek şekilde gecikme dağılımı yapmak doğru bir yaklaşımdır. İlk 2 kareden sonra serbest yüzey büyüdüğü için delikler ikişerli ateşlenebilir.

3.2.3 Gecikme dağılımı ve seçiminde yapılan hatalar

İkinci bölümde belirtildiği gibi bir patlatmanın verimini etkileyen en önemli unsurlardan biri serbest yüzeyin varlığıdır. Tünel-galeri patlatmalarında deliklerin belli gecikme süreleriyle,

yaratılan serbest yüzeye doğru ateşlenmesi sağlanarak serbest yüzeyin kademeli olarak büyütülmesi hedeflenmektedir. Gecikme dağılımı yapılırken, her deliğin önündeki boşluğa mümkün olabildiğince geniş açıyla patlaması amaçlanmalıdır. Tünel-galeri patlatmalarında gecikme seçimi ve gecikme dağılımında gözlenen hatalar şunlardır:

- Gecikmeleri, deliklerin geniş açıyla patlayacağı şekilde dağıtmamak
- Kesme bölgesinde yetersiz gecikme süresi kullanmak
- Gereğinden uzun gecikme kullanmak

Deliklerin, önlerindeki kısıtlı serbest yüzeye geniş açıyla patlamasını temin edecek şekilde gecikme dağılımı yapmak, deliklerin daha verimli patlamasını sağlayacaktır. Bazen sahadaki delik sayısı ve konumu ile tasarlanan arasında fark olabilir. Böyle durumlarda gecikme dağılımında değişiklik yapılması zorunlu hale gelebilir. Gecikme dağılımında değişiklik yapılırken yukarıda belirtildiği gibi her deliğin serbest yüzeye geniş açıyla patlamasına dikkat edilmelidir.

Galeri-Tünel patlatmalarında özellikle kesme bölgesinin verimli şekilde boşaltılması için yeterli zaman verilmelidir. Eğer yeterli zaman verilmezse sistemde tıkanma meydana gelebilir ve atımdan istenen verim alınamayabilir. Kesme delikleri gibi diğer deliklere de önündeki yükü boşaltacak kadar yeterli zaman verilmelidir. Gereğinden uzun gecikme süresi kullanmanın yarattığı başlıca sorun, sırasını bekleyen deliğin ve/veya delikteki patlayıcının kayaç hareketi sonucu zarar görme olasılığıdır. Böyle durumlarda, pasa üzerinde patlamamış patlayıcı kartuşları veya yarısı patlamadan kalmış deliklere rastlanabilir.

Sarsıntı sorunu olan ve yakınında patlatmadan etkilenebilecek unsurların bulunduğu tünel-galeri çalışmalarında delme-patlatma tasarımı titiz yapılmış olmalı ve birim zamanda devreye girecek patlayıcı madde miktarına göre gecikme dağılımı yapılmalıdır. Metro inşaatları gibi yerleşim yerlerinin yakınından geçen projelerde kimi zaman her deliğe ayrı gecikme vermek ve hatta delik boyunu düşürmek dahi gerekebilir. Günümüzde elektronik kapsüllerin yaygınlaşması ile yeterli sayıda gecikme tedariği ve gecikme sürelerindeki sapma sorunu ortadan kalmış ve bu konuda kullanıcıların eli rahatlamıştır.

3.2.4 İnsan kaynaklı hatalar

Tünel- galeri patlatmalarında yapılan yanlış bir uygulamanın atım sonucuna yansıması yerüstü patlatmalarına göre daha belirgindir. Doğru tasarımın yanı sıra doğru ve titiz uygulama tünel-galeri patlatmalarında başarının diğer bir sac ayağıdır. Doğru tasarım yapmak, doğru ürünleri veya yeni teknoloji ile üretilmiş ürünleri (örneğin elektronik kapsüller, bulk emülsiyonlar vb.) kullanmak bir atımın başarısı için yeterli olmayabilir. Sahadaki uygulamanın kalitesi de bu unsurlar kadar belirleyicidir.

Bir delici makine operatörünün delikleri tasarıma uygun (doğru açılarla ve uzunluklarda) delmesi yeterli değildir. O delikleri temiz şekilde bırakması gerektiğini bilmeli ve bunun için mümkün olabildiğince çaba sarf etmelidir. Deliklerin doğru açılarla, doğru uzunluklarla delinerek temiz şekilde bırakılması atımın başarısı için ilk basamaktır. Delme işi bittikten sonra delici makine aynadan ayrılmadan deliklerin kontrolü yapılmalı, varsa tıkalı deliklerin açılmasına veya gerekli hallerde yeniden delik delinmesine gayret edilmelidir. Bu gibi uygulamalar atım veriminin artmasına önemli katkılar yapacaktır.

Delik dolumu sırasında, ateşleyicilerin önce delikleri kontrol etmesi, varsa tıkalı delikleri temizlemesi, tasarıma uygun patlayıcı maddeleri sahaya getirmesi ve bunları kullanarak delikleri özenli şekilde doldurması önemlidir. Bu konulara yeterince özen gösterilmemesi atım sonucuna olumsuz yansıyacaktır.

3.3 Yetersiz Özgül Şarjdan Kaynaklı Sorunlar

Bölüm 2'de bahsedildiği gibi bir kaya kütlesini doğal ortamından koparıp, istenen boyutlarda parçalayarak bir miktar taşıyıp yüklenebilecek hale getirmek için belirli bir enerjiye ihtiyaç duyulur. Patlatma literatüründe bu enerji özgül şarj olarak bilinir ve kg/m^3 olarak ifade edilir. Özgül şarjı etkileyen en önemli parametreler, tünel-galeri kesit alanı, kayaç yapısı ve delik boyudur. Özgül şarj değerinin yeterli olmaması durumunda, patlatma sonucu hedeflenen ilerleme gerçekleşmeyebilir veya tünel-galeri aynasının bazı bölümlerinde yetersiz ilerleme ile karşılaşılabilir. Bu durum fazladan kırıcı çalıştırma, aynayı düzeltmek için patar atma gibi ikincil işlemlere neden olur.

Genel olarak küçük kesit alanına sahip tünellerde özgül şarj daha yüksek iken kesit alanı büyüdükçe özgül şarjın düşmesi beklenir. Çünkü küçük kesitli tünellerde, aynadaki kayaç daha fazla hapsolmuştur ve o hacmi çıkarmak daha zordur. Kılıç ve Demir (2013) tarafından yapılan çalışmada, kazı için delme patlatmaya ihtiyaç duyulan birçok tünel-galeri projesine ait özgül şarj değerleri verilerek şu sonuçlara varılmıştır:

- 10-20 m^2 kesitli tünellerdeki özgül şarjın 2.30-3.00 kg/m^3 aralığında (kesitin 10 m^2 ye yaklaştığı durumlarda değer 3kg/m^3'e doğru, kesitin 20 m^2'ye doğru arttığı durumlarda ise 2.30 kg/m^3 seviyelerine yaklaşmaktadır),
- 20-30 m^2 kesit alanına sahip tünel-galerilerde 2.50- 1.50 kg/m^3 aralığında ve
- 50-70 m^2 kesit alanına sahip aynalarda yapılan atımlarda ise özgül şarj 1.00- 1.40 kg/m^3 aralığında değişmektedir.

Kaynaklarda, tünel-galeri patlatmaları için özgül şarjın tünel kesiti ve kayaç yapısı ile değişimi verilirken delik boyu ile özgül şarj arasında herhangi bir ilişkinden bahsedilmemektedir (Kılıç ve Demir, 2013). Oysa pratikte yapılan tünel-galeri patlatmalarında özgül şarjın delik boyundan etkilendiği gözlenmektedir. Delik boyu arttıkça kısıtlı bir alandan daha fazla hacim çıkarmak gerekmekte olup bu durum özgül şarjı arttıran bir etki yapmaktadır.

4. UYGULAMADAN ÖRNEKLER

Bu bölümde Bölüm 3'te anlatılan hataların uygulamada karşılaşılan örneklerine yer verilmiştir. Anlatılan örnekler, değişik tünel patlatmalarında yazarların bizzat katıldığı atım sonuçlarını iyileştirme çalışmalarından alınmıştır.

4.1 Kayaç Yapısının Atım Verimine Etkisi İle İlgili Örnekler

Kayaç yapısını dikkate almayan tasarım ve uygulamalarla yapılan tünel-galeri atımlarında istenen sonucun elde edilmesi mümkün değildir. Bu bölümde kayaç yapısından kaynaklı kötü atım sonuçlarıyla ilgili örneklere yer verilmiştir.

4.1.1 Plastik karakterli kayaçta yapılan bazı uygulamalar

Plastik karakterli zeminlerin patlatmaya karşı davranışı Bölüm 3.1.1'de anlatılmıştır. Adıyaman İli sınırlarındaki Gömükan Barajı ve Sulaması Projesi kapsamında yapımı devam eden Balyan İletim Tünelinin kazısı sırasında kayaç yapısının değişmesiyle atımlarda başarısız sonuçlardan, kimi zaman hiç ilerleme yapılamadığından şikayet edilmiştir. 12 m^2 kesit alanına sahip aynaya 2.50 m uzunluğunda 25-30 adet delik delinirken formasyonun değişmesi neticesinde delik sayısı 40 adete çıkarılmış ancak atım sonucunda deliklerin kuş yuvası şeklinde genişlediği ve ilerlemenin olmadığı bildirilmiştir (Şekil 1-3). Tünel kazı işini yapan yüklenici firma yetkilileri, kapsüle duyarlı patlayıcı miktarını önce 70 kg'a daha sonra 80 kg'a çıkardıkları halde verim

alamadıklarını ve ilerleme hızlarının çok yavaşladığını belirtmişlerdir. Patlatmaya karşı direnç gösteren, atım sonucu deliklerin kuş yuvası şeklinde genişleyip kaldığı ama ilerlemenin yetersiz olduğu, bazen hiç ilerlemenin olmadığı bu plastik karakterli formasyonda delik sayısı arttırılarak özgül şarj 3 kg/m^3 civarına yükseltilmiştir. Delik sayısının 45-50 adete, patlayıcı madde miktarı 85-90 kg'a çıkarılıp, delik boyunun 2.30m'ye düşürüldüğü yapılan patlatmalardan olumlu sonuç alınmış ve ilerleme sorunu ortadan kalkmıştır (Kılıç, 2022).

Çorum İli İncesu kasabası sınırlarında yapılan İncesu HES projesinin enerji tüneli (14 m^2 kesitli) kazısı sırasında karşılaşılan Konglomera formasyonunda 3.20 m olarak hedeflenen ilerleme, atım sonucu 2.50 m – 2.80 m aralığında gerçekleşmekteydi. Yapılan teknik çalışmalardan sonra, tamamen kapsüle duyarlı emülsiyon tipi patlayıcı maddenin kullanıldığı atımlarda ana şarjın ANFO ile desteklenmesi önerilmiştir. Taban delikleri ve çevre delikleri hariç tüm deliklerde kapsüle duyarlı emülsiyon tipi patlayıcı madde ve ANFO'nun birlikte kullanımından sonra ilerlemeler 3 m veya üzerinde gerçekleşmiştir (Kılıç, 2007b).

Ankara Elmadağ'da yapılan bir tünel inşaatı sırasında plastik davranış gösteren, kil ve grovak'tan oluşan 90 m'lik kısımda yapılan patlatmalardan sonra aynada kuş yuvası gibi genişlemiş şekilde 1m civarında kamaralar gözlenmiştir. Atımlardan sonra tarama amaçlı kırıcı çalıştırılmasına rağmen kırıcının ucunun zemine saplanması nedeniyle tarama işi zaman almaktaydı. Bu projede patlatmalardaki verim sorunu delik uzunluğunun düşürülmesi ve şarjın arttırılması ile çözülebilmiştir (Kılıç, 1998).

4.1.2 Çatlaklı kayaçta yapılan uygulama örnekleri

Çatlaklı kayaçlarda yapılan tünel-galeri patlatmalarında karşılaşılan genel sorunlar bölüm 3.1.2'de anlatılmıştır.

Antalya ili Alanya İlçesi sınırlarında inşa edilmiş olan Dim Barajı ve HES projesinin enerji tünelinde karşılaşılan çatlaklı kalker formasyon nedeniyle delme ve dolum işlerinde çok ciddi sıkıntılar yaşanmıştır. 30.08.2000 tarihinde yazarların da katıldığı bir atımda delici makine saat 11:30'da delgiye başlamış, patlatma saat 06:00'da yapılabilmiştir. Toplamda 2.5 m uzunluğunda 50 adet deliğin delinip patlatıldığı bu atımda çatlaklı formasyon nedeniyle hem deliklerin delinmesi hem de doldurulması çok zaman almıştır. Sağlam kayaç şartlarında yaklaşık 2.5-3 saatte bitirilebilecek iş, çatlaklı kayaç yapısı nedeniyle 6.5 saatte bitirilebilmiştir. Ayrıca delik boyunun bu formasyon için gereğinden uzun olması, atım sonucunda kontrolsüz boşlukların oluşmasına neden olmuştur. Bu formasyonda yapılacak delme patlatma çalışmalarında delik boyunun düşürülmesi önerilmiştir (Kılıç, 2000).

Van ili Kuskunkıran Tüneli kazısı sırasında sık eklemli grafit şistte 21-22.04.2005 tarihlerinde yapılan tünel patlatmaları sonucu tavan-omuz bölgelerinde 1.5 m civarında açılma olmuştur. Yapılan denemelerden sonra atım sonrası kontrolsüz boşlukların oluşmasını engellemek ve delgi-dolum işini daha hızlı yapabilmek amacıyla delik boyunun 2.50 m'den 1.50 m'ye düşürülmesi kararlaştırılmıştır (Kılıç, 2005a).

4.1.3 Özgül şarj ile ilgili bir örnek uygulama

Kahramanmaraş İli Andırın İlçesi sınırlarında inşa edilmiş olan Değirmenüstü HES projesinin enerji tüneli kazısı sırasında yapılan patlatmalarda özgül şarjın fazla olduğundan şikâyet edilerek tedarikçi firmadan destek istenmiştir. Sağlam kireç taşı formasyonunda 13 m^2 kesitinde açılan tüneldeki rutin uygulamada delik boyu 2 m ve özgül şarj değeri 2.70 kg/m^3 iken, özgül şarjın düşürülmesi çalışmalarında önce delik boyunun 2.5 m'ye çıkarılarak özgül şarjın 2.28 kg/m^3'e düşürüldüğü bir deneme yapılmıştır. Bu deneme sonucu başarısız olunca yine 2.50 m delik boyu ile özgül şarj 2.66 kg/m^3 olarak ayarlanan bir tasarım uygulanmış ama atımdan sonra aynanın bir bölümünde yeterli ilerleme sağlanamamıştır. Yapılan bu denemelerden sonra dar kesit nedeniyle delik boyunun 2 m olarak kalmasının ve 2.70 kg/m^3 özgül şarj değerinde

çalışmalarının uygun olduğu, delik boyunu arttırmanın ancak özgül şarjı arttırmak ile mümkün olacağı belirtilmiştir (Kılıç, 2007a).

Kastamonu İli Kurucaşile İlçesi sınırlarındaki Başak Regülatörü ve HES projesindeki enerji tüneli kazısı sırasında 15.74 m^2 kesitli tünelde 2.30 kg/m^3 özgül şarj ile verimli atımlar yapılırken zeminin değişmesi sonucu bu değerlerde iş yapamadıklarını bildirerek teknik destek talebinde bulunmuşlardır. Yapılan deneme patlatmalarında özgül şarjın 2.60 ve 2.65 kg/m^3 olarak ayarlandığı atımlarda verimli sonuçlar alınamamıştır. Özgül şarjın 3.00 kg/m^3 olarak ayarlandığı atımda delik boyu kadar ilerleme yapmak mümkün olmuştur (Kılıç, 2009).

4.2 Hatalı Tasarım ve Uygulama İle İlgili Örnekler

Tünel-galeri patlatmalarında kötü atım sonuçlarının sebeplerinden biri de uygulama sırasında yapılan hatalardır. Tasarım sırasında veya sahada uygulama sırasında yapılan hatalar atımın başarısını baskılayan unsurlar arasındadır. Bu bölümde hatalı uygulamalardan örneklere yer verilmiştir.

4.2.1 Orta Çekme İle İlgili Örnek

Giresun İli Dereli İlçesi sınırlarındaki Angutlu-1 HES projesindeki Enerji Tüneli kazısı sırasında, atım veriminin düşük olduğu buna bağlı olarak ilerleme hızlarının da düşük olduğu ve patlayıcı tüketimlerinin fazla olduğu şikâyeti nedeniyle projede detaylı bir çalışma yapılmıştır. Toplam 4040 m uzunluğa ve 18 m^2 kesit alanına sahip enerji tünelinde çalışmanın yapıldığı dönemde bir yaklaşım tünelinden sağ ve sol yönlerine olmak üzere 2 ayna halinde çalışılmaktaydı. Delik boyu 3.60 m iken sol aynada son 24 atımın ortalama ilerlemesi 2.78 m ve sağ aynada son 13 atımın ortalama ilerlemesi 2.63 m olarak gerçekleşmişti (Kılıç vd., 2013). Delme-patlatma yöntemi olarak Orta Çekme (V-Kesme) yönteminin kullanıldığı bu projede kötü atım sonuçlarının temel nedeni kesme deliklerinin yükünün fazla olmasıydı. Şekil 4'de görüleceği gibi V şeklinde delinen kesme delikleri 3,30 m boyunda delinirken bunların yükü mesafesi 3.20 m olmaktaydı. Kesme bölgesindeki delikler ateşlendiğinde bu bölge verimli şekilde boşalamadığı için ilerleme hedeflenenden çok daha düşük gerçekleşmekteydi. Oysa kesme bölgesinin yükü uygun olduğunda kesme bölgesi verimli şekilde boşalır ve 2. Serbest yüzey yaratılarak atımın başarı şansı arttırılmış olurdu. Örneğin, Olofsson 45 mm'lik delik çapı için kesme bölgesinin yükünü 1.30 m civarında vermektedir. (Olofsson.2002). Yapılan teknik çalışmada, kesme delikleri Şekil 5'deki gibi 2 V olarak tasarlanmış ve kesme bölgesinin yük mesafeleri 1.60 m ile 1.40 m olarak ayarlanmıştır. Böylece kesme bölgesinin 2 kademede verimli şekilde boşaltılması amaçlanmıştır. Ayrıca, yapılan yeni tasarımda delik boyu 3.60 m'den 3.00 m'ye düşürülmüştür. 4.50 m'lik tünel genişliğinde 3.60 m boyunda delik delinmesi, kesme bölgesindeki V açısını çok daraltacağı için delik boyu 3.00 m olarak belirlenmiştir.

Bozöyük-Mekece arasındaki yol yapım işi sırasında alt yüklenici marifetiyle yapılan bir tünel kazısı sırasında atımlarda hedeflenen ilerlemenin sağlanamadığından ve atım sonrası tarama ve patarlama gibi ikincil işlerle çok fazla uğraştıklarından şikâyet edilmiştir. Bu sorunla ilgili şantiyede yapılan gözlem ve incelemeler sonucu deliklerin tamamının aynı boyda ve nişan noktalarına dikkat edilmeden delindiği bilgilerine ulaşılmıştır. Bölüm 3.2.1'de anlatıldığı gibi orta çekme uygulamasında tüm delikler aynı uzunlukta delindiği vakit, açılı delinen kesme delikleri ile onların yanındaki tarama delikleri planlanandan kısa kalmaktadır. Ayrıca, bu delikler aynı nişan noktasından delinmedikleri için ayna gerisindeki yük mesafeleri planlanandan farklı olmaktadır. Bu konuları dikkate alan yeni bir tasarım yapılarak delici operatörlerine ve ateşleyicilere detaylı anlatılmış ve birkaç uygulamaya nezaret edilerek verimli atımlar yapılabilmiştir. Atımların verimli olması sonucu, hedeflenen ilerleme sağlandığı ve patarlama, kırıcı çalıştırma işlerine fazla zaman harcamadıkları için firmanın ilerleme hızı artmıştır (Kılıç, 2005b).

4.2.2 Paralel Kesme İle İlgili Örnek

Bir yeraltı polimetal maden işletmesindeki hazırlık işleri kapsamında sürülen 14 m^2 kesitli galeride yapılan paralel kesme uygulamasında, kesme bölgesinde boş delik olarak 2 adet 51 mm (üretim delikleri aynı çapta) delik delinmiş ve kesme bölgesindeki ilk karede 2 deliğe aynı gecikme verilmiştir. Yapılan atım sonucu 3,00 m uzunluğunda delinen deliklerde 50 cm – 100 cm arasında değişen kamaralar kalmıştır. Bu atımdan sonra boş delik hacmi arttırılmış (4 adet 76 mm) ve ilk 2 karede her deliğe faklı gecikme, 3. ve 4. karede her iki deliğe bir gecikme verilerek tasarımda iyileştirmeler yapılmıştır. Bu değişikliklerden sonra yapılan atım başarılı olmuştur (Kılıç, 2003).

4.2.3 Gecikme dağılımı ile ilgili örnek

Tünel-galeri patlatmalarında, gecikme dağılımı ile ilgili sık rastlanan hata, aynadaki delinmiş deliklerin geniş açıyla patlayacak şekilde numaralandırılmamış olmasıdır. Ayrıca gereğinden uzun gecikme kullanımı nedeniyle pasada patlamamış ürünlere rastlanması da yaygın bir durumdur.

Bir karayolu tünelinde ortam kayacın çatlaklı yapıda olması nedeniyle son kesme çalışmaları yürütülmüştür. Yapılan ilk 2 deneme atımlarından sonra pasada patlamamış infilaklı fitillere (çevre deliklerinde kullanılıyordu) rastlanmış ve tünel cidarında düzgün yüzey elde edilememiştir. İlk 2 deneme atımından sonra yapılan değerlendirmede, pasadan detone olmamış ürün çıkmasının nedenleri üzerinde durulmuş ve sonuçta çevre delikleri ile bir altındaki delikler arasındaki gecikmelerin fazla olduğu (1s – 1.5 s) ve bu delikler arasındaki mesafenin gereğinden az (50cm) olduğu yorumu yapılmıştır. Tavan delikleri ile hemen altındaki delikler arasındaki gecikme sürelerinin mümkün olabildiğince düşürülüp (400 ms) çevre deliklerinin yükünün 80 cm'ye arttırıldığı 3. deneme patlatması sonucunda pasada patlamamış ürün miktarının çok daha az olduğu ve tünel cidarında nispeten düzgün yüzey elde edildiği gözlemlenmiştir (Alabaş, ve Kılıç, 2011).

4.2.4 İnsan faktörünün atım verimine etkisi ile ilgili örnekler

Bu ç 3.2.4.bölümünde anlatıldığı gibi bir atımın başarısı için doğru tasarım ve doğru (veya ileri teknoloji) ürünler kullanmak yeterli değildir. Atımın başarısı için diğer sac ayağı olan doğru ve titiz uygulama diğer unsurlar kadar önemlidir. Yapılan tasarımın doğru uygulanması ve seçilen ürünlerin uygun şekilde kullanımı insan faktörüne bağlıdır. Atım verimini etkileyen bu konuyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Bir yeraltı madeni işletmesinde, tasarım parametreleri değiştirilmeden atım sonuçlarını iyileştirmeyi teşvik eden bir ödül sisteminin uygulanması ile cevher aynasında %15, pasa aynasında %11 verim artışı sağlanmıştır. (Dede, 2021)

Yazarların katıldığı birçok tünel-galeri patlatması sırasında insan kaynaklı hatalar gözlenmiştir. Deliklerin tasarımdakilerden farklı uzunlukta ve farklı açılarla delinmesi, deliklerin doluma temiz şekilde bırakılmaması, tıkalı deliklerin açılması için yeterli gayretin gösterilmemesi, gecikmelerin doğru sırayla dağıtılmaması ve elektriksiz kapsül ile infilaklı fitil bağlantısının uygun şekilde yapılmaması gibi atım verimini etkileyen davranışlar en sık gözlenenlerdir.

5. SONUÇLAR

Diğer tüm faaliyetlerde olduğu gibi tünel- galeri patlatmalarında da öncelikli hedef atımın güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi olmalıdır. Atım sonucu değerlendirilirken, ilerleme ve atım kalitesi birlikte değerlendirilmelidir. Herhangi bir tünel veya galeri patlatmasında ilerleme, kazı hızını veya üretim miktarını kontrol etmekte olup delik boyunun %90'nından daha az ilerleme hedeflenmemelidir. Atımın kalitesi, ikincil işlere (tarama, patarlama yapılması veya

fazla kazının doldurulması vb.) harcanacak süreyi, emek ve malzeme miktarını etkiler. Doğası gereği yüzey patlatmalarından ayrışan ve bu çalışmada zorluklarından bahsedilen galeri-tünel patlatmalarında atım sonucu daima merak konusudur. Çünkü anlatılan faktörlerden dolayı her atımdan sonra farklı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir.

Bu çalışmada, tünel-galeri patlatmalarında kötü atım sonuçlarının genel nedenlerine değinilerek çözüm önerilerinde bulunulmuştur. Uygulamada yaşanan örneklere yer verilerek, sahada benzer durumlarla karşılaşan mühendislere faydalı olabilecek bilgiler sunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Katkılarından dolayı Nazım Kuroğlu'na teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Alabaş, V., ve Kılıç, Ü., 2012. Smooth Blasting Applications in Selahaddin Tunnel. Technical Report, Yayımlanmamış, Ankara.

Dede, B., 2021. Saha Uygulama Performansının Patlatma Performansı Üzerine Etkisi, 10. Uluslararası Delme Patlatma Sempozyumu, 10. Uluslararası Delme Patlatma Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s.203-209, Antalya.

ISEE, 2011. Blasters' Handbook, 18th Edition, Cleveland, Ohio, USA, s.840-841.

Kılıç, Ü., 1998. Yeni Tüneller İnşaatı Tünel Kazı Destekleme Notları, Yayımlanmamış, Ankara.

Kılıç, Ü., 2000. Dim Barajı ve HES Seyahat Raporu, Yayımlanmamış, Ankara.

Kılıç, Ü., 2003. Kazakistan Seyahat Raporu, Yayımlanmamış, Ankara.

Kılıç, Ü., 2005a. Kuskunkıran Tüneli patlatma notları, Yayımlanmamış, Ankara.

Kılıç, Ü., 2005b. Bozöyük-Mekece Devlet Yolu İnşaatı tünel patlatma notları, Yayımlanmamış, Ankara.

Kılıç, Ü., 2007a. Değirmenüstü HES Enerji Tüneli Kazısı Sırasında Yapılan Delme Patlatma Çalışmaları, Teknik Rapor, Yayımlanmamış, Ankara.

Kılıç, Ü., 2007b. İncesu HES Enerji Tüneli Kazısı Sırasında Yapılan Delme Patlatma Çalışmaları, Yayımlanmamış Notlar, Ankara.

Kılıç, Ü., 2009. Başak Regülatörü ve HES Teknik Rapor, Yayınlanmamış, Ankara.

Kılıç, Ü., Şimşek, D., Geçmez, B., Alabaş, V., 2013. Bir Hidroelektrik Santral Projesinde enerji Tüneli Kazısı Sırasında İlerleme Hızını Arttırma ve Delme Patlatma Maliyet Optimizasyonu Çalışması, VII. Delme Patlatma Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s.171-180, Eskişehir.

Kılıç, Ü., ve Demir, E., 2013. Çeşitli Tünel Projelerindeki Gerçek Özgül Tüketim Verileri Ve Teorik Yaklaşımlarla Uyumu, VII. Delme Patlatma Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s.225-231, Eskişehir.

Kılıç, Ü., 2022. Balyan Tüneli patlatma notları, Yayımlanmamış, Ankara.

Olofsson, S., (2nd ed.), 2002. Applied Explosives Technology For Construction and Mining, Arla, Sweden, 168, 177-178 s.

The Effect of Faults, Delay Time and Scaled Distance on Blasting-Induced Vibration Parameters

E. Alan
İstanbul Okan University, Explosives Engineering, İstanbul

ABSTRACT: In this study scope; 24 shots were made by using explosives in 60 holes that were drilled in the tunnel faces, which were located between and outside of faults. 8 geophones, which were placed at predetermined points of the surface, and 6 microphones were used in order to measure the air shock and measure the parameter values of the vibrations occurred during the blasting applications. Data from the geophone and microphones were recorded on 6 seismographs. The distances between the shot points and the measurement stations are determined by a tacheometer and the Dowding equation is used for Scaled distance calculation.

The total number of seismic records, recorded in seismographs, is 118. The number of records of vibrations that crossed the faults is 42 and the number of records of vibrations that did not cross the fault is 76. The particle velocity, Peak particle velocity (PPV), frequency, amplitude, acceleration, displacement and wavelength were measured in transverse, longitudinal and vertical directions. The total number of measurements is 354. By evaluating all seismic records, the effect of delay intervals, faults and scaled distances on the particle velocity, frequency, amplitude, displacement, acceleration, wavelength were investigated.

1 INTRODUCTION

A “fault” is a planar fraction within a rock mass due to high tension caused by tectonic movement of plates. A “rock” is a natural solid substance, which may contain discontinuities, and consists of accumulation of a single or more minerals, fine rock particles, organic deposits and sometimes compressed plant pieces.

Controlled blasting technic is an alternative method for breaking up rocks from the main mass where mechanical methods are technically, environmentally and/or economically inadequate. This method which is applied by using civil explosives (Fig. 1) is preferred due to the experience gained in practice, the developments in technology and the low initial investment cost. Vibrations that occur during blasting cannot pass through geological discontinuities or they progress by losing energy at different rates while passing through discontinuities (Alan, 2021).

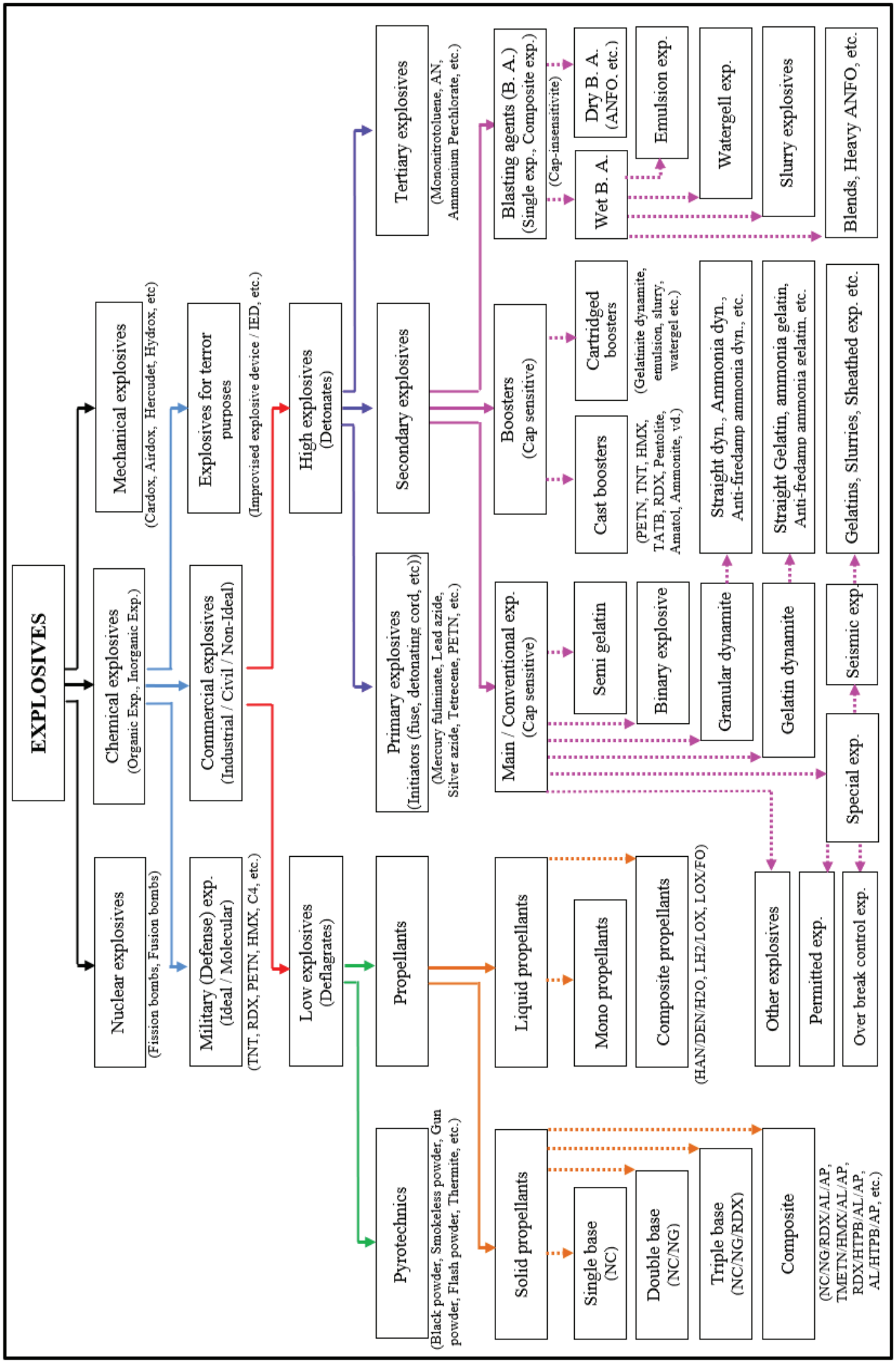


Figure 1. Classification of explosives

2 GENERAL INFORMATION

2.1 Kadıköy-Kartal Metro Project

Kadıköy-Kartal Rail Transportation System is a "heavy metro" project constructed by Anadoluray Joint Venture (Yapı Merkezi-Yüksel-Doğuş-Yenigün-Belen Construction Joint Venture) and Avrasya Metro Group (Astaldi, Makyol, Gülermak Joint Venture). Project route begins from Kadıköy Square and continues beneath the İbrahimağa-Koşuyolu-Acıbadem-E-5/D-100 Highway to the Kartal Overpass.

Project information: Lenght 21.662 m; number of stations 16; operating frequency 2,5 min.; vehicles in row 4-8 pcs; maximum speed 80 km/h; horizontal curve (main line) Rmin:350 m; horizontal curve (warehouse) Rmin: 50 m; commercial speed 45 km/h; max. elevation % 5; maximum superelevation 130 mm; track gauge 1.435 mm; workshops 11.500 m^2; warehouse area 90.000 m^2; theoretical capacity (one direction) 60.000 pax/h. (Alan, 2020).

Tunnel burden varies between 8 to 60 meters. Station tunnels, linking tunnels, stair and escalator tunnels and the main track line tunnels between Kozyatağı-Kartal stations are excavated by New Austrian Tunneling Method (NATM) within the scope of the project. The main track tunnels between Kadıköy-Kozyatağı excavated by Tunnel Boring Machıne (TBM external radius 6,50 m, compressive force to tunnel face 15.000 kN, cutting head discs 17" 49 pcs, segmental, electrical power 3.000 KVA) and EPBM (Machine external radius 6.520 mm, shield length 8,20 meters, compressive force to tunnel face 40.000 kN, minimum curve radius 250 m., segmental, electrical power 2.500 KVA). This project contributes to the solution of transportation problem for Anatolian side of İstanbul. The Kadıköy-Kartal Metro is integrated with "Marmaray Project" at İbrahimağa (Ayrılık Çeşmesi) Station. Kadıköy-Kartal Metro is in service since 17.08.2012 and travel time between Kadıköy and Kartal determined as 34 minutes.

2.2 Geological Structure

Geological investigation drill holes of ZKS 19 and ZKS 19/A were drilled to determine the geological and geotechnical characteristics of the Yenisahra Station tunnels area, where the excavations were carried out by using civil explosives (Fig. 1). It is understood from the drilling logs that this region, where the R&D (research and development) blasting applications are made, is the Kartal Formation. Kartal Formation, which is well exfoliated, contains various brachiopod, coral and bryozoa fossils, formed from scarce siltstone and sandstone stratified shales has fawn-gray color, named by Mehmet Önalan in 1982. Due to the influence of tectonic forces its structure is folded, fractured and jointed. With the effect of discontinuities, the unit on surface formed by tectonic deformation, has a thickness between 1 to 2 m (3,28 to 6,56 ft) and usually looks weathered or clayed (Yüksel et al. 2005). In the Yenisahra Region, the Kartal Formation is represented by gray, greenish gray colored shale with the intercalation of mudstone, sandstone, siltstone and shale. There are plenty of sericite flakes within sandstone and siltstones. Slump structures are observed in various scales along with the interlaminar structures such as parallel lamination, normal grading and convolute stratification. Limestones are bioclastic and defined as calcarenite and calcirudite according to grain size. The formation was sedimented under low-energy and open-deep marine conditions under wave floor. According to the fossils inside it was determined that the Kartal Formation belongs to medium-low Devonian stage (Yüksel et al. 2006; Alan, 2020).

2.3 Information about Work Area

The geotechnical specifications of the main rock, which is carbonaceous shale-shale and the blasts were made in, is given below in Table 1. By examining the Rock Quality Designation (RQD, Bieniawski, 1984) and uniaxial compressive strength values of the rock, which blasting applications are made, the rock mass rating determined as "fair".

Table 1. Specifications of the blasted rock (Yüksel et al. 2006)

Engineering parameters of the rock	Symbol	Unit	Parameter values
Rock Quality Degree	RQD	%	55.00
Porosity	n	%	1.63
Specific Weight	γ	gr/cm^3	2.67
Elasticity Module	E	kgf/cm^2	72,000.00
Tensile Strength	σ_t	kgf/cm^2	57.00
Poisson Ratio	v	-	0.27
Cohesion	c	kgf/cm^2	234.00
Angle of internal friction	φ	^{o}	41.00
Abrasivity index	F	-	1.08
Uniaxial Compressive Strength	σ_c	kgf/cm^2, Mpa	324.00, 31.77

The patterns are pre-determined, the holes are marked, the holes are drilled with Jumbo (Atlas Copco 282, rocked boomer, rock drill 2xCOP 1838ME, drilling system DCS18-280, for cross sections up to 45 m^2, machine length 11,83 m, machine height 2,34+0,7 m).

24 blasts were made in the Mid-Track, Kartal faces of B2-1 and B5-1 tunnels in the scope of Yenisahra Station construction. B2-1 tunnel is named as First Blasting Area (B-1) and B5-1 tunnel is named as Second Blasting Area (B-2) and measurement stations are named as S-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (Fig. 2).

There are 2 (two) faults on both sides of B-1. The fault on the left side (F-1) of the shot point is 53 m (173,8′) away and the fault on the right side (F-2) of the shot point is 52 m (170,6′) away. There is a fault (F-2) on 3 m (9,8′) left of B-2. F-2 fault is located between B-1 and B-2. The fault offset is between 15 - 20 cm filled with yellowish plastic clay and water (Fig. 2-3).

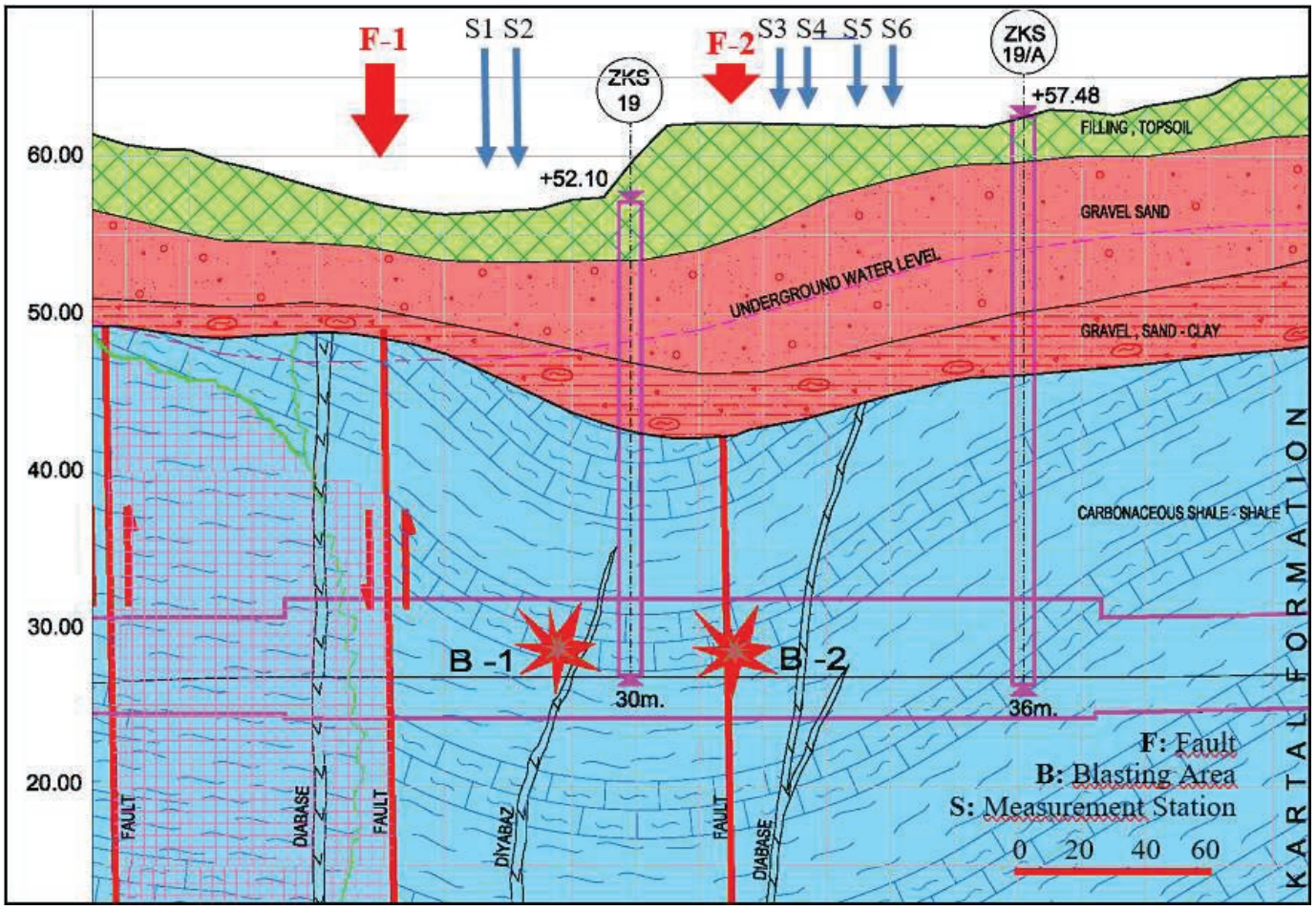


Figure 2. Geological profile of the location of blasting (Alan E., 2020)

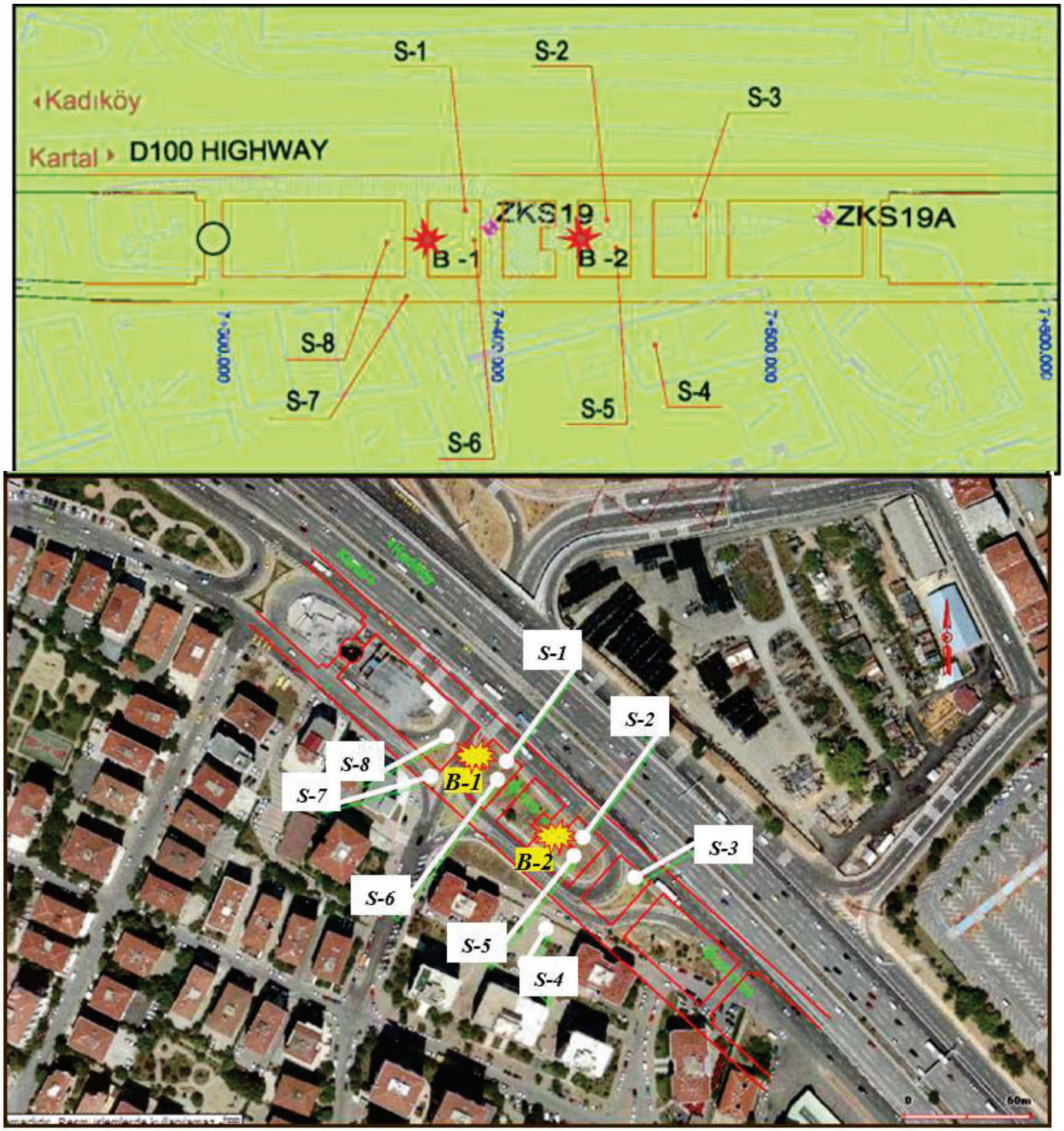


Figure 3. Plan view of the measurement stations and blasting locations (Alan, 2011)

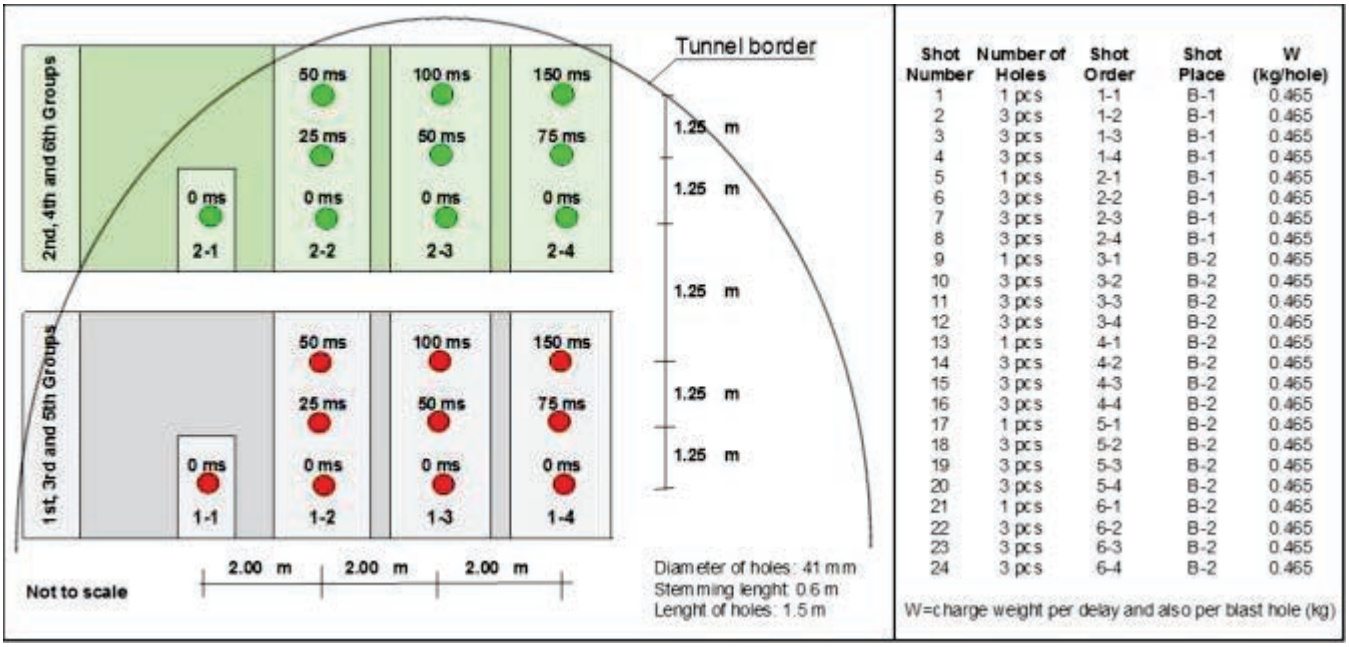
2.4 Information abaut Application and Measurement

The amount of explosives charged in each hole and the type of blasting caps are the same in all blasting applications. As main charge Powergel Magnum 365, which is a cap sensitive emulsion explosive (Cartridge size: 27x225 mm = 1,06x8,85 inch), as stemming material clay and as connection component detonating cord were used in applications. Blasting cap delay intervals are variable. After the holes were marked onto the faces, they were drilled with jumbo.

Six groups, which each has 10 holes were drilled for applications. Primarily, the first hole in each group was blasted, then holes with capsules of 0 ms, 25 ms, 50 ms, 75 ms delay intervals were blasted in groups of three (Fig. 4). The parameter values of the vibrations generated by blasts were recorded. The amount of explosive that used at the time of the unit is 0,465 kg. Information about the material used in blasting applications are below given in Table 2.

Table 2. Materials used in applications and their technical specifications (Orica Nitro, 2018)

Class	Materials used in applications and their specifications.		Unit
Packaged Explosive	Name	Powergel Magnum 365	
	Specific Weight	1,20	g/cm^3
	Ideal velocity of detonation	6.140,00	m/s
	Ideal blast pressure	112.900,00 / 116,65	atm, ton/cm^2
	Ideal blast tempereture	3.106,00 / 2.832,85	^{o}K, ^{o}C
	Ideal gas volume	873	lt/kg
	Packaged size	27x225	mm
	Packaged weight	155,00	g/pc
	Specific charge	465,00	g/blast hole
Detonators	Name	Exel MS (Nonel, milisecond)	
	Delays	0, 25, 50, 75	ms
	Components weight	940 (PETN+RDX)	mg
Initiating System	Name	Detonating cord	
	Component weight	5	g/m-PETN
	Velocity of detonation	6,50 to 7,00	m/sn
	Nominal diameter	3,7	mm (Average)
	Nominal tensile strength	70	70 kgf



Shot Number	Number of Holes	Shot Order	Shot Place	W (kg/hole)
1	1 pcs	1-1	B-1	0.465
2	3 pcs	1-2	B-1	0.465
3	3 pcs	1-3	B-1	0.465
4	3 pcs	1-4	B-1	0.465
5	1 pcs	2-1	B-1	0.465
6	3 pcs	2-2	B-1	0.465
7	3 pcs	2-3	B-1	0.465
8	3 pcs	2-4	B-1	0.465
9	1 pcs	3-1	B-2	0.465
10	3 pcs	3-2	B-2	0.465
11	3 pcs	3-3	B-2	0.465
12	3 pcs	3-4	B-2	0.465
13	1 pcs	4-1	B-2	0.465
14	3 pcs	4-2	B-2	0.465
15	3 pcs	4-3	B-2	0.465
16	3 pcs	4-4	B-2	0.465
17	1 pcs	5-1	B-2	0.465
18	3 pcs	5-2	B-2	0.465
19	3 pcs	5-3	B-2	0.465
20	3 pcs	5-4	B-2	0.465
21	1 pcs	6-1	B-2	0.465
22	3 pcs	6-2	B-2	0.465
23	3 pcs	6-3	B-2	0.465
24	3 pcs	6-4	B-2	0.465

Figure 4. The places of the blast holes on tunnel face, delay times and shot information

Six seismographs are placed on surface. Vibrations are recorded by geophones and sound intensity recorded by microphones as electrical signals, which are transmitted to Instantel mini mate plus model devices (Fig. 5). Particle velocity trigger value was >0,5 mm/sn. The distance between shot point and the monitoring station is measured by theodolite. $SD=R/(Wd^{0,5})$ equation is used to determine Scaled Distance (SD) (Dowding, 1985).

R: Absolute distance between the blast point and the measuring station (m).
Wd: Max. explosive charge per delay (kg).

Figure 5. Instantel mini mate plus sismograf

3 VIBRATION VALUES AND THEIR EVALUATION

The arithmetic average values of the vibration values and the air shock are given in Table 3 and values were calculated by statistical methods. When the table was created, the first blasting region (B-1), the second blasting region (B-2), the vibrations crossed the faults, the vibrations that did not cross the faults and the delay time intervals were deliberately written separately. The effects of the delay intervals, F-1 fault and F-2 fault on vibrations were investigated (Table 4-5). The fault, which is subjected during evaluation in regard to its effects on vibrations, is F-2 fault that located between B-1 and B-2.

For each parameter value measured at B-1, the number of seismic records that belongs to the vibrations that crossed the fault is 10 and the number of seismic records belongs to the vibrations that did not cross the fault is 32. The number of seismic records that belongs to the vibrations that cross the fault at B-2 is 32, and the number of seismic records that belongs to the vibrations that did not cross the fault is 44.

When the particle velocity (PV) values of 228 vibrations that did not cross the fault and 126 vibrations that crossed the fault are analyzed, it was determined that at all delay intervals the vibrations were superposed and after crossing the fault the PV values of the vibrations were found to be reduced in all directions (Fig. 6).

By ignoring the delay interval, the values of vibration parameters and difference ratios according to the vibration direction-blasting area-fault classification has been given in Table 4. The values that belongs to the vibrations that not crossed the fault have been accepted as 100,00 % and the values of the vibrations that crossed the fault have been compared in regard to this. The minus symbol (-) represents the values that have been decreased. As it is seen in the table the highest average of PPV values of the vibrations that crossed the fault is recorded in transverse direction and the highest average values for the vibrations that not crossed the fault is in longitudinal direction.

Also, the highest average of frequency values of the vibrations that crossed the fault (66,09 Hz) is recorded in longitudinal direction and the highest average of frequency values (75,6 Hz) of the vibrations that not crossed the fault is recorded in longitudinal direction Table 4.

The lowest measured vibration frequency is 22,30 Hz, which is higher than the natural frequencies of the buildings (5-10 Hz). The distribution of the frequency values of all vibrations is as given in Table 5.

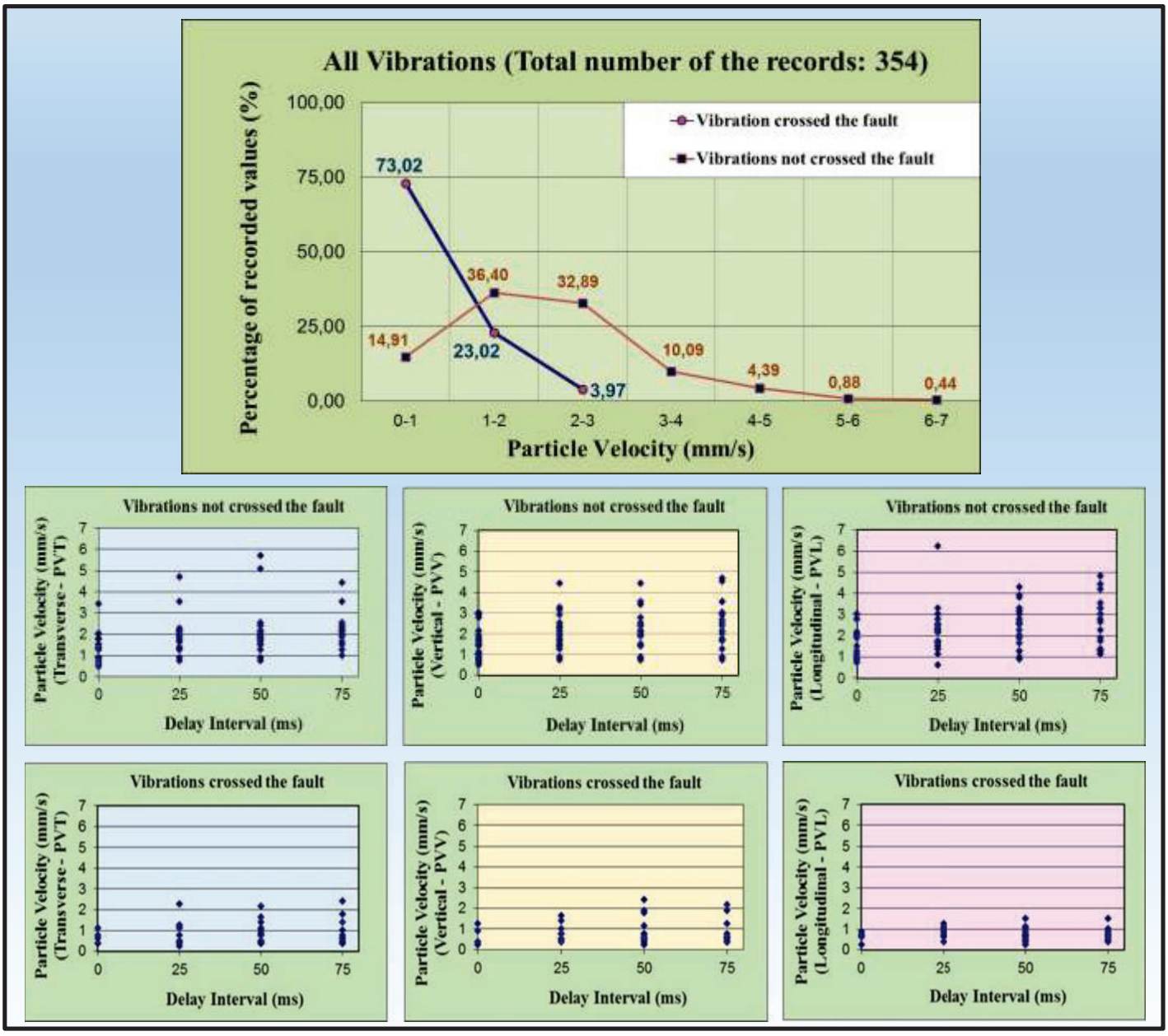


Figure 6. Range of measured PV values and the relation of PV-Delay Interval (Alan, 2020)

When the PPV and frequency values of all vibrations are analyzed, it was determined that the vibrations that crossed the fault had a lower PPV and frequency values (Fig. 7, Table 6). In addition, as it is seen from the USBM Norm charts, the ground vibrations caused by blasts were not able to damage the structures (Fig. 7).

Table 3. Arithmetic average of the parameter values of the vibrations

PARAMETER VALUES OF VIBRATIONS	Blast Infromation	Vibrations According to the Fault	Delay Interval, ms	PARTICLE VELOCITY,mm/s				FREQUENCY,Hz			DISPLACEMENT,mm			ACCELERATION,mm/s²			AMPLITUDE,mm			WAVELENGTH,mm			Air Shock, dB	Distance (R), m	Scaled Distance (SD)
				Transverse (PVT)	Verticle (PVV)	Longitudinal (PVL)	Resultant	Transverse	Vertical	Longitudinal	Transverse	Vertical	Longitudinal	Transverse	Vertical	Longitudinal	Transverse	Vertical	Longitudinal	Transverse	Vertical	Longitudinal			
	First Blasting Area	Crossed	0	0,38	0,57	0,44	0,84	92,65	100,00	82,00	0,0006	0,0007	0,0010	0,027	0,040	0,027	0,011	0,009	0,010	0,004	0,006	0,006	96,70	75,74	111,06
			50	0,41	0,57	0,48	0,86	85,93	100,00	80,60	0,0009	0,0009	0,0013	0,027	0,099	0,030	0,015	0,013	0,018	0,005	0,006	0,006	98,45	71,30	104,55
			75	0,51	0,54	0,63	0,98	61,75	88,98	72,08	0,0017	0,0013	0,0019	0,033	0,033	0,036	0,018	0,015	0,021	0,009	0,006	0,009	100,68	69,91	102,52
		Not Crossed	0	1,45	1,40	1,65	2,64	87,80	75,55	92,84	0,0029	0,0026	0,0026	0,109	0,101	0,128	0,024	0,022	0,023	0,018	0,020	0,018	102,34	30,34	44,50
			25	1,62	1,68	2,19	3,25	84,79	84,90	91,95	0,0033	0,0034	0,0037	0,117	0,130	0,169	0,034	0,030	0,043	0,022	0,020	0,025	108,58	28,46	41,73
			50	1,51	1,86	2,27	3,32	83,85	86,55	82,16	0,0033	0,0031	0,0040	0,119	0,139	0,164	0,046	0,044	0,065	0,019	0,021	0,028	101,79	28,54	41,85
			75	2,10	2,67	3,03	4,62	87,93	75,51	78,15	0,0041	0,0047	0,0049	0,154	0,191	0,212	0,049	0,053	0,061	0,027	0,034	0,038	104,31	28,72	42,11
		All	0	1,23	1,23	1,41	2,28	88,77	80,44	90,67	0,0025	0,0022	0,0023	0,093	0,089	0,107	0,021	0,019	0,020	0,015	0,017	0,015	101,21	39,42	57,81
			25	1,62	1,68	2,19	3,25	84,79	84,90	91,95	0,0033	0,0034	0,0037	0,117	0,130	0,169	0,034	0,030	0,043	0,022	0,020	0,025	108,58	28,46	41,73
			50	1,14	1,43	1,67	2,50	84,54	91,03	81,64	0,0025	0,0024	0,0031	0,088	0,126	0,119	0,036	0,034	0,049	0,014	0,016	0,021	100,68	42,79	62,75
			75	1,57	1,96	2,23	3,41	79,20	80,00	76,13	0,0033	0,0036	0,0039	0,114	0,138	0,154	0,038	0,040	0,048	0,021	0,025	0,028	103,10	42,45	62,25
	Second Blasting Area	Crossed	0	0,85	0,68	0,76	1,35	61,03	68,73	67,47	0,0025	0,0016	0,0022	0,044	0,040	0,035	0,019	0,025	0,016	0,015	0,009	0,012	94,97	49,44	72,50
			25	0,95	0,79	0,85	1,53	73,86	76,29	60,49	0,0025	0,0021	0,0027	0,065	0,052	0,050	0,025	0,025	0,024	0,014	0,011	0,017	95,25	50,44	73,97
			50	0,97	0,93	0,83	1,61	62,92	65,33	62,80	0,0027	0,0025	0,0028	0,070	0,046	0,048	0,034	0,030	0,031	0,017	0,015	0,015	96,94	50,72	74,38
			75	1,18	1,03	0,87	1,82	73,06	72,87	62,89	0,0030	0,0024	0,0028	0,076	0,059	0,059	0,035	0,030	0,031	0,017	0,013	0,017	96,26	52,22	76,58
		Not Crossed	0	1,45	1,60	1,52	2,71	84,69	79,54	60,72	0,0029	0,0035	0,0041	0,090	0,084	0,083	0,023	0,029	0,022	0,018	0,025	0,029	98,97	36,91	54,12
			25	2,20	2,30	2,48	4,07	81,18	73,89	75,55	0,0046	0,0054	0,0057	0,134	0,153	0,132	0,035	0,045	0,034	0,028	0,039	0,036	100,31	35,53	52,11
			50	2,56	2,28	2,56	4,36	77,93	76,64	68,40	0,0053	0,0054	0,0061	0,154	0,134	0,130	0,063	0,067	0,057	0,034	0,034	0,041	101,32	34,62	50,77
			75	2,31	2,23	2,26	4,01	80,64	77,68	65,20	0,0050	0,0046	0,0052	0,145	0,121	0,122	0,050	0,052	0,048	0,030	0,030	0,040	100,56	34,23	50,19
		All	0	1,32	1,41	1,36	2,42	79,62	77,22	62,16	0,0028	0,0031	0,0037	0,080	0,075	0,073	0,022	0,028	0,021	0,017	0,022	0,026	98,11	39,59	58,06
			25	1,63	1,61	1,74	2,91	77,85	74,98	68,70	0,0036	0,0039	0,0044	0,102	0,107	0,095	0,030	0,036	0,030	0,022	0,026	0,027	98,01	42,31	62,05
			50	1,77	1,61	1,69	2,99	70,42	70,99	65,60	0,0040	0,0040	0,0044	0,112	0,090	0,089	0,048	0,048	0,044	0,025	0,024	0,028	99,13	42,67	62,57
			75	1,82	1,71	1,65	3,05	77,33	75,58	64,19	0,0041	0,0036	0,0042	0,114	0,094	0,094	0,044	0,042	0,041	0,025	0,023	0,030	98,68	42,10	61,74
	All Vibrations	Crossed	0	0,66	0,64	0,63	1,14	73,68	81,24	73,28	0,0018	0,0013	0,0017	0,037	0,040	0,032	0,016	0,019	0,013	0,011	0,008	0,010	95,66	59,96	87,92
			25	0,95	0,79	0,85	1,53	73,86	76,29	60,49	0,0025	0,0021	0,0027	0,065	0,052	0,050	0,025	0,025	0,024	0,014	0,011	0,017	95,25	50,44	73,97
			50	0,83	0,84	0,74	1,42	68,67	74,00	67,25	0,0022	0,0021	0,0024	0,059	0,060	0,043	0,029	0,026	0,028	0,014	0,012	0,013	97,32	55,87	81,93
			75	0,94	0,85	0,78	1,51	68,95	78,73	66,23	0,0025	0,0020	0,0025	0,060	0,049	0,051	0,029	0,024	0,027	0,014	0,011	0,014	97,86	58,65	86,01
		Not Crossed	0	1,45	1,52	1,58	2,68	86,00	77,86	74,24	0,0029	0,0031	0,0034	0,098	0,091	0,102	0,023	0,026	0,023	0,018	0,023	0,025	100,39	34,14	50,07
			25	1,97	2,05	2,36	3,74	82,62	78,30	82,11	0,0040	0,0046	0,0049	0,127	0,144	0,147	0,035	0,039	0,038	0,026	0,031	0,031	103,62	32,70	47,96
			50	2,14	2,11	2,44	3,95	80,30	80,61	73,91	0,0045	0,0045	0,0052	0,140	0,136	0,144	0,056	0,058	0,060	0,028	0,029	0,036	101,51	32,18	47,20
			75	2,21	2,44	2,62	4,30	84,07	76,66	71,29	0,0046	0,0047	0,0051	0,149	0,154	0,164	0,050	0,052	0,054	0,029	0,032	0,039	102,32	31,63	46,39
		All	0	1,29	1,33	1,38	2,36	83,43	78,56	74,04	0,0027	0,0027	0,0031	0,086	0,081	0,087	0,022	0,025	0,021	0,016	0,020	0,021	99,40	39,52	57,96
			25	1,63	1,63	1,86	3,00	79,70	77,63	74,90	0,0035	0,0038	0,0042	0,106	0,113	0,115	0,031	0,034	0,033	0,022	0,024	0,026	100,83	38,62	56,63
			50	1,56	1,55	1,69	2,83	75,13	77,67	70,95	0,0035	0,0034	0,0040	0,104	0,102	0,099	0,044	0,043	0,046	0,022	0,022	0,026	99,64	42,71	62,63
			75	1,71	1,81	1,90	3,20	78,13	77,47	69,30	0,0038	0,0036	0,0041	0,114	0,113	0,120	0,041	0,041	0,044	0,023	0,024	0,029	100,57	42,25	61,95
DIFFERENCE RATIO (%)	B-1	Crossed	0	-280,39	-144,06	-272,60	-214,22	5,23	24,45	-13,22	-374,80	-270,95	-153,29	-312,08	-154,28	-381,32	-113,50	-140,26	-137,55	-338,26	-243,33	-185,98	-5,83	59,94	59,94
			50	-265,48	-225,97	-377,87	-287,21	2,41	13,45	-1,94	-286,66	-260,95	-206,55	-350,05	-40,04	-450,13	-203,54	-244,53	-269,50	-285,74	-268,10	-353,18	-3,39	59,98	59,98
			75	-311,79	-395,08	-377,55	-372,56	-42,39	15,13	-8,43	-149,25	-267,28	-165,86	-365,42	-475,21	-481,72	-171,00	-263,86	-189,73	-212,56	-475,20	-322,70	-3,61	58,92	58,92
	B-2		0	-71,75	-136,80	-100,14	-101,27	-38,76	-15,72	10,00	-15,30	-114,45	-83,15	-104,41	-112,28	-135,09	-22,37	-14,57	-39,36	-18,91	-173,98	-144,38	-4,22	25,34	25,34
			25	-131,22	-191,44	-190,93	-166,76	-9,90	3,14	-24,90	-81,66	-161,22	-108,29	-105,90	-195,16	-162,97	-37,59	-75,89	-37,90	-98,35	-256,83	-113,46	-5,31	29,56	29,56
			50	-162,77	-145,49	-210,37	-170,41	-23,85	-17,31	-8,92	-97,41	-115,90	-118,05	-120,74	-188,12	-174,49	-85,08	-121,63	-79,82	-103,67	-135,85	-174,24	-4,51	31,75	31,75
			75	-96,07	-115,76	-159,43	-120,61	-10,39	-6,60	-3,68	-69,26	-92,25	-85,22	-90,81	-105,92	-108,09	-44,26	-75,39	-54,21	-74,56	-126,22	-141,12	-4,47	34,45	34,45
	All		0	-119,78	-138,72	-148,70	-134,26	-16,72	4,16	-1,31	-66,00	-148,17	-97,93	-164,82	-129,96	-220,11	-48,35	-38,09	-67,20	-68,23	-192,85	-152,49	-4,94	43,05	43,05
			25	-106,79	-160,22	-177,49	-145,18	-11,86	-2,63	-35,74	-61,09	-122,80	-79,45	-95,52	-177,99	-192,07	-36,80	-52,85	-53,69	-82,54	-186,45	-87,07	-8,78	35,17	35,17
			50	-156,56	-151,48	-231,42	-177,06	-16,93	-8,93	-9,90	-102,17	-114,60	-117,62	-137,80	-127,81	-233,93	-92,03	-123,84	-113,89	-103,72	-134,83	-179,78	-4,30	42,39	42,39
			75	-136,22	-185,34	-234,10	-184,20	-21,94	2,63	-7,65	-84,67	-133,90	-106,03	-147,47	-211,05	-224,91	-72,44	-117,13	-97,17	-102,86	-200,97	-181,49	-4,56	46,06	46,06

Note: The explosive amount used in unit of time is 0.465 kg in all blasts. Difference ratio of the frequencies of the vibrations not crossed the fault are accepted as %100.

Table 4. Vibration parameter values according to the fault and vibration direction

		Arithmetic Average of the Recorded Values									Difference Ratio of the Vibrations Crossed the Fault (%)					
		B-1			B-2			All Blasts			B-1		B-2		All Blasts	
PARAMETER	Direction	Vibrations Crossed the Fault	Vibrations not Crossed the Fault	All Vibrations	Vibrations Crossed the Fault	Vibrations not Crossed the Fault	All Vibrations	Vibrations Crossed the Fault	Vibrations not Crossed the Fault	All Vibrations	Vibrations Crossed the Fault	Vibrations not Crossed the Fault	Vibrations Crossed the Fault	Vibrations not Crossed the Fault	Vibrations Crossed the Fault	Vibrations not Crossed the Fault
PPV (mm/s)	Transverse	0,44	1,67	1,38	1,00	2,14	1,66	0,87	1,94	1,56	-275,04	100,00	-113,46	100,00	-123,30	100,00
	Vertical	0,56	1,90	1,58	0,88	2,11	1,59	0,81	2,02	1,59	-240,73	100,00	-138,07	100,00	-150,29	100,00
	Longitudinal	0,53	2,29	1,87	0,84	2,22	1,64	0,76	2,25	1,72	-329,21	100,00	-164,78	100,00	-193,66	100,00
FREQUENCY (Hz)	Transverse	77,60	86,09	84,07	68,38	81,06	75,72	70,57	83,18	78,69	-10,94	100,00	-18,55	100,00	-17,86	100,00
	Vertical	95,59	80,63	84,19	70,73	76,83	74,26	76,65	78,43	77,79	15,65	100,00	-8,63	100,00	-2,33	100,00
	Longitudinal	77,47	86,28	84,18	62,53	67,78	65,57	66,09	75,56	72,19	-11,37	100,00	-8,38	100,00	-14,33	100,00
AMPLITUDE (mm)	Transverse	0,015	0,038	0,033	0,030	0,043	0,037	0,026	0,041	0,036	-146,56	100,00	-42,06	100,00	-53,58	100,00
	Vertical	0,013	0,037	0,031	0,028	0,048	0,040	0,024	0,044	0,037	-191,72	100,00	-71,90	100,00	-78,60	100,00
	Longitudinal	0,017	0,048	0,041	0,028	0,040	0,035	0,025	0,043	0,037	-176,57	100,00	-44,29	100,00	-71,63	100,00
ACCELERATION (mm/s^2)	Transverse	0,029	0,125	0,102	0,067	0,130	0,104	0,058	0,128	0,103	-328,29	100,00	-94,48	100,00	-120,67	100,00
	Vertical	0,061	0,140	0,121	0,050	0,124	0,093	0,053	0,131	0,103	-130,15	100,00	-147,20	100,00	-148,21	100,00
	Longitudinal	0,032	0,168	0,136	0,050	0,117	0,089	0,045	0,139	0,106	-428,74	100,00	-136,26	100,00	-205,43	100,00
WAVELENGTH (mm)	Transverse	0,006	0,022	0,018	0,016	0,028	0,023	0,014	0,025	0,021	-245,68	100,00	-73,76	100,00	-84,69	100,00
	Vertical	0,006	0,024	0,019	0,013	0,032	0,024	0,011	0,029	0,022	-306,68	100,00	-156,29	100,00	-160,64	100,00
	Longitudinal	0,007	0,027	0,022	0,016	0,037	0,028	0,014	0,033	0,026	-271,56	100,00	-133,70	100,00	-138,22	100,00
DISPLACEMENT (mm)	Transverse	0,0011	0,0034	0,0029	0,0027	0,0044	0,0037	0,0023	0,0040	0,0034	-202,23	100,00	-66,01	100,00	-73,70	100,00
	Vertical	0,0010	0,0035	0,0029	0,0023	0,0048	0,0037	0,0020	0,0042	0,0034	-246,18	100,00	-110,59	100,00	-115,07	100,00
	Longitudinal	0,0015	0,0038	0,0033	0,0027	0,0053	0,0042	0,0024	0,0047	0,0039	-159,46	100,00	-94,33	100,00	-92,73	100,00
Scaled Distance (SD)		105,04	42,55	57,43	74,56	51,85	61,41	81,82	47,94	59,99	59,50	100,00	30,45	100,00	41,41	100,00
Air Shock (dB)		98,99	104,25	103,00	96,08	100,30	98,52	96,77	101,96	100,12	-5,32	100,00	-4,39	100,00	-5,37	100,00
Distance (m)		71,63	29,01	39,16	50,84	35,36	41,88	55,79	32,69	40,91	59,50	100,00	30,45	100,00	41,41	100,00
Horizontal Distance (m)		66,62	17,87	29,48	44,07	21,71	31,13	49,44	20,09	30,54	73,17	100,00	50,74	100,00	59,36	100,00

Table 5. Percentage of the recorded values of frequencies in all directions

	Measurement Quantity (piece)	Frequency Range				
		0-20 (Hz)	20-40 (Hz)	40-60 (Hz)	60-80 (Hz)	80-100 (Hz)
Vibrations not crossed the fault	228	-	5,26 %	17,54 %	21,05 %	56,14 %
Vibrations crossed the fault	126	-	16,07 %	21,43 %	16,67 %	45,24 %

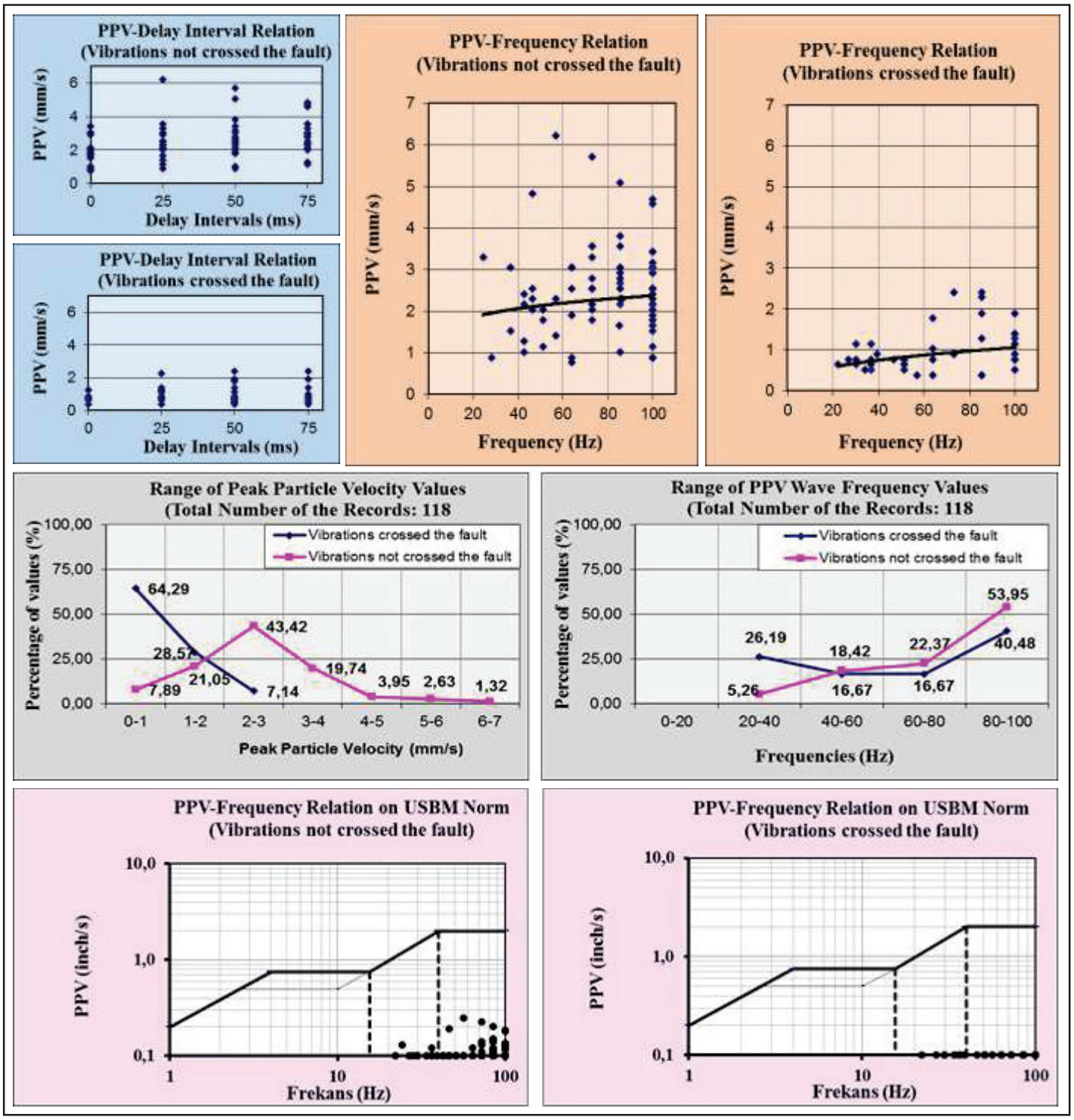


Figure 7. Range of the measured PPV values and PPV-Frequency relation (USBM Norm)

Table 6. Range of PPV values in regard to the locations of blasts

	Vibrations according to the faults	Number of measurement (piece)	PPV range 0-1 (mm/s)	PPV range 1-3 (mm/s)	PPV range 3-5 (mm/s)	PPV range 5-7 (mm/s)
B-1	Vibrations not crossed the fault	32	12,50 %	59,38 %	28,13 %	-
	Vibrations crossed the fault	10	100,00 %	-	-	-
B-2	Vibrations not crossed the fault	44	4,55 %	68,18 %	20,45 %	6,82 %
	Vibrations crossed the fault	32	53,13 %	46,88 %	-	-
All	Vibrations not crossed the fault	76	7,89 %	64,47 %	23,68 %	3,95 %
	Vibrations crossed the fault	42	64,29 %	35,71 %	-	-

The PPV values are decreased as the SD values of the vibrations are increased. Vibration parameter values were analyzed and the ground transmission coefficients (k), attenuation coefficients (β) and correlation coefficients (R^2) were determined (Fig. 8, Table 7-8).

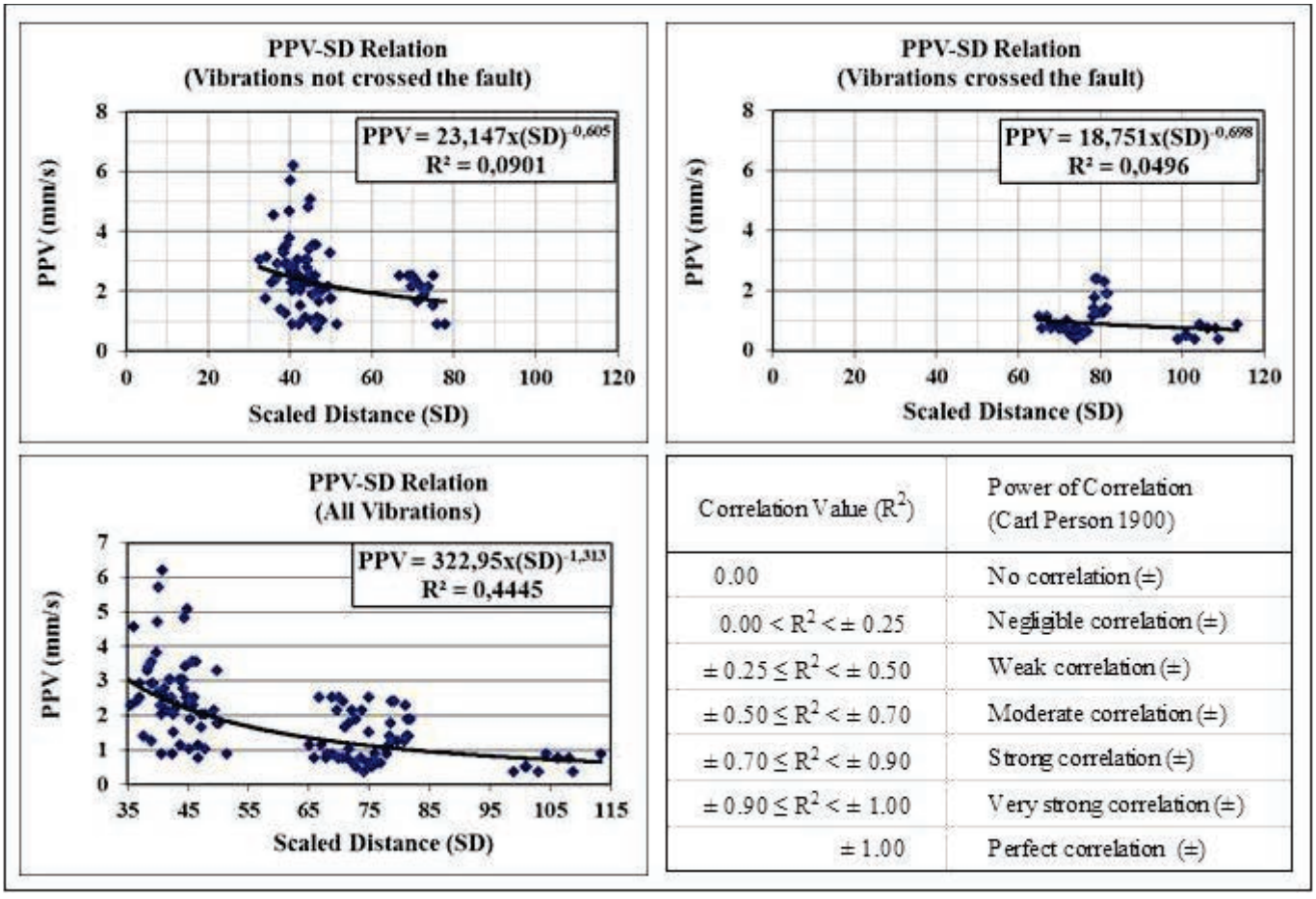


Figure 8. PPV-SD of measured vibrations parameters and correlation

Table 7. Coefficients of k, β and correlation of PPV-SD according to the locations of blasts

	Positions of the vibrations according to the faults	Number of vibrations (pcs)	Correlation value (R^2)	Field transmission coefficient (k)	Damping coefficient (β)
B-1	Vibrations not crossed the fault	32	0,1392	949,30000	-1,6316
	Vibrations crossed the fault	10	0,3279	0,02770	-2,2863
B-2	Vibrations not crossed the fault	44	0,1875	36,1350	-0,6951
	Vibrations crossed the fault	32	0,3424	0,0650	-3,7352
All	Vibrations not crossed the fault	76	0,0901	23,1470	-0,6052
	Vibrations crossed the fault	42	0,0496	18,7510	-0,6984

Table 8. Coefficients of k, β and correlation of PPV-SD according to delay intervals

	Delay interval (ms)	Number of vibrations (pcs)	Correlation value (R^2)	Field transmission coefficient (k)	Damping coefficient (β)
Vibrations crossed the fault	0	18	0,2998	145,1100	-1,1462
	25	21	0,0294	6,9844	-0,2885
	50	20	0,0518	12,6310	-0,4244
	75	17	0,0187	7,2377	-0,2539
	0/25/50/75	76	0,0901	23,1470	-0,6052
Vibrations not crossed the fault	0	5	0,0883	8,0729	-0,5394
	25	10	0,2844	0,0505	-2,6700
	50	16	0,0650	32,1210	-0,8235
	75	11	0,1154	192,9400	-1,2117
	0/25/50/75	42	0,0496	18,7510	-0,6984
All vibrations	0	23	0,5117	221,1900	-1,2612
	25	31	0,3011	139,4300	-1,1004
	50	36	0,4848	500,0000	-1,4159
	75	28	0,5279	600,6600	-1,4362
	0/25/50/75	118	0,4445	332,9500	-1,3127

The highest displacement measured at B-1 where the vibrations crossed the faults in longitudinal direction with the 75 ms delay interval and the highest value measured at B-2 was in the transverse direction with the 75 ms delay interval. The highest displacement for vibration that did not cross the fault was in the longitudinal direction at a delay of 50 ms at B-2. The lowest value is measured in blasts at the zero ms delay interval in the vertical direction at B-1.

The maximum acceleration in vibrations that crossed the fault was measured at 50 ms delay interval in the vertical direction at B-1, and the maximum decrease of acceleration value is measured in longitudinal direction as -481,72 % at the 75 ms delay interval.

During the blasting applications, the highest amplitude is measured in the transverse direction at a delay interval of 75 ms at B-2, and the lowest amplitude is measured in the delay interval of 0 (zero) ms at B-1 in the vertical direction.

When the amplitudes of vibrations that did not cross the fault are analyzed, it was seen that the measured maximum value is at the 50 ms delay interval at B-2 in vertical direction, and the lowest value is in the 0 (zero) ms delay interval at B-1 in vertical direction. The lowest wavelength value is measured in transverse direction at B-1 at 0 (zero) ms delay, and the highest wavelength value is measured in transverse direction again at B-2 at a delay interval of 75 ms for the vibrations that crossed the fault. The highest wavelength value of vibrations that did not cross the faults is measured at the 50 ms delay interval in longitudinal direction at B-2, and the lowest value at the B-1 at 0 (zero) ms delay interval.

4 RESULTS

20 holes were drilled at B-1, 8 shots were made and 42 vibrations were analyzed. In B-2, 40 holes were drilled, 16 shots were made and 76 vibrations were analyzed. The total number of analyzed seismic records is 118, the number of vibrations crossed the fault is 42, and the number of vibrations that did not cross the fault is 76.

When the vibrations formed during the R&D blasts were examined, it was determined that the parameter values of vibrations that crossed the faults are lower than the ones that did not cross the faults. In addition, when the particle velocity values of all vibrations are examined according to the present circumstances, it is determined that the waves did not cross the fault in all delay intervals are superposed in all directions, and that the least superposing occurred in the 50 ms delay range.

In all blasts, although the amount of explosive that used at the unit of time was 0,465 kg (1,02 lb). the frequency values measured at the blasts made at B-1 are higher than the frequency values measured at the blasts made at B-2. Since the measured frequency values are greater than 20 Hz, it is not possible to cause any structural damage due to the resonance and also in regard to PPV-Frequency relation according to the internationally accepted norms.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to Mr. Ersin Arıoğlu, Mr. Prof. Dr. Ergin Arıoğlu, Mr. Prof. Dr. Ali Kahriman, Mr. Başar Arıoğlu, Mr. Özge Arıoğlu, Mr. Ramih Muştu, Mr. Naim İşli, Mr. İlker İnceleme, Mr. Abdullah Kılıç, Mr. Burak Yıldırım, Mr. Ertuğrul Dinçel, Mr. Ergenekon Albayrak, Tesfaye Diea Berata, Mr. Akın Domaç, Mr. İbrahim Sefer, Mrs. İnci Üste, Mrs. Döne Alan, Mr. Mehmet Alan, Mr. Ahmet Alan, Mr. Mehmet Ali Alan, Mrs. Güler Alan, his family, his blasting team and Anadoluray Metro Project personnel for their support and encouragement.

REFERENCES

Alan E. 2011, The Effect of Delay Time, Fault and Scaled Distance on Vibration Parameters in Excavations with Blasting, *6. National Aggregate Symposium,* Sivas, Turkey, (105-126)

Alan E. 2020, The Effect of Artificial Discontinuities Formed by Presplitting with Different Depths on Structural Damage Risk. *46th annual Conference on Explosives and Blasting Technique; International Society of Explosives Engineers (ISEE)*, Denver, Colorado, USA (pp. 297-306).

Alan E. 2020, The Effect of Faults, Delay Time and Scaled Distance on Vibration Parameters. *46th annual Conference on Explosives and Blasting Technique; International Society of Explosives Engineers (ISEE)*, Denver, Colorado, USA, (pp. 643-652).

Alan E. 2021, Effect of Artificial Discontinuities Formed by Presplitting with Different Depths on PPV and Structural Damage Risk,*10th International Drilling and Blasting Symposium*, Antalya, (pp. 241-254).

Alan E. 2021, Effect of Discontinuities Formed by Pre-Splitting at Different Distance Intervals on Peak Particle Velocity, Frequency and Structural Damage Risk, *10th International Drilling and Blasting Symposium*, Antalya, (pp. 287-303).

Bieniawski, Z.T. 1984, *Rock Mechacnis Design in Mining and Tunneling*; Rotterdam, Netherland, (pp. 272).

Dowding C.H., 1985, *Blast Vibration Monitoring and Control,* Englewood Cliffs, NJ, (pp. 119–126)

Orica, http://www.orica-nitro.com.tr/pdf/powergel_magnum365.pdf, http://www.orica-nitro.com.tr/235-exel-ms&lang=1&a=1, visit date 10.07.2018

Orica Nitro, file:///C:/Users/enver.alan/Downloads/TDS_Australia_5P%20Cordtex%20Detonating%20Cord_20160905.doc.pdf, visit date 10.07.2018

Yüksel A., Yeşilçimen Ö., Arıoğlu E. 2006. Kadıköy-Kartal Railed Public Transport System Project Geological and Geotechnical Studies, *VIII. Regional Rock Mechanics Symposium*, İstanbul

Yüksel A., Yeşilçimen Ö., Sözak N.N., Gülle G. 2005, Kadıköy-Kartal Railed Public Transport System, Engineering Geology Report, İstanbul

Galeri Patlatmaları için Yakın Mesafe Parçacık Hızı Tahminine Dayanan Bir Modelleme

A Near-Field Particle Velocity Model for Underground Face Blasting

T. Hüdaverdi, Y. Ağan
İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada yeraltı galeri patlatmalarında galeri çevresinde oluşabilecek hasarı değerlendirmek amacıyla parçacık hızına dayanan bir model tartışılmaktadır. Bu amaçla yeraltı bakır madeninde uygulanan örnek bir tasarım ele alınmıştır. Delikler üç farklı senaryo hedeflenerek doldurulmuştur. Birinci senaryoda tavan ve çevre deliklerine 4 adet emülsiyon kartuş patlayıcı yerleştirilmiştir. İkinci ve üçüncü senaryoda ise tavan ve yan deliklere 24 milimetre ve 19 milimetre kartuş patlayıcılar yerleştirilmiştir. Modelleme özel bir yazılım kullanılarak Holmberg-Persson yaklaşımına göre gerçekleştirilmiştir. Kontur patlayıcıların kullanımı ile birlikte çevre deliklerinin civarında oluşan yer sarsıntısı seviyeleri azalmış, dolayısıyla yan kayaçta gerçekleşmesi muhtemel hasar olasılığı azaltılmıştır. Özellikle 19 mm çaplı kontur patlayıcıların kullanılmasıyla delik çevresinde oluşan parçacık hızı seviyeleri 500-1300 milimetre/saniye civarına düşürülmüştür. Kontur patlayıcıların kullanılması doğrusal şarj yoğunluğunu 0.50-0.30 kilogram/metre seviyesine indirmektedir.

ABSTRACT: This study discusses a particle velocity model to evaluate blast induced damage during underground face blasting operations. A blast pattern applied in underground copper mine was considered for the research. Blastholes were charged based on three different scenarios. In the first scenario, the roof and wall holes were charged using 4 emulsion cartridge explosives. In the second and third scenarios, roof and wall holes were charged using 24 millimeters and 19 millimeters contour explosives. Simulation was performed using a special software based on Holmberg-Persson approach. Application of contour explosives provided a reduction in particle velocity levels near the wall holes. Damage probability for surrounding rock was reduced. Application of 19 millimeters contour explosives reduced the particle velocity values down to 500-1300 millimeter per second near the charged holes. Use of contour explosives decreased the linear charge density down to 0.50-0.30 kilogram per meters.

1 GİRİŞ

Yeraltı galeri ve tünel patlatma tekniğinde hedef en düşük maliyet ile kazı operasyonunu gerçekleştirmektir. Özellikle yerleşim yerlerinin yakınında gerçekleştirilen patlatmalarda yer sarsıntısının da en düşük seviyede tutulması gerekir. Atım verimliliği istenen ilerleme miktarının ne kadar sağlandığı ile ölçülür. Ek olarak özellikle cevher içinde gerçekleştirilen atımlarda kırılan kayacın boyut dağılımı da önem arz eder. Optimum parçalanma yükleme ve nakliyatta kolaylık sağlayacaktır.

Galeri atımlarında diğer önemli konu aşırı söküm ve galeri-tünel çevresinde oluşan hasardır. Aşırı söküm planlanan kayaçtan daha fazla kısmın kırılması ve parçalanması anlamına gelir.

Aşırı söküm sonucu oluşan boşlukların doldurulması gerekmektedir. Kesitin dışındaki kayaç tamamen kırılmasa bile oluşan zedelenme tünel veya galeri stabilitesini etkileyebilmektedir (Jimeno vd., 1995).

Bu araştırmada aşırı sökümün veya yan kayaca verilen zararın tahmin edilmesi amacıyla, yakın mesafe parçacık hızı tahminine dayanan bir modelleme tanıtılmaktadır. Bu yaklaşımda patlatma sırasında yan kayaca verebilecek zararın tespiti amacıyla parçacık hızı seviyeleri kullanılmaktadır. Bu temel konsepti farklı araştırmacılar dile getirse de en çok kullanılan ve yorumlanan model Holmberg ve Persson (1980) modelidir. Holmberg ve Persson'a (1980) göre patlayıcı şarjının yakın kısmında kritik deformasyon seviyesi geçilirse kayaçta kalıcı hasar oluşabilir. Elastik ortamda patlatma kaynaklı deformasyon en yüksek parçacık hızıyla (ppv) büyük ölçüde korelasyona sahiptir. En yüksek parçacık hızının tahmini ile kayaçta oluşan patlatma kaynaklı deformasyonu veya hasar miktarını öngörebilmek mümkün olmaktadır.

Patlatma sırasında yan kayaçta oluşacak etkiyi incelmek için, bakır madeni cevher galerilerinde gerçekleştirilen örnek bir patlatma tasarımı esas alınmıştır. Bu doğrultuda JKSimBlast yazılımı kullanılarak galeri kesitinin hemen üstünde oluşan yer sarsıntısı seviyeleri incelenmiştir. Simülasyonda delikler yerleştirildikten sonra tünel ve galeri patlatma tekniğine uygun bir ateşleme tasarımı oluşturulmuştur. Simülasyon üç farklı atım senaryosunu incelemektedir. Tüm senaryolarda kesme, tarama ve taban deliklerinde 6 adet emülsiyon kartuş patlayıcı mevcuttur. Farklı şarj tekniği tavan ve yan (duvar) deliklerde uygulanmıştır. Özellikle tavan ve yan deliklerde doğrusal şarj yoğunluğunun düşürülmesi çevre kayaca verilecek zararı minimum seviyeye indirecektir.

2 HOLMBERG VE PERSSON MODELİ

Holmberg ve Persson (1980) modeline göre elastik ortamda patlatma kaynaklı deformasyon en yüksek parçacık hızı ile büyük ölçüde korelasyona sahiptir. En yüksek parçacık hızının tahmini ile kayaçta oluşan patlatma kaynaklı deformasyonu veya hasar miktarını öngörebilmek mümkün olacaktır.

Buna göre yayılan patlatma dalgaları (v) kullanılan patlayıcı miktarına dayanan ölçekli mesafe kuralına uymaktadır (Eşitlik 1):

$$v = K\frac{W^{\propto}}{R^{\beta}} \tag{1}$$

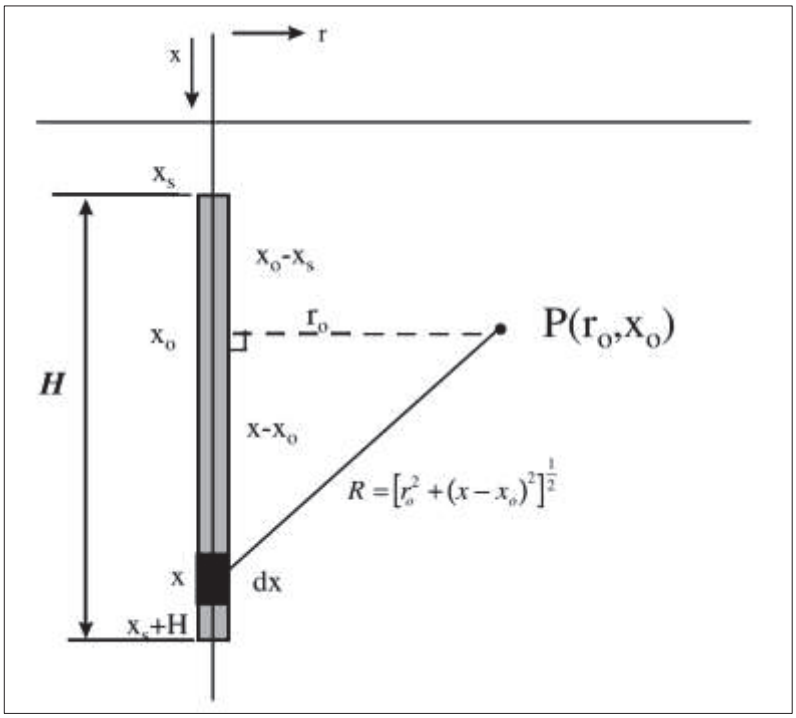
Burada W kullanılan patlayıcı şarj miktarı, R patlatma kaynağına olan mesafe, K, α ve β sahaya özgü dalga yayılma katsayılarıdır. Bu modelde birtakım kabuller gerçekleştirilir. Buna göre;

- Her bir birim patlayıcı şarjından kaynaklanan en yüksek parçacık hızları sayısal olarak toplanabilir.
- Pratik amaçlarla patlayıcının infilak hızı göz ardı edilir.
- Serbest yüzey sınırlarının etkisi değerlendirme dışı tutulur (Persson et al., 1994).

Bütün bu değerlendirmelerden sonra yakın mesafede parçacık hızı Eşitlik 2'deki gibi hesaplanabilir:

$$PPV = K\left[l\int_{x_s}^{x_s+H}\frac{dx}{\left[r_0^2+(x-x_0)^2\right]^{\beta/2\propto}}\right]^{\propto} \tag{2}$$

- Burada "l" doğrusal şarj konsantrasyonu, yani deliğin bir metresinde bulunan patlayıcı miktarıdır (kg/m). "dx" delikten yatay olarak "r_o" uzaklıktaki "P" noktasında yer sarsıntısını oluşturan patlayıcı şarjıdır. x, x_0 ve x_s geometrik parametrelerdir. Hesaplamanın geometrik olarak gösterimi Şekil 1'de verilmiştir (Persson vd., 1994).



Şekil 1. Parçacık hızı hesaplamalarında kullanılan Holmberg-Persson parametrelerinin şematik gösterimi

Denklem 2'yi basitleştirip daha kompakt bir hale getirmek için β = 2α yazılabilir. Bu durumda formül Eşitlik 3 şeklini alır:

$$PPV = K\left[\left(\frac{l}{r_0}\right)\left(arctan\left(\frac{H+x_s-x_0}{r_0}\right)+arctan\left(\frac{x_0-x_s}{r_0}\right)\right)\right]^{\propto} \quad (3)$$

3 GALERİ ATIM TEKNİĞİ VE KULLANILAN PATLAYICILAR

Yeraltı galeri atımlarında delme işlemi Jumbo adı verilen deliciler geçekleştirilmektedir. Cevher aynası patlatmalarında delik çapı 45 mm'dir. Serbest yüzey oluşturmak için atım bölgesinin ortasına 102 mm boş delikler delinmektedir. Şekil 2a'da cevher aynasında delme işlemi gösterilmektedir. Deliklerin boyu 4 metredir. İki kolu olan delici makinanın aynı anda 2 delik delmesi mümkündür. Şekil 2b'de ayna şarj işlemleri görülmektedir (Özcan, 2019).

Şekil 2. Cevher aynası delme ve şarj işlemleri

Patlatma işleminde kuru deliklerde ANFO sulu deliklerde ise emülsiyon patlayıcılar kullanılmaktadır. Çevre deliklerine aşırı sökümü engellemek için kontur tip emülsiyon patlayıcılar şarj edilmektedir. Ateşleme Nonel kapsüller ve 10 gramlık infilaklı fitil ve elektrikli kapsüllerle geçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada modelleme emülsiyon kartuş patlayıcılar ve kontur patlayıcılar ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'de kullanılan patlayıcıların görselleri sunulmuştur. Yeraltı patlatmalarına emülsiyon patlayıcılar sudan etkilenmedikleri için sıklıkla tercih edilmektedir. Bu patlayıcıların deliğe şarjları kolaydır. Farklı çaplarda ve boyutlarda üretilebilmektedir. Yoğunlukları 1 gr/cm^3'ün üzerindedir. Sert kayaçlarda ve cevher patlatmalarında son derece verimlidirler. Kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcıların elektrikli kapsül, Nonel kapsül veya infilaklı fitil ile ateşlenmesi mümkündür.

Şekil 3. Kartuş ve kontur emülsiyon patlayıcılar

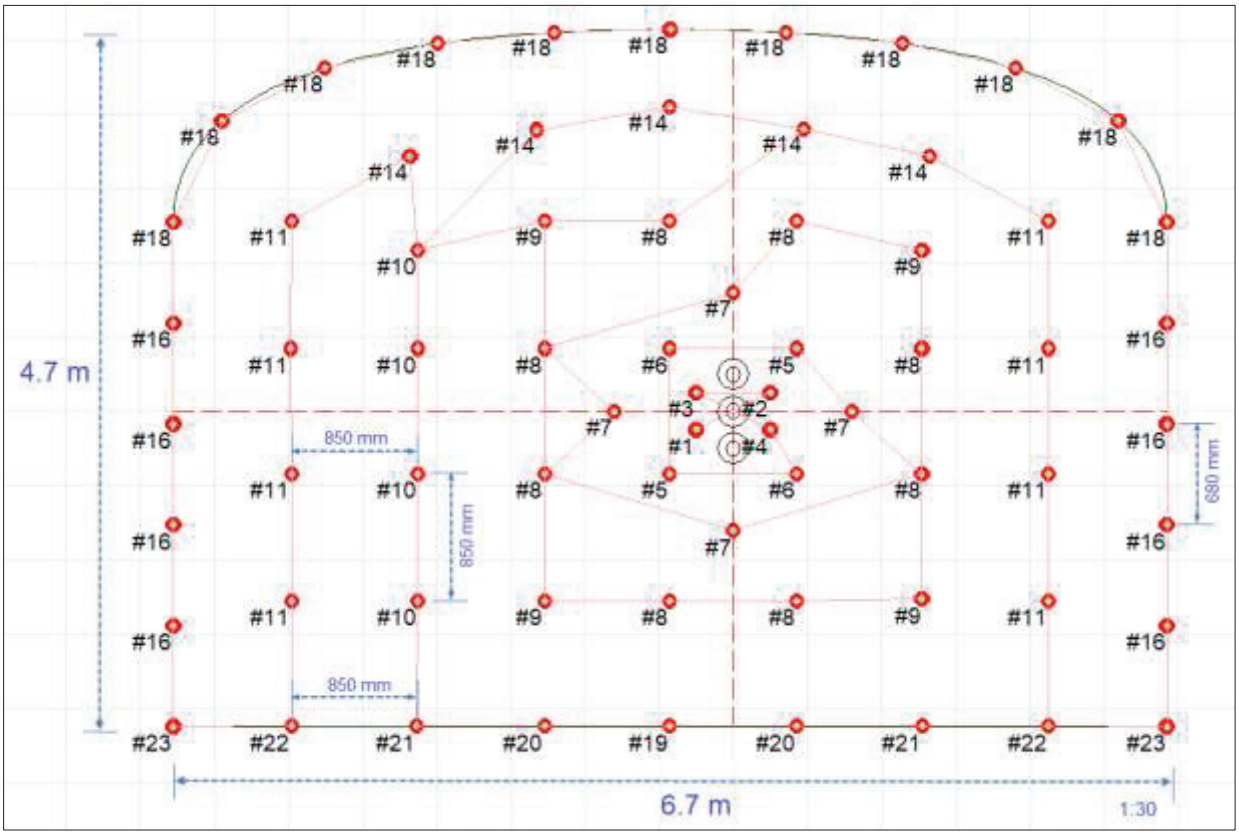
Kontur patlayıcıların kullanımı son yıllarda artmıştır. Bu patlayıcılar aşırı sökümü engellemek için çevre ve tavan deliklerine şarj edilirler. Bu patlayıcılarda temel mantık, patlayıcı çapının delik çapından düşük olması ve böylece delikte beher metre başına şarj konsantrasyonunun düşürülmesidir. Şarj konsantrasyonunun çevre deliklerinde azaltılması aşırı sökümü engelleyecektir (Zhang, 2016). Aşağıda Çizelge 1'de kullanılan kartuş emülsiyon patlayıcıların ve kontur patlayıcıların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Modelleme için kullanılan patlayıcıların teknik özellikleri

	Kartuş Emülsiyon	Kontur Patlayıcı
İnfilak hızı	6000-6200 m/s	5485 m/s
Enerji	4448 kj/kg	2980 kj/kg
İnfilak Sıcaklığı	2984 oK	2120 oK
Gaz Hacmi	887 lt/kg	905 lt/kg
Yoğunluk	1.17	1.10
Suya dayanım	Mükemmel	Mükemmel
Boyutlar	36x420 cm	19x750 ve 24x750 cm

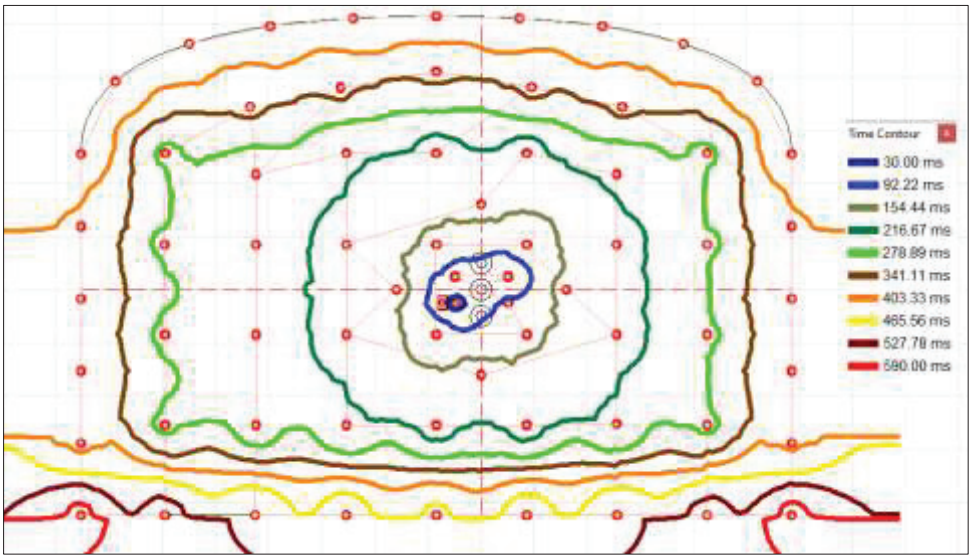
4 PATLATMA TASARIMI VE ATEŞLEME DÜZENİ

Patlatılacak galerinin yüksekliği 4.7 metre genişliği ise 6.7 metredir. 69 adet şarj edilmiş delik mevcuttur. Atımın tam ortasında üç adet 102 mm çaplı boş delik serbest yüzey görevi görmektedir. Deliklerin konumu ateşleme sırası Şekil 4'de görülmektedir. Üretim deliklerinde yük ve delikler arası mesafe 0.85 metredir Yan deliklerde delikler arası mesafe 0.65 metredir. Genel patlatma tasarımına uygun olarak kesme bölgesinde özgül şarj daha yüksektir (Demir vd., 2016, Bahçıvancı, 2020).



Şekil 4. Cevher aynasında patlatma tasarımı ve ateşleme düzeni

Şekil 5 ateşleme zaman konturlarını göstermektedir. Zaman konturları ateşlemenin ne yönde gerçekleştiğini net olarak ortaya koymaktadır. Ateşleme önce atımın ortasında başlamış, daha sonra kenarlara doğru ilerlemiştir. Merkezdeki kesme delikleri 92 milisaniye (ms) civarında patlamaktadır. Ardından sonra 154. ve 216. milisaniyede kesme deliklerinin çevresindeki üretim delikleri patlamaktadır. En son 465-590 milisaniye aralığında taban delikleri patlamaktadır. Ateşleme için gecikme aralıkları 25 milisaniye ile artan elektriksiz kapsüller kullanılmıştır. Ateşleme tasarımına sadık kalınarak daha yüksek gecikmeli kapsüller kullanmak da mümkündür. Atımın daha rahat hareket etmesine ihtiyaç duyulursa 100-2000 ms gecikme aralıklarında kapsüller kullanmak mümkündür (JKSimBlast, 2006).

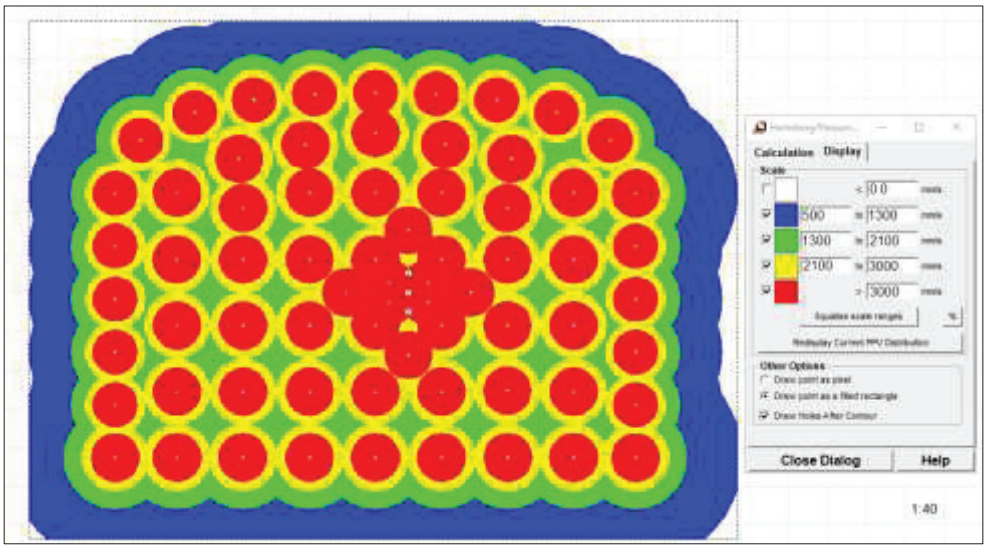


Şekil 5. Ateşleme zaman konturları

5 HASAR OLASILIĞINI İNCELEMEK AMACIYLA GELİŞTİRİLEN MODEL

5.1 Senaryo I. 4 Adet Kartuş Patlayıcı Kullanılması Durumu

Modelleme için öncelikle uygulanan tekniklerden biri şarj miktarının düşürülmesidir. Şekil 6'daki sunulan ilk senaryoda orta çekme ve üretim delikleri ve taban deliklerinde 6 adet emülsiyon kartuş kullanılmıştır. Yan deliklerde ve tavan deliklerinde 4 adet emülsiyon kartuş mevcuttur. Çevre deliklerinde delik başına şarj miktarı 2,0 kilogramdır. Kartuş miktarının azaltılması beklenen parçacık hızı (ppv) seviyelerinde azalmaya yol açmıştır. Deliklerin çevresinde beklenen ppv 3000 mm/s değerinin üstündedir. Tavan deliklerinin arasında yaklaşık 23 cm'lik bir kısımda ve yan deliklerde 12 cm'lik bir kısımda ppv 2100-3000 mm/s aralığındadır (Şek. 7). Deliklerden ve dolayısıyla atım sınırından 40 cm uzaklaştıktan sonra 1300-2100 mm/s titreşime maruz kalan kısım başlamaktadır (JKSimBlast, 2006).

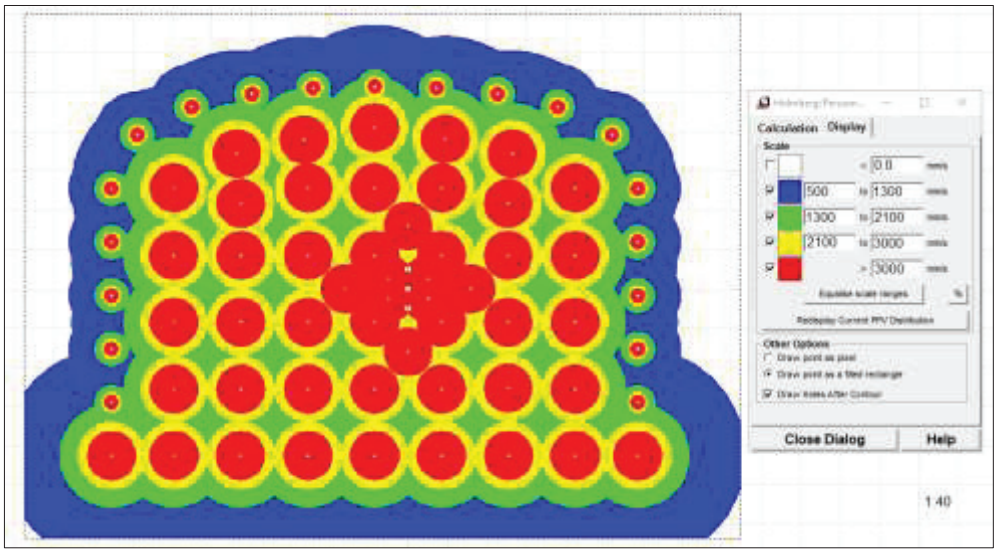


Şekil 6. 4 adet kartuş patlayıcı kullanılması durumunda parçacık hızı seviyeleri

5.2 Senaryo II. 24 mm Çaplı Kontur Patlayıcı Kullanımı

İkinci senaryoda tavan ve yan deliklerin içine 4 adet 24 mm çapında ve 750 mm uzunluğunda kontur patlayıcı yerleştirilmiştir. Delik başına şarj miktarı 1.49 kilogramdır. Doğrusal şarj miktarı yani deliğin 1 metresinde bulunan patlayıcı miktarı 0.50 kg seviyesine düşmüştür. Şekil

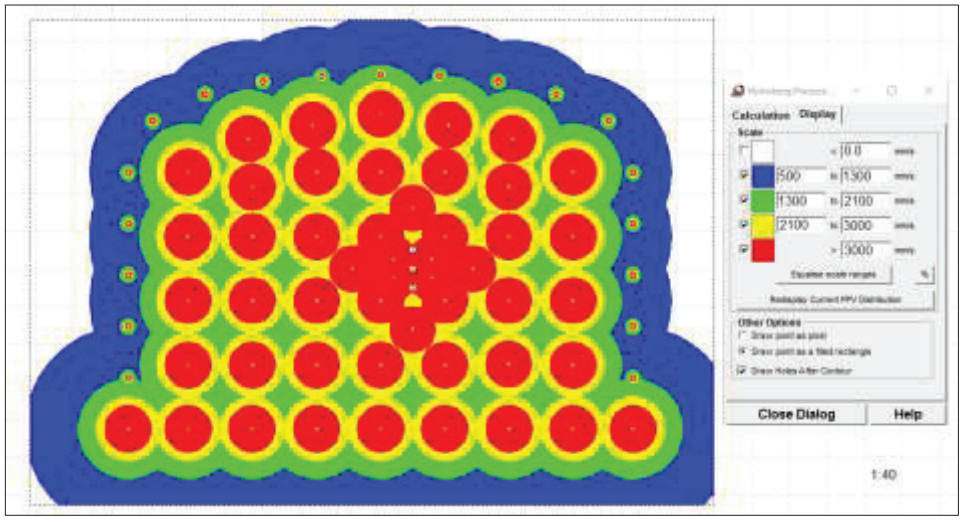
7'de görüldüğü üzere tavan ve yan deliklerin birbirleriyle etkileşimi büyük ölçüde azalmıştır. Tavan delikleri arasında 36 cm'lik bir kısımda ve yan deliklerin arasında 21 cm'lik kısımda hesaplanan ppv 500-1300 mm/s aralığına düşmüştür.



Şekil 7. 24 mm çaplı kontur patlayıcı kullanılması durumunda parçacık hızı seviyeleri

5.3 Senaryo III. 19 mm Çaplı Kontur Patlayıcı Kullanımı

Üçüncü senaryoda tavan ve yan deliklere 19 mm çaplı 4 adet kontur patlayıcı yerleştirilmiştir. Hesaplanan parçacık hızı değerleri Şekil 8'de sunulmaktadır. Tavan ve yan deliklerin birbirleriyle etkileşimi önemli ölçüde azalmıştır. Üst sağ ve sol tavan deliklerin arasında yaklaşık 59 cm'lik bir kısımda ppv miktarı 500-1300 mm/s arasındadır.



Şekil 8. 19 mm çaplı kontur patlayıcı kullanılması durumunda parçacık hızı seviyeleri

Yan deliklerde 46 cm'lik kısımda ppv miktarı 500-1300 mm/s seviyesine düşmüştür (Şek. 8). Delik merkezlerinden 10 cm atım sınırının dışına çıkıldığı zaman 500-1300 mm/s'lik kısım başlamaktadır.

Çizelge 2'de patlayıcı miktarı ve türüne göre şarj değerlerinin değişimi sunulmaktadır. Kontur patlayıcıların kullanımı delik başına şarj miktarını düşmektedir. En önemli değişiklik doğrusal şarj yoğunluğunda olmaktadır. Çevre deliklerde 4 kartuş emülsiyon yerine 19 mm çaplı kontur patlayıcı kullanımı şarj miktarını %100'e yakın düşürmektedir. Doğrusal şarj yoğunluğundaki düşüş ise %380 seviyelerindedir.

Çizelge 2. Patlayıcı miktar ve türüne göre şarj değerlerinin değişimi

	6 Kartuş Emülsiyon	4 Kartuş Emülsiyon	24 mm 4 adet Kontur	19 mm 4 adet Kontur
Şarj Boyu (m)	2.52	1.68	3.00	3.00
Şarj miktarı (kg)	3.00	2.00	1.49	0.94
Doğrusal şarj yoğunluğu (kg/m)	119	1.19	0.50	0.31
Şarj Yüzdesi (%)	63.0	43.0	75.0	75.0

6 SONUÇLAR

Aşırı söküm ve yan kayaca verilen hasar galeri ve tünel patlatmalarında sıklıkla üzerinde durulan bir konudur. Bu hasarın tahmini için önerilen yöntemlerden biri delik çevresinde yakın mesafede parçacık hızı seviyelerinin hesaplanarak değerlendirilmesidir. Bu yaklaşım Holmberg ve Persson'un (1980) önerilerine uygun olarak denenmiş ve son derece başarı ile uygulanabileceği görülmüştür. Pratikte şarj miktarının düşürülmesinin çevre kayaca verilen hasarı azaltacağı bilinmektedir. Bu bildiri bu öngörüyü sayısal modelleme yoluyla doğrulamıştır. Şarj miktarı ve patlayıcı tipindeki değişimin etkisi sayısal olarak da net bir şekilde incelenmiştir.

Kontur patlayıcıların kullanımı tavan ve çevre deliklerinde doğrusal şarj yoğunluğunu büyük ölçüde düşürmüştür. Yapılan araştırmada şarj yoğunlukları 0,50 ve 0,31 kg/m seviyelerine indirilmiştir. Bu yolla tavan ve çevre deliklerinin çevresindeki parçacık hızı seviyeleri 500-1300 mm/s civarına düşürülmüştür. Şarj yoğunluğundaki düşüş kontrollü olarak gerçekleştirilmeli, parçalanma verimliğinden de taviz verilmemelidir.

Bilgisayar yazılımları ile modelleme özellikle yeraltı patlatmalarının incelenmesi için oldukça faydalıdır. Patlatma sırasında enerji dağılımını ve çevre kayaca verilen hasarı önceden izlemek mümkündür. Bu çalışmada uygulandığı gibi farklı patlayıcılar kullanılarak farklı senaryoları değerlendirmek mümkündür. Patlayıcılar, ateşleme sistemleri ve patlatma ile ilgili özel yazılımların gelişmesiyle, yeraltı patlatmalarının daha verimli bir şekilde gerçekleştirileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Bahçıvancı, B. N, 2020. Eti Bakır yeraltı işletmesinde üretim yönteminin ve delme-patlatma faaliyetlerinin değerlendirilmesi, Lisans bitirme tezi, İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 60 s.

Demir, G., Yılmaz, M., Şen, M., 2016. Eti Bakır A.Ş. Küre yeraltı işletmesi'nde gerçekleştirilen patlatma uygulamalarının incelenmesi, *Madencilik*, Cilt 55, Sayı 2, s. 53-62.

Holmberg, R. and Persson, P. A., 1980. Design of tunnel perimeter blast hole patterns to prevent rock damage, *Trans. Inst. Mining Metal*. Vol. 89, pp. A37–A40.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L. and Carcedo, F. J. A., 1995. Drilling and blasting of rocks, A. A. Balkema, Brookfield Publication, Rotterdam, 391 pages.

JKSimBlast, 2006. JKSimBlast User Manual, Soft-Blast Pty Ltd, Queensland, Australia, 250 pages.

Özcan, T. 2019. ETİ Bakır Küre yeraltı işletmesinde galeri ve ara kat patlatmalarının incelenmesi, Lisans bitirme tezi, İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 58 s.

Persson, P. A., Holmberg, R., Lee, J., 1994. Rock blasting and explosive engineering, CRC Press, Boca Raton, Florida, 560 pages.

Zhang, Z-X, 2016. Rock fracture and blasting theory and applications, Butterworth-Heinemann, Oxford, 446 pages.

Kent İçi Kontrollü Patlatma Çalışmalarında Çeşitli Hasar Kriterlerinin Tünel İlerleme Hızı ve Delme-Patlatma Maliyetine Etkileri

Effects of Various Damage Criteria on Tunnel Advance Rate and Drilling-Blasting Cost in Urban Controlled Blasting Operations

R. Sağlam, C. Taşçı, Y. Ayvacı
Yapı Merkezi İnşaat A.Ş., Slovenya

A. Kahriman, S. Bağdatlı
İstanbul Okan Üniversitesi, Patlayıcı Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, İstanbul

S.M. Özcan
Türkcan Yapı Madencilik ve İş Makinaları Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, Slovenya

İ. Sefer
GNM Adi Ortaklığı ÜAG Metrosu Projesi, İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada, Divaca Koper Tren Yolu inşaatı kapsamında, meskun mahalde yapılan kontrollü patlatmalı kazılar incelenmiştir. Meskun mahal patlatmalı kazı çalışmaları için öncelikle çevresel yapılar dikkate alınarak, risk analizi yapılmış ve patlatma tasarım modelleri oluşturulmuştur. Formasyonda gerçekleştirilen tüm atımlar, titreşim ölçer cihazlar ile izlenmiş, gecikme başına en fazla şarj miktarları, atım-ölçüm istasyonu mesafesi ve maksimum parçacık hızı verileri Alman DIN4150 normu L3 hattı (tarihi eser ve hassas yapılar için önerilen limit değerler) referans alınarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Meskûn mahalde, patlatmalı kazının çevresel sorunlarından olan titreşim ve hava şokunun minimize edilmesi gereği nedeniyle kazı ilerleme hızlarının kısıtlanması zorunlu olmuştur. Kontrollü patlatma kazı performansları değerlendirilmiş, titreşim yayılım trendi belirlenmiştir.

Bölgede yapılan kontrollü patlatma çalışmaları L2 hattı (dayanıklı bina, yığma, beton, tuğla yapılar için önerilen limit) ve USBM (Amerika Birleşik Devletleri Madencilik Bürosu - mülga) normları kullanılarak yapıldığı varsayılmış olsaydı tünel hızına, tünel patlatma maliyetine ve tünel genel maliyetlerine olan etkileri kıyaslanmıştır.

ABSTRACT In this study, controlled blast excavations carried out in the residential area within the scope of Divaca Koper Railway Construction were examined. For the residential area blast excavation works, first of all, taking into account the environmental structures, risk analysis has been made and blasting design models have been created. All pulses in the formation were monitored with vibration meter devices, the maximum charge amount per delay, pulse-measurement station distance and maximum particle velocity data were taken as reference to the Alman DIN4150 norm L3 line (historical building line).

Due to the necessity of minimizing vibration and air shock, which are environmental problems of blast excavation in the residential area, it was necessary to limit the excavation progress rates. Controlled blasting excavation performances were evaluated and vibration propagation trend was determined.

If it was assumed that the controlled blasting works carried out in the region were carried out using the L2 line (reinforced concrete construction line) and USBM norms, the effects on the tunnel speed, tunnel blasting cost and tunnel general costs were compared.

1 GİRİŞ

Patlatmalı kazı yöntemi, madencilik ve inşaat faaliyetlerinde karşılaşılan sert ve sağlam kaya yapılarının kazısında sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle yüksek hacimli kaya kazı işlerinde, patlatmalı kazı, zaman ve maliyet bakımından, konvansiyonel makinalı kazıya nazaran oldukça avantajlıdır. Patlatmalı kazının avantajlarının yanında; titreşim, hava şoku, toz, taş savrulması vb. gibi, çevresel etkiler olarak tanımlanan dezavantajları da mevcuttur. Özellikle meskun mahallerde ya da yakınlarında gerçekleştirilen çalışmalarda, çevresel etkiler, canlılara yada yapılara zarar verilmemesi bakımından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, Slovenya'da inşa edilmekte olan Divaca Koper Tren Yolu Projesi kapsamında, demir yolu tünellerinde gerçekleştirilen patlatmalı kazı faaliyetleri incelenmiştir. Tünel kazılarında, çalışma sahası konservatif bir alan olması nedeniyle; hava şoku, toz, taş savrulması vb. etkilerin çevre yapılarda doğrudan hasarlara neden olmayacağı değerlendirilerek, bu çalışmada, patlatma kaynaklı titreşim etkileri üzerinde durulmuştur.

Proje kapsamında, meskun mahallerde yapılacak patlatmalı kazılar için titreşim kaynaklı hasarların sınırlandırılması amacıyla, Alman DIN4150 normunun, tarihi ve hassas yapılar için referans alınmış olan L3 hattı eşik hasar limitleri kullanılmaktadır. Oldukça hassas limitlere göre uygulanan patlatmalı kazı faaliyetleri nedeniyle üretim hızlarında da önemli ölçüde düşüşler yaşanmakta, bu durum patlatmalı kazı maliyetine etki etmektedir.

Bu araştırma kapsamında, proje sahasında uygulanan patlatmalı kazı faaliyetlerinin Alman DIN4150 normu L3 hattı limitleri yerine, Alman DIN4150 normu L2 hattı yada USBM normu limitlerine göre uygulanması durumunda, patlatmalı kazı maliyetinde oluşacak değişimler incelenmiştir.

1.1 Çalışma Sahasının Tanımı ve Jeolojik Özellikleri

1.1.1 Çalışma Sahasının Tanıtımı

Divaca Koper Tren Yolu Projesi güzergahı Slovenya'nın güneybatı kesimindeki engebeli dağlık alan olan Karst Platosu'nda yer almaktadır. Demiryolu güzergahının yaklaşık dörtte üçü tünellerle geçilmektedir. Planlanan hat toplamda sekiz tünel (128 metre ila 6,7 kilometreden fazla uzunlukta), iki viyadük (452 ve 647 metre uzunluğunda), iki köprüden (70 ve 100 metre uzunluğunda) ve bir galeriden (45 metre uzunluğunda) oluşacaktır. Proje sahasını gösteren plan görünüm Şekil 1'de verilmiştir (Zasiadko, 2021).

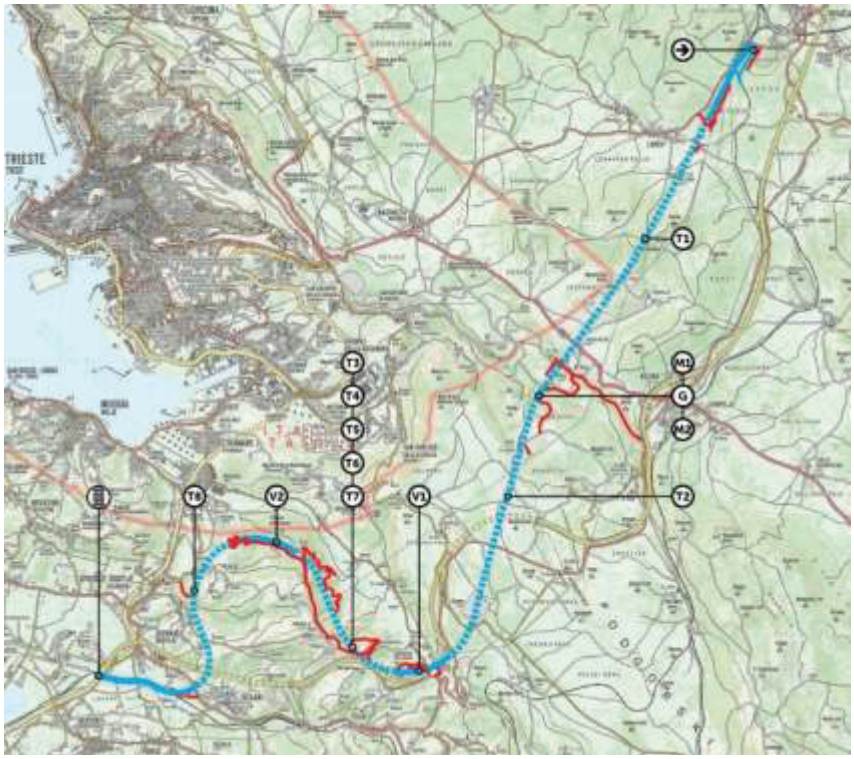
Proje Özellikleri:

- Uzunluk: 27,1 km
- Maks. boyuna eğim: 17 %
- Maks. hız: 160 km/s
- Aks yükü: 255 KN veya 80 KN/m, (kategori D4)
- Raylar: 60 E1, çoğunlukla düz ray
- Elektrifikasyon: doğru akım 3kV
- Telekomünikasyon sistemi: ERTMS/ETCS seviye 2

Tünel T1: 6.714 m + tam kesitli paralel servis tüneli Glinščica I Köprüsü: 74 m Glinščica Galerisi: 41 m Glinščica II Köprüsü: 104 m, Tünel T2: 6.017m + tam boy kesitte paralel servis tüneli, Tünel T3: 330 m, Tünel T4: 1.954 m, Tünel T5: 128 m, Tünel T6: 358 m T7 Tünel: 1.163 m Viyadük V1 Gabrovica: 452 m Viyadük V2 Vinjan: 647 m ve Tünel T8: 3.808 m + tam kesitli paralel servis tüneli (D. Kolic, 2019).

1.1.2 Çalışma Sahası ve Çevrenin Jeolojisi

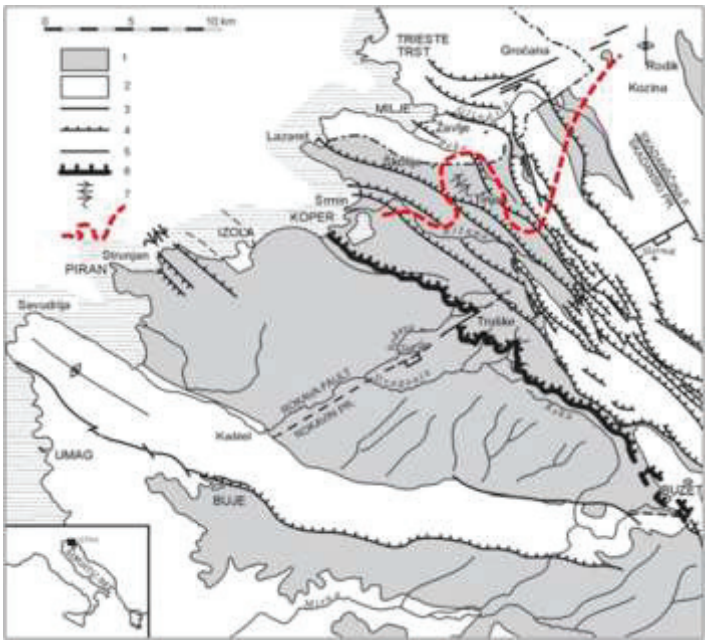
Proje güzergahının yer aldığı bölge fliş, marn, kiltaşı ve litik kumtaşının fliş havzasındaki çökeltme koşullarına karşılık gelen farklı oranlarda tabaka kalınlıklarına sahip değişimi ile karakterize edilir. Bazen ince kireçtaşı katmanları da mevcuttur. Kuvars ve feldispat tanelerinin hakim olduğu kumtaşı, yavaş yavaş alevrolite dönüşür. Haritalanan alanda, katmanların kalınlığı genellikle marnlarda 10 cm'den az, kumtaşlarında maksimum 1,5 m'ye kadar değişmektedir. Marn ve kumtaşı katmanlarının kalınlık oranı, tek tek katmanların ortalama kalınlığı gibi değişir. Genel olarak, kaya mukavemeti daha yüksek granülasyon ile artar. Rota, Veliko Gradišče'nin Brakisenkron bölgesi bölgesinde, km 5 + 500 ila km 5 + 950 arasındaki bir alanda fliş katmanlarından geçiyor. Gradišče'nin flişi, N-S yönündeki sağlam bir jeolojik fayın onu Alveolina Nummulitic kireçtaşından ayırdığı Velika Gradišče'nin Brakisenkron hattının doğu kanadı hariç, büyük ölçüde Geçiş katmanları üzerinde uyumlu bir şekilde uzanır. Arazinin hızlı yıpranması ve aşırı büyümesi nedeniyle, marn ve killi marnlardan gelen çıkıntılar azdır.



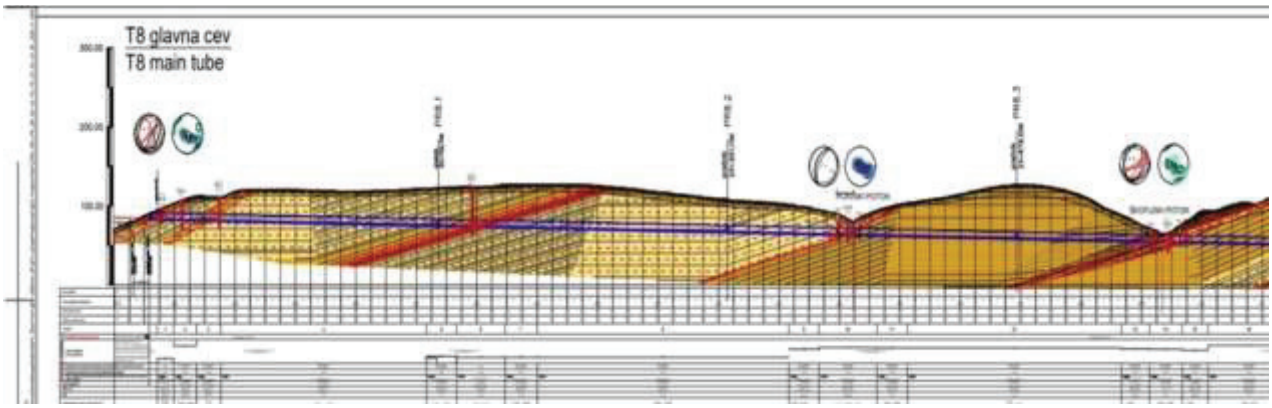
Şekil 1. Proje sahası plan görünümü (Zasiadko 2021)

Geçmişte, jeolojik fayın yakınlığı nedeniyle güçlü tektonik aktiviteye maruz kalmışlardı. İkincisi doğu Brakisyncline kanadında bulunur. Velika Gradišče'nin Brakisenkron hattındaki flişin kalınlığı muhtemelen hiçbir yerde 100 m'yi geçmez ve planlanan tünelin en az 150 m yukarısındaki en alçak kısımda kalır. Ocizelj Brachisyncline bölgesinde, km 8 + 975 ila km 11 + 280 arasında kuvvetli bir şekilde katlanmış fliş katmanları vardır. Her nasılsa, km 9 + 500'e kadar, marn ve silttaşı 40:60 oranında kumtaşları ile dönüşümlü olarak değişir, daha sonra km 10 + 500'e kadar kumtaşları hakimdir, bazı katmanlar 1,5 m'ye kadar kalınlığa ve ortalama olarak 0,4 m kalınlığa kadar katmanlara ulaşır. Kumtaşları arasında alt derinlikte marn ve silttaşı vardır. Bazı bölgelerde, 5 m'ye kadar, kalın marn girişleri meydana gelir, ancak vadinin dışındaki nispeten zayıf görünür çıkıntılar nedeniyle yanal dağılımları tespit edilemez. Km 10+500'den itibaren marn ve siltaşların kumtaşlarına oranı yaklaşık 40:60'tır. Geçiş katmanlarının üzerindeki fliş ve marn, yüzeyde km 14 + 000'de bulunabilir, ancak çıkıntılar orada çok nadirdir. Geometrileri ve yapısal koşulları nedeniyle, tektonik olarak nispeten hızlı bir şekilde derinlemesine saptırırlar. Fliş ve marn km 15+000'da yüzeyde bulunur ve T2 tünelinin bunları km 14 + 050 ile 14 + 300 arasındaki bir istasyonda kesişmesi beklenir. Marn

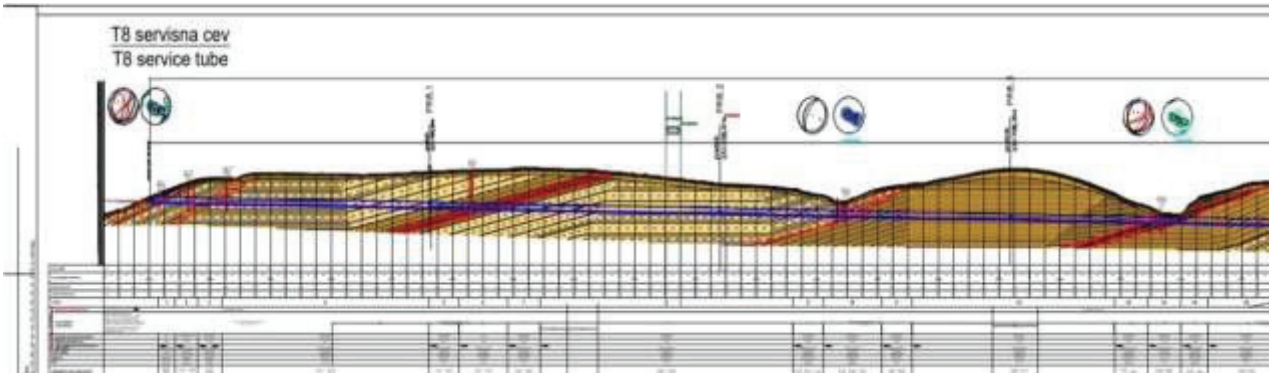
ve silttaşı, T2 tünelinin güney portalında yüzeyde görünür. Fliş ayrıca tüm Tinjan bölgesini inşa ediyor ve söz konusu çalışma sahasıda tüneli de yerleşik fliş olacak. Çalışma sahası jeolojik harita plan görünümü(Şek. 2) Kuzey Istria'nın tektonik taslağı. Placeretal. (Şek.2) 1 Eosen flysch ve Kuvaterner çökeltilerinden sonra takviye; 2 Kretase, Paleosen ve Eosen karbonat kayaçları; 3 Normal ve çarpma-kayma fayı; 4 Ters fay 5 Fliş ve altta yatan karbonatlar arasındaki litolojik sınır; 6 Buzet İtme Fayının İzi; 7 Katlanmış yatakların yönü 8 Proje tünel hattı. (Şek. 2) Ana ve servis tünellerine ait jeolojik kesit aşağıda verilmiştir.(Şek. 3a,b) (Placer 2007).



Şekil 2. Çalışma sahası jeolojik harita plan görünümü (Placer 2007)



Şekil 3a. Ana tünel jeolojik kesit görünümü

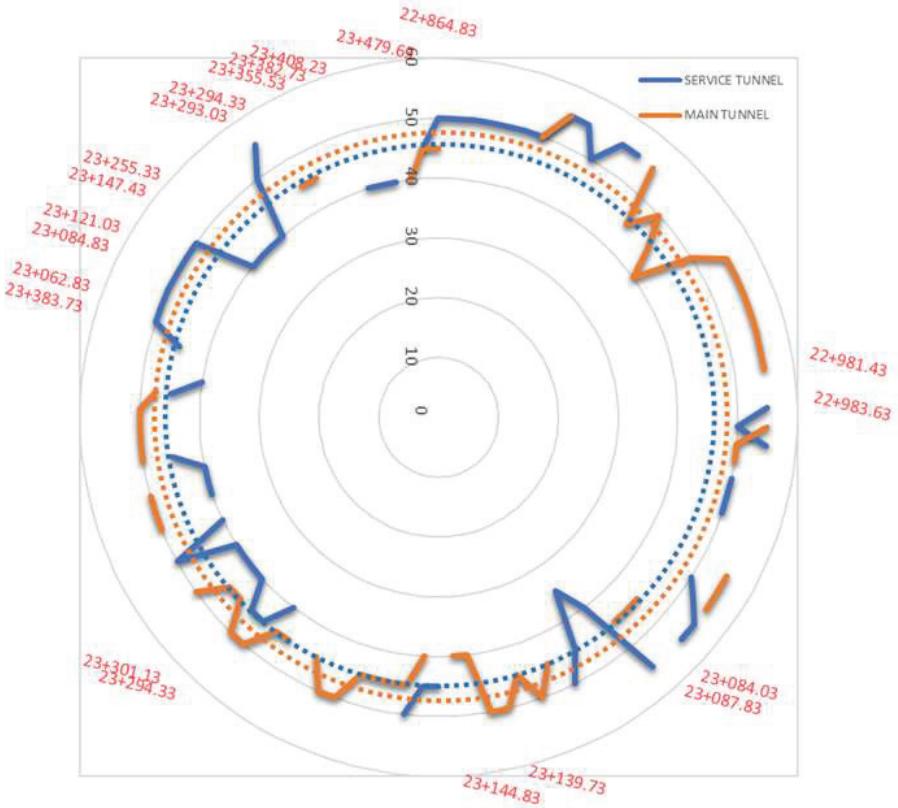


Şekil 3b. Servis tüneli jeolojik kesit görünümü

Proje başlangıç aşamasında yapılan sondaj çalışmaları sonucunda alınan numunelere çeşitli deneylere yapılarak elde edilen çalışma sahası kaya mekanik özellikleri, sahada yerinde ölçümler ile alınmış ayna haritaları sonucunda elde edilen servis ve ana tüneli için jeolojik dayanım indeksi (GSI) değerlerine ait bilgiler aşağıda özetlenmiştir. (Çiz. 1) Servis ve ana tünellerine göre sahadan alınan GSI değerlerine ait harita aşağıda verilmiştir. (Şek. 4)

Çizelge 1. Sahada çalışmaları ve proje sondaj çalışmalarından elde edilen çalışma sahası kaya mekanik ve fiziksel özellikleri

Süreksizlikler Arası Mesafe (mm)	**Süreksizlikleri Kazı Yönüne Etkisi**	**UCS Kaya İndeksi (Mpa)**	**RQD (%)**	**Servis Tüneli GSI Değerleri Ortalaması** Lejant	**Ana Tünel GSI Değerleri Ortalaması** Lejant
%57 / 20-600 %43 / < 60	Elverişsiz	%65 / 55-90 %25 / 10-30	%70 / >50 %30 / 20-40	47,08	48,23



Şekil 4. Ana ve Servis Tünellerinden Kilometrelere Göre Alınan GIS Değer Haritalaması

2 PROJE KAPSAMINDA UYGULANAN PATLATMA MODELLERİ

Proje kapsamında, jeolojik koşullar göz önünde bulundurulduğunda kontrollü patlatma faaliyetlerinin sürdürülmesi kaçınılmaz olmuştur. Projede yerleşim birimlerine uzak bölgelerde atımlar gerçekleştirilmiş ve titreşim değerleri kayıt altına alınarak formasyonda yapılan kontrollü çalışmalarından yola çıkılarak ampirik formül elde edilmiş ve meskun mahalde yapılacak olan kontrollü patlatma çalışmaları için bir altlık oluşturulmuştur.

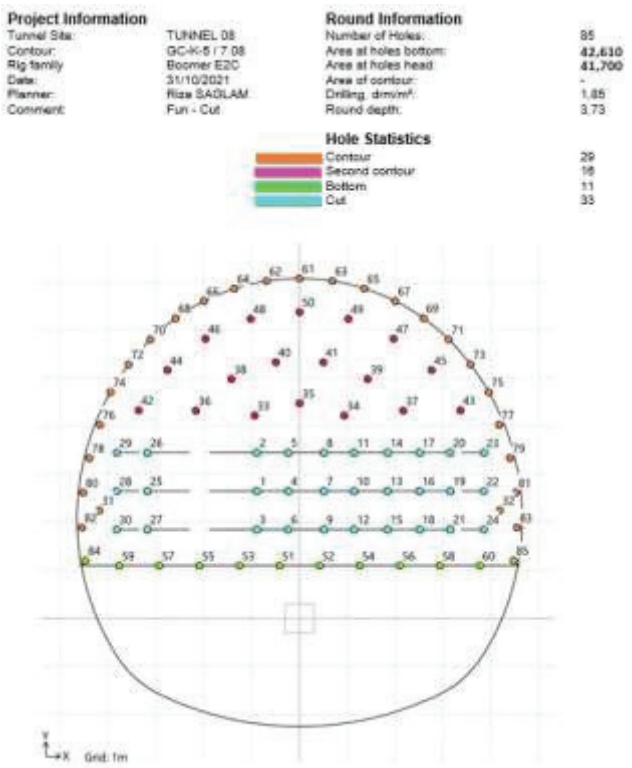
Kontrollü patlatma çalışmalarında; üretim delikleri Eprioc E2C (Epiroc 2023) marka Mwd (yerinde ölçüm) özellikli jumbo makineleri ile delinmiştir. Patlatmada, V- Cut (Orta çekme) ve ağırlıklı olarak Fan- Cut (Yelpaze çekme) yöntemleri uygulanmıştır, Üretim delik çapları 51 mm'dir.

Patlatmalı kazı uygulamalarında kullanılan patlayıcı madde ve ürünleri Çizelge 2'de paylaşılmıştır.

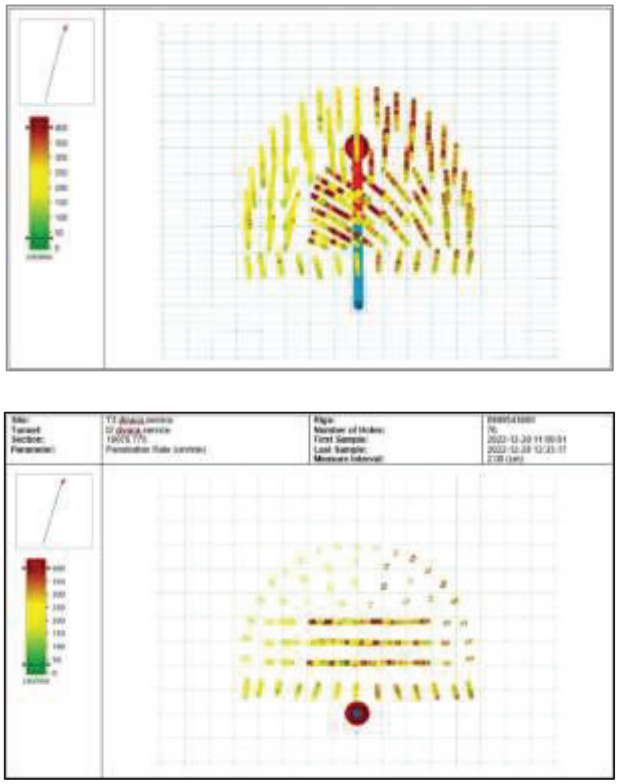
Çizelge 2. Patlatmalı kazı uygulamalarında kullanılan patlayıcı madde ve ürünleri

Patlayıcı madde	Emulex – 1, 38 mm
Kapsül	Shockstar Ts elektriksiz gecikmeli şok tüpü kapsül (40 gecikme aralığı)
Kontur Delikleri	80 g/m Detonex, infilaklı fitil
Kapsül bağlantısı	10 g/m Detonex, infilaklı fitil
İlk ateşleme	Gecikmesiz Elektrikli kapsül

Kontrollü patlatma çalışmalarında çektirme yöntemlerinden olan Fan-Cut patlatma yöntemi uygulanmıştır. Kontrollü patlatma paternine ait kesit görünümü Şekil 5a'da, Underground manager uygulamasından alınan delgi aktivitesine ait 3D görünümü Şekil 5b'de paylaşılmıştır. Şekil 5b'de, 3D görünümde yer alan renk farklılıkları, matkabın dakikadaki dönüş hızını yansıtmaktadır. Çalışılan tünellerin, üst yarı kazı alanı 42,61 m² aralığında, alt yarı kazı alanı ise 26,91m²'dir. Servis ve ana tünellere ait özgün, özgül tüketim ve üretim parametrelerine aşağıda yer almaktadır (Çiz. 3). Tüm tünellere ait genel özgül tüketim ve üretim faaliyetleri aşağıda verilmiştir (Çiz. 4). Tünellere ait özgül tüketim ve üretim grafikleri Şekil 6'da paylaşılmıştır.



Şekil 5a. Örnek kontrollü patlatma paternine ait plan görünüm (Fan-Cut)



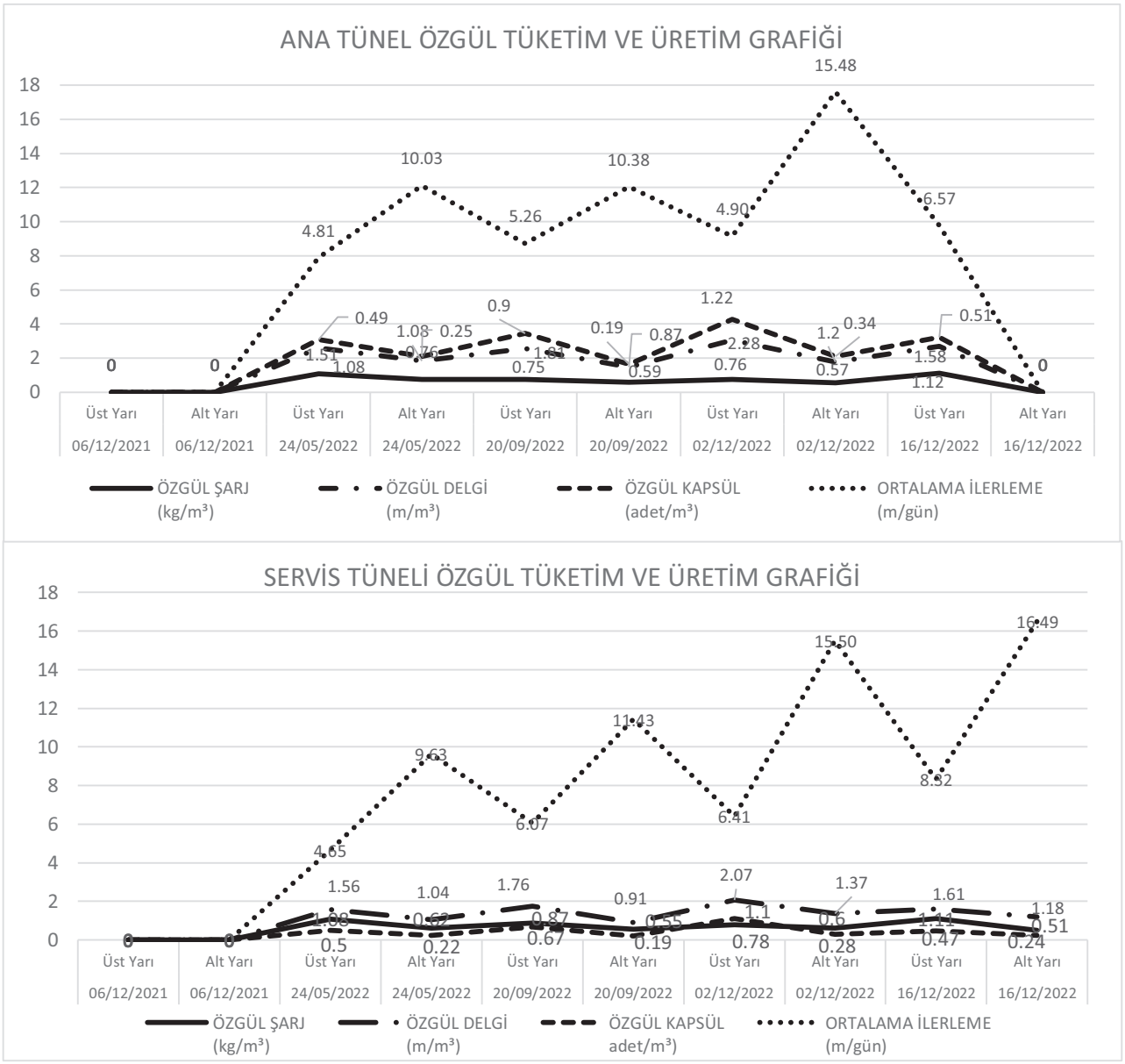
Şekil 5b. Delgi aktivitesine ait 3 D Görünüm (Underground Manager 2021)

Çizelge 3. Ana ve servis tünellerine ait özgül tüketim ve özgül üretim değerleri

Patlatma Bölgesi	Özgül Şarj (kg/m³)	Özgül Delme (m/m³)	Özgül kapsül (adet/m³)
	Ana Tünel		
Üst yarı	0,91	1,72	0,75
Alt yarı	0,69	0,98	0,25
	Servis Tünel		
Üst yarı	0,92	1,80	0,75
Alt yarı	0,57	0,96	0,20

Çizelge 4. Tüm güzergah üst yarı ve alt yarı özgül tüketim ve özgül üretim değerleri

Patlatma Bölgesi	Genel Özgül Şarj Ortalaması (kg/m³)	Genel Özgül Delme Ortalaması (m/m³)	Genel Özgül Kapsül Ortalaması (adet/m³)
Üst yarı-Alt Yarı Dahil	0,84	1,54	0,60



Şekil 6. Ana ve servis tünellerine ait özgül tüketim ve özgül üretim grafikleri

3 PATLATMA KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN VE PATLATMA PARAMETRELERİNİN KAYDEDİLMESİ

Proje kapsamında gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmaları; patlatmanın yapıldığı tünel tipi, kullanılan toplam ve gecikme başına düşen patlayıcı miktarları, titreşim hızı ölçüm değerleri, ölçüm mesafesi ve patlayıcı miktarı ile mesafenin oranlandığı ölçekli mesafe değerleri Çizelgelere kaydedilmiştir. Bazı atımlara ait değerler, örnek olarak Çizelge 5'te paylaşılmıştır.

Çizelge 5. Bazı kontrollü patlatma parametreleri ve titreşim hızı değerleri (GR Investicije d.o.o, 2022)

Patlatma Sayısı	Patlatma Numarası	Patlatma Bölgesi	Ayna Kilometesi	Tarih	Kontrollü Patlatma Saati	Maksimum Parçacık Hızı (PPV) (mm/s)	Frekans (Hz)	Gecikme Başına Makimum Şarj Miktarı (kg)	Gerçek Measafe (R) (m)	Ölçekli Mesafe (SD) (m)
1	361	Üst Yarı	22+683.15	26/05/2022	11:32	32.717	18.00 Hz	8	36.36	12.86
2	361	Üst Yarı	22+683,15	26/05/2022	11:32	2.341	>100	8	151.04	53.40
3	361	Üst Yarı	22+683,15	26/05/2022	12:00	26.664	>100	6	46.38	18.93
4	362	Alt Yarı	22+872,07	26/05/2022	01:55	8.504	>100	6	92.67	37.83
5	362	Alt Yarı	22+872,07	26/05/2022	01:55	0.536	73.10 Hz	6	183.95	75.10
6	362	Alt Yarı	22+872,07	26/05/2022	01:55	4.335	>100	6	157.24	64.19
7	364	Alt Yarı	22+875.91	27/05/2022	12.43	2.916	93.10 Hz	6	155.47	63.47
8	364	Alt Yarı	22+875.91	27/05/2022	12.43	0.504	>100	6	181.17	73.96
9	364	Alt Yarı	22+875.91	27/05/2022	12.43	8.788	78.80 Hz	6	46.61	19.03
10	364	Alt Yarı	22+875.91	27/05/2022	12.43	13.959	93.10 Hz	6	90.11	36.79
11	365	Üst Yarı	22+690.08	27/05/2022	04:53	2.175	73.10 Hz	8	144.37	51.04
12	365	Üst Yarı	22+690.08	27/05/2022	04:53	45.053	39.40 Hz	8	37.09	13.11
13	365	Üst Yarı	22+690.08	27/05/2022	04:53	0.725	93.10 Hz	8	330.73	116.93
14	382	Üst Yarı	22+721,24	02/06/2022	01:56	0.906	85.30 Hz	6	302.47	123.48
68	427	Üst Yarı	22+893.90	18/06/2022	09:39	6.489	85.30 Hz	6	146.12	59.65
69	429	Üst Yarı	22+897.83	19/06/2022	07:18	3.949	93.10 Hz	5	143.61	64.22
70	431	Üst Yarı	22+902.48	20/06/2022	06:09	1.119	>100	5	157.32	70.36
71	431	Üst Yarı	22+902.48	20/06/2022	06:09	5.667	>100	5	141.68	63.36
282	832	Üst Yarı	23+214.05	08/10/2022	10:30	4.059	>100	0.5	27.15	38.40
283	832	Üst Yarı	23+214.05	08/10/2022	10:30	1.371	>100	0.5	55.72	78.80
284	833	Üst Yarı	0+09.38	07/10/2022	04:49	3.389	>100	0.5	47.76	67.54
285	833	Üst Yarı	0+09.39	07/10/2022	04:49	3.610	>100	0.5	39.38	55.69
286	833	Üst Yarı	0+09.40	07/10/2022	04:49	1.742	>100	0.5	71.72	101.43
287	833	Üst Yarı	0+09.41	07/10/2022	04:49	3.326	>100	0.5	36.59	51.75
288	833	Üst Yarı	0+09.42	07/10/2022	04:49	1.174	>100	0.5	48.1	68.02
289	833	Üst Yarı	0+09.43	07/10/2022	04:49	2.223	>100	0.5	27.15	38.40
290	833	Üst Yarı	0+09.44	07/10/2022	04:49	0.875	>100	0.5	171.06	241.92

4 KONTROLLÜ PATLATMA ÇALIŞMALARININ HASAR KRİTERLERİNE VE İSTATİSTİKSEL ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

Söz konusu sahada yapılan kontrollü patlatma çalışmalarından elde edilen maksimum parçacık hızı ve frekans değerlerinin yapısal hasar riski açısından karşılaştırılabilmesi için Alman DIN 4150 normu limit değerleri referans alınmıştır. Alman DIN 4150 normu, yapı malzemesi ve türüne bağlı olarak 3 kategoriye ayrılmıştır. Her kategori için, frekans bandına bağlı olarak limit değerler sunulmaktadır. Söz konusu kategorilere ve limit değerlere ait açıklamalar Çizelge 6'da paylaşılmıştır. Söz konusu hasar limitleri dikkate alınarak gerçekleştirilen çalışmalara ait günlük tünel kazı ilerlemesi ortalamaları ve tünel patlatmalı kazı maliyetleri Çizelge 7'de paylaşılmıştır.

Çalışmalar süresince kayıt edilen titreşim hızı verilerinin; yerleşim yeri dışında, patlatma noktasına yakın konumda kayıt edilen birkaç değer haricinde, Alman DIN4150 normunun L2 ve L3 çizgilerinin altında olduğu görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda çalışma esnasında

yapılmış olan 290 adet kontrollü patlatma çalışmalarının, söz konusu sahada yerleşim birimlerinde hasar riski taşımadığı değerlendirilmiştir.

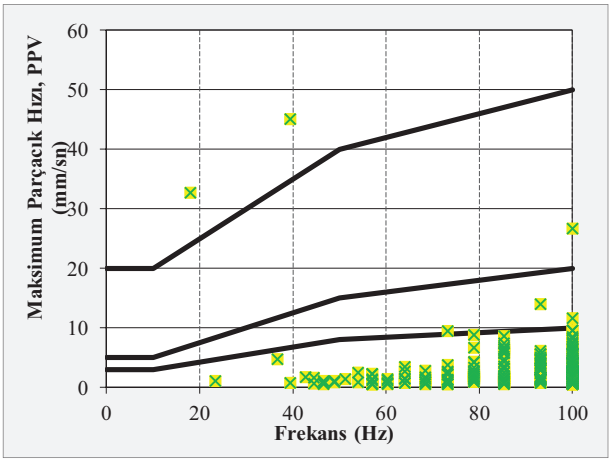
Ana tünelin kazısına, servis tünelinden daha önce başlamıştır ve meskûn mahali daha önce kat etmiştir. 290 adet veri ışığında grafik aşağıda verilmiştir (Şek. 7) Servis tünelini et kalınlığının ana tünel oranla daha fazla olması ve birbirine paralel devam eden tünellerde tamamlanmış olan ana tüneldeki boşluk ana tünel tarafında yer alan yapılara gelen titreşimleri daha da minimize ettiği düşünülmektedir. Sadece servis tünelinde alınan tüm verilere ait grafik ve regresyon formülü 118 adet veri ışığında oluşturulan grafikler verilmiştir (Şek. 8).

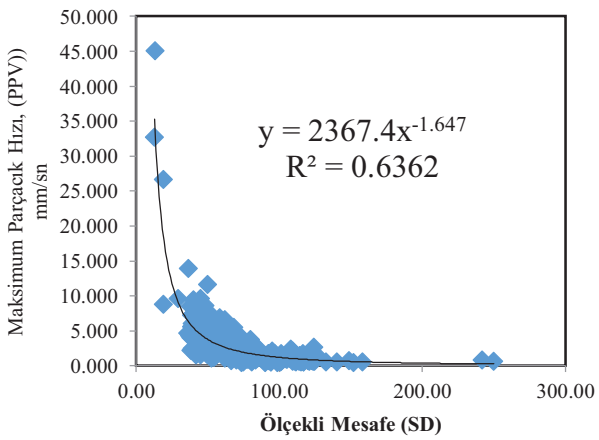
Çizelge 6. Yapılara türüne göre maksimum parçacık hızı ve frekans değerleri

Eşik Limit Seviyesi	Yapı Türü	Maksimum Parçacık Hızı, PPV (mm/sn)			
		Temel Seviyesinde Frekanas Aralığı (Hz)			En üstteki katın zemin seviyesinde (tüm frekanslar)
		<10	10-50	50-100	
L1	Ticari Amaçlı Kullanılan Binalar, Endüstriyel Binalar Ve Benzeri Tasarımdaki Binalar	20	20-40	40-50	40
L2	Benzer Tasarım Ve/Veya Kullanıma Sahip Meskenler Ve Binalar	5	5-15	15-20	15
L3	Titreşime karşı özel hassasiyetleri nedeniyle 1. ve 2. satırlar altında sınıflandırılamayan yapılar büyük öz değere sahiptir (örn. koruma emri altındaki binalar)	3	3-8	8-10	8

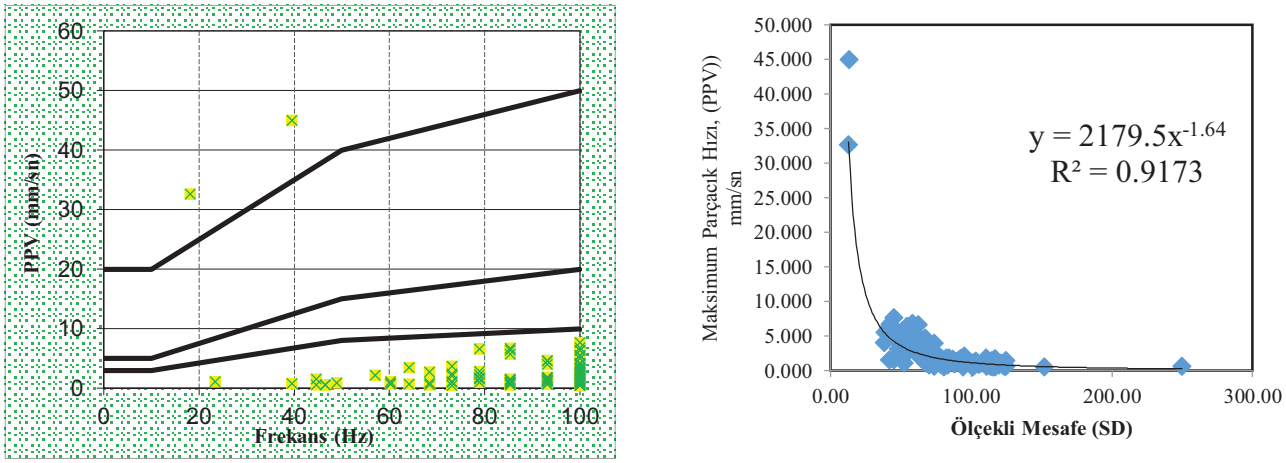
Çizelge 7. Hasar Kriterlerine Göre Günlük İlerleme Ortalamaları ve Tünel Patlatma Maliyetleri

Hasar Kriter Normları	**Patlatma Bölgesi**	**Titreşim Değer Aralıkları**		**Ana Tünel Günlük Ortalama İlerleme Adımı (m)**	**Servis Tünel Günlük Ortalama İlerleme Adımı (m)**
		Frekans aralıkları (0-10 Hz)	**Frekans aralıkları (10-50 Hz)**		
DIN 4150 L3	Üst Yarı Alt Yarı	3 – 8	8 – 10	5,38 9,22	6,36 13,26





Şekil 7. Tüm tünellerde yapılan kontrollü patlatma ölçüm sonuçlarına ait parçacık hızı (PPV)-Frekasn (Hz) ve Maksimum parçacık hızı (PPV)-Ölçekli Mesafe (SD) Regresyon Grafiği



Şekil 8. Servis Tünelinde yapılan kontrollü patlatma ölçüm sonuçlarına ait Maksimum parçacık hızı (PPV)- Frekasn (Hz) Grafiği ve Maksimum parçacık hızı (PPV)-Ölçekli Mesafe (SD) Regresyon Grafiği

Formasyonda kontrollü patlatma çalışmaları sonucunda 290 adet veri ışığında aşağıdaki titreşim yayılım trendi belirlenmiştir. Eşik hasar limit sınır değerlerine göre mesafe fonksiyonu olarak gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı madde miktarları aşağıda verilmiştir (Çiz. 7).

$$PPV = 2367{,}40 * SD^{-1{,}647} \quad (r = 0{,}90)$$

Çizelge 7. Alman DIN 4150 Normu L3 ve L2 hattı ile USBM normu eşik hasar limitlerine göre mesafenin fonksiyonu olarak gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı madde miktarları.

Mesafe (m)	**Proje Yayılım Trendi**	**Gecikme Başına Kullanılan Maksimum Patlayıcı Madde Miktarı (W) (kg)**		
		Alman DIN 4150 L3 Hattı (3-8 mm/sn) Maksimum 8 mm/sn' ye göre	**Alman DIN 4150 L2 Hattı (5-15 mm/sn) Maksimum 15 mm/sn' ye göre**	**USBM Normu En Yüksek Parçacık Hız Limiti (19 mm/sn)**
10		0,10	0,21	0,29
15		0,23	0,48	0,64
20	$PPV = 2367{,}40 * SD^{-1{,}647}$	0,40	0,85	1,14
25		0,62	1,33	1,78
50		2,50	5,35	7,13

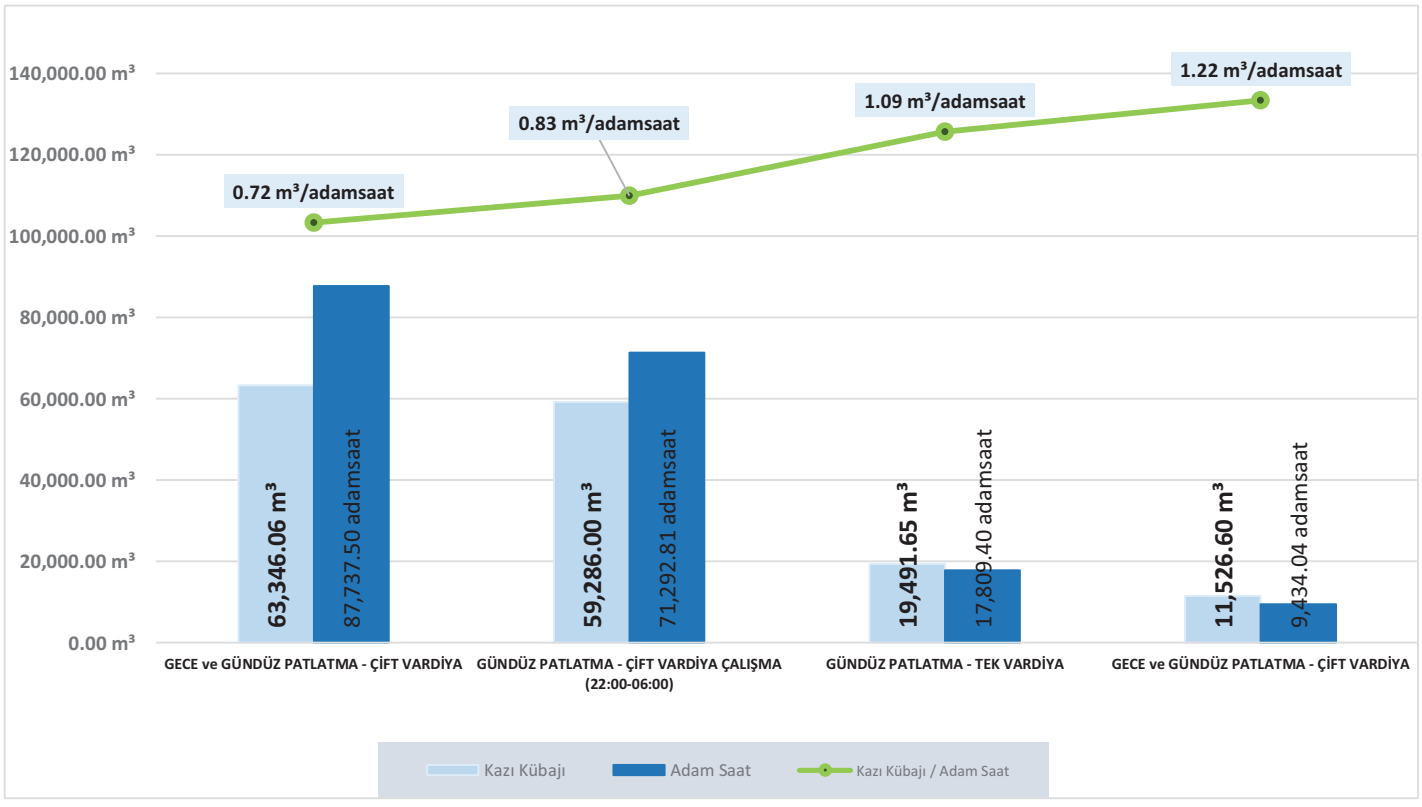
Formasyonda kontrollü patlatma çalışmaları Alman DIN 4150 eşik seviyesi L3' e göre tamamlanmıştır. Hasar eşik seviyesi Alman DIN L2 ve USBM Normu kullanılarak yapıldığı varsayıldığında gecikme başına maksimum patlayıcı miktarı ve delik boyu bilgileri aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir. Titreşim istasyonaları ve patlatma noktaları gerçek mesafesi ortalama 40 metreye göre hesap edilmiştir. (Çiz. 8).

Çizelge 8. Alman DIN 4150 Normu L3 ve L2 hattı ile USBM normu eşik hasar limitlerine göre mesafenin fonksiyonu olarak gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı madde aralıkları ve delgi boyu aralıkları

	Alman DIN 4150 L3 Eşik Seviyesi (3-8 mm/sn) Maksimum 8 mm/sn' ye göre	**Alman DIN L2 Eşik Seviyesi (5-15 mm/sn) Maksimum 15 mm/sn' ye göre**	**USBM Normu En Yüksek Parçacık Hız Limiti (19 mm/sn)**
Gecikme başına Maksimum Şarj Miktar Aralığı (kg)	0,25 – 0,50	1,00 – 1,50	1,50 – 2,00
Maksimum ve Minimum Delgi boyu (m)	1,50 – 1,70	2,00 – 2,50	2,50 – 3,00

5 NORM SINIRLAMASINA BAĞLI TÜNEL İLERLEME HIZINA VE TÜNELDE KULLANILAN PATLAYICI MADDE MALİYETLERİNE OLAN ETKİLERİ

Tünel hatlarından servis tünel tünel ekseni yüzey arası mesafesi ana tünele oranla daha fazla bir et kalınlığına sahiptir. Ortalama tünel ekseni yüzey arası ortalama et kalınlıkları 35-45 metre aralığındadır. Ana Tünel ve Servis Tünellerinde yapılan kontrollü patlatma çalışmalarında aylara ve saat sınırlamalarına göre karşılaştırılmalı çalışılan gün sayısı, ortalama ilerleme ve aşağıda belirtilen tarihler arasında yapılan kontrollü patlatma çalışmaları sonrasında elde edilen kazı kübajlarına ait detaylar aşağıda verilmiştir (Çiz. 9). Alt yarı ve üst yarı dahil toplam kübaj, ortalama ilerleme adımları kazı kübaj – adam saat oranları aşağıda verilmiştir (Çiz. 10). Daha anlaşılır kılınabilmesi adına kazı kubajı – adamsaat grafiği aşağıda verilmiştir (Şek. 9).



Şekil 9. Kazı Kübajı -Adamsaat Grafiği

Çizelge 9. Ana ve Servis tünelinde yapılan sınırlamalar, ilerleme adımları ve kazı kübajı

Ana Tünel						
Üst Yarı			**Alt Yarı**			
İlerleme (m)	**Çalışılan Gün Sayısı**	**Ortalama İlerleme** m/gün	**İlerleme (m)**	**Çalışılan Gün Sayısı** (Gün)	**Ortalama İlerleme (m/gün)**	**Kazı Kübajı (m^3)**
GECE ve GÜNDÜZ PATLATMA ÇİFT VARDİYA 06/12/2021-24/05/2022						
610.8	126.99	4.81	456.8	45.56	10.03	**38,437.00**
GÜNDÜZ PATLATMA ÇİFT VARDİYA ÇALIŞMA (22:00-06:00) 24/05/2022-20/09/2022						
439.1	83.5	5.26	332.2	32	10.38	**27,656.20**
GÜNDÜZ PATLATMA TEK VARDİYA 20/09/2022-02/12/2022						
61.2	12.5	4.9	296.6	18	16.48	**10,595.10**
GECE ve GÜNDÜZ PATLATMA ÇİFT VARDİYA 02/12/2022-16/12/2022						
98.6	15	6.57	0	0	0	**4,201.30**
Servis Tüneli						
Üst Yarı			**Alt Yarı**			
İlerleme (m)	**Çalışılan Gün Sayısı**	**Ort. İlerleme** m/gün	**İlerleme (m)**	**Çalışılan Gün Sayısı**	**Ortalam İlerleme (m/gün)**	**Kazı Kübajı (m^3)**
GECE ve GÜNDÜZ PATLATMA ÇİFT VARDİYA 06/12/2021-24/05/2022						
404.7	87.13	4.65	274.93	28.55	9.63	**24,908.90**
GÜNDÜZ PATLATMA ÇİFT VARDİYA ÇALIŞMA (22:00-06:00) 24/05/2022-20/09/2022						
482.3	79.5	6.07	411.4	36	11.43	**31,629.80**
GÜNDÜZ PATLATMA TEK VARDİYA 20/09/2022-02/12/2022						
176.3	27.5	6.41	46.5	3	15.5	**8,896.40**
GECE ve GÜNDÜZ PATLATMA ÇİFT VARDİYA 02/12/2022-16/12/2022						
20.8	2.5	8.32	239.1	14.5	16.49	**7,325.20**

Çizelge 10. Toplam kazı kübajı-Adam Saat İlişki Çizelgesu

Toplam Kazı Kübajı	**Ortalama Delgi Boyu**	**Adam Saat**	**Kazı Kübajı / Adam Saat**
63,346.06	4.00 m	87,737.50	**0.72**
59,286.00	3.00 m	71,292.81	**0.83**
19,491.65	2.00 m	17,809.40	**1.09**

6 SONUÇLAR

Meskûn mahalde artık kaçınılmaz olan büyük inşaat projelerinde kontrollü patlatma çalışmaları kaçınılmaz olmaktadır. Yapılacak olan doğru mühendislik çalışmalarıyla teknik, ekonomik sonuçlar elde edebilecek çevre dostu çalışmaların yapılabileceği ortaya konmuştur.

Meskûn mahal kazı alanında ALMAN DIN 4150 L3 çizgi hattı yani (tarihi yapılara) göre çalışmalar yürütülmüştür ve bu durum kontrollü patlatma çalışmalarında sınırlanmasına sebebiyet vermiştir. Belli dönemlerde ise çevre halkı ile yapılan toplantılar neticesinde kontrollü patlatma çalışmalarında saat sınırlamasına ve gece vardiyasında belli donemlerde kontrollü patlatma çalışamaması yapılmaması konusunda mutabık kalınmıştır.

ALMAN DIN 4150 L3 eşik değerinde yapılan çalışmalar neticesinde ortalama ilerleme adımı ALMAN DIN 4150 L2 ve USBM normlarına oranla daha düşük ilerleme adım ilerlenmesine neden olmuştur.

Patlayıcı madde ve ekipman metreküp maliyetleri eşik hasar limit değerlerine göre karşılaştırıldığında ALMAN DIN4150 L3 eşik değeri, ALMAN DIN 4150 L2'den %32, USBM norm eşik değerinden %42 daha maliyetli olduğu belirlenmiştir.

Meskûn mahale yakın bölgede yapılan çalışmalar, yapılan özgül delgi ve özgül kapsül değerlerinin artmasına ve dolayısıyla bu maliyetlerde de artışa sebep olmuştur. Ancak meskun mahal titreşim etki alanı dışında yapılan çalışmalar bire bir takip edilerek özgül delgi ve özgül kapsül değerleri titreşim sonuçlarının takibi ile maliyet artışının önüne geçilmiştir ve maliyet dengesi oluşturulmuştur.

İlerleme hızındaki düşüş ile birlikte tünel içilik maliyeti artışa sebep olmuştur.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu araştırmaya olanak sağlayan Yapı Merkezi yetkililerine teşekkür ederler. Marka değeri taşıyan işlerde biz Türk mühendislerine çalışma fırsatı sağlayan başta Yapı Merkezi ailesine, Dr. Ersin Arıoğlu'na, Başar Arıoğlu'na, Sayın Proje Müdürümüz Bahadır Oral Bey'e, Sorumlu Mühendisimiz Enver Šiljić ve tüm ekip çalışanı arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

DIN4150-3 DIN 4150-3:2016-12, Erschütterungen im Bauwesen_- Teil_3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, Beuth Verlag GmbH. https://doi.org/10.31030/2579353

Epiroc 2023, Boomer E2c. Epiroc.

GR Investicije d.o.o 2021. Vibrasyon aylık ölçüm raporları.

Kolic,D, 2019. 14th Int.Conference Underground Construction Prague 2019, June 3–5, Prague, Czech Republic.

Underground Manager Uygulaması 2021, Navigasyon destekli çizim programı

Placer 2007. Tectonic sketch of the subduction zone, with an outlined route of the Divača – Koper track and major structural units.

Zasiadko, M. 2021, Mayıs 10. Boosting freight in Slovenia: five questions about the Divača – Koper railway | IntermodalNews EU.

Şehir İçi Patlatmalı Tünel Kazısı Çalışmalarının Titreşim Değerlerine Göre Optimizasyonu

Optimization of Urban Blasted Tunnel Excavation Operations Based on Vibration Values

N. Balcı, A. T. İnal, S. Bağdatlı, A. Kahriman
İstanbul Okan Üniversitesi, Patlayıcı Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, İstanbul.

O. K. Gümüş
Özgün İnşaat, İstanbul.

ÖZET: Bu çalışmada, İstanbul ili Anadolu yakasında inşa edilmekte olan, Kaynarca – Pendik – Tuzla Metrosu'nun Kaynarca – Pendik etabı, şaft ve tünel kazılarında gerçekleştirilen patlatmalı kazı faaliyetleri incelenmiştir. Patlatmalı kazı çalışmaları kapsamında, titreşim kaynaklı yapısal hasarlara neden olmayacak patlatma tasarımları oluşturabilmek için, çeşitli titreşim yayılım yaklaşımları kullanılarak risk analizi yapılmış ve yönetmelikte tanımlanmış titreşim hızı değerlerini aşmayacak şekilde ön tasarım modelleri oluşturulmuştur. Ön tasarım modellerine uygun olarak şaft kazılarında deneme atımları gerçekleştirilmiştir. Deneme atımları sonucu, kazı verimi ve titreşim hızı değerleri incelenerek patlatma modelleri optimize edilmiştir. Optimize edilmiş patlatma tasarımları ile yapılan kazılar neticesinde kayıt edilen titreşim hızı verileri patlatma parametreleri ile ilişkilendirilerek yüksek korelasyonlu güvenilir titreşim yayılım eşitlikleri geliştirilmiştir.

ABSTRACT: In this study, the blasting excavation activities carried out in the shaft and tunnel excavations of the Kaynarca - Pendik - Tuzla Metro's Kaynarca - Pendik section, under construction on the Anatolian side of Istanbul province, were examined. In the scope of blasting excavation works, risk analysis was carried out using various vibration propagation approaches to create blasting designs that would not cause structural damage due to vibration and preliminary design models were created in such a way that they would not exceed the vibration velocity values defined in the regulations. Trial shots were carried out in the shaft excavations in accordance with the preliminary design models. As a result of the trial shots, blasting models were optimized by examining the excavation efficiency and vibration velocity values. High correlation and reliable vibration propagation equations were developed by correlating the vibration velocity data recorded during excavations with the blasting parameters using the optimized blasting designs.

1 GİRİŞ

Patlayıcılar, tahrip gücünün yüksek olması, kamuoyunda genellikle terör olayları ile anılması sebebiyle korkulan ürünlerdir. Uzun yıllardır kırsal alanlarda, madenlerde kullanılmakta olan patlayıcı maddelerin son yıllarda şehir içi inşaat projelerinde kullanılmaya başlaması insanlarda endişeye sebep olabilmektedir. Keza geçmişte, mühendislik uygulamalarından uzak olarak gerçekleştirilen başarısız denemeler bu endişeleri arttırmaktadır.

Günümüzde ise, patlayıcı ürün ve aksesuarlarındaki teknolojik gelişmelerle birlikte, patlayıcı mühendisliği ilkelerine uyularak, yerleşim birimleri içerisinde, etki alanı oldukça sınırlanmış

çevresel etkilere karşı riskler minimuma indirgenmiş kontrollü patlatmalı kazı faaliyetleri gerçekleştirilebilmektedir.

Patlayıcı mühendisliği uygulamaları ile meskun mahallerde, mevcut yapıların birkaç metre yanında yada altında, temel, tünel vb. inşaat kazılarında, patlatmalı kazı yöntemi emniyetli olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Patlatmalı kazı yönteminin, sert ve sağlam kaya kazılarında, ekonomik ve hızlı bir yöntem olması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir.

Patlatmalı kazı uygulamalarının en büyük dezavantajı; titreşim, hava şoku, kaya fırlaması, toz gibi çevresel etkilerdir. Bu etkiler, kontrollü patlatma teknikleri ile engellenmeye yada asgari düzeye indirgenmeye çalışılmaktadır. Yer altı yapılarında gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarında; kaya fırlaması, hava şoku, toz gibi çevresel etkiler tamamen yada büyük oranlarda önlenebilirken, patlatma esnasında oluşan titreşimler yapısal hasar riski oluşturmaya devam etmektedir. Bu nedenle, patlatmalı kazı çalışmalarında oluşan titreşimlerin kontrolü oldukça önemlidir.

Patlatma kazılar esnasında oluşan titreşimlerin kontrolü amacıyla çeşitli yöntemler gerçekleştirilmektedir. En yaygın kullanılan yöntemlerden birisi, çalışılan sahanın titreşim yayılım özelliklerinin belirlenmesi ve çevre yapılara hasar vermemek için kullanılacak patlayıcı miktarının belirlenmesidir. Bu kapsamda, patlatmalı kazı esnasında oluşan titreşim hızları, titreşim ölçer cihazlar ile kayıt edilerek, oluşan en yüksek parçacık hızları; mesafe ve kullanılan gecikme başına düşen patlayıcı miktarları ile ilişkilendirilerek, istatistiksel olarak ampirik bir formül oluşturulur. Bu formül yardımı ile çeşitli mesafelerde, çeşitli miktarlarda kullanılacak patlayıcı madde ile oluşturulabilecek titreşim hızı değerleri tahmin edilebilmektedir (Dowding 1994, Kahriman 2001, Yilmaz 2016).

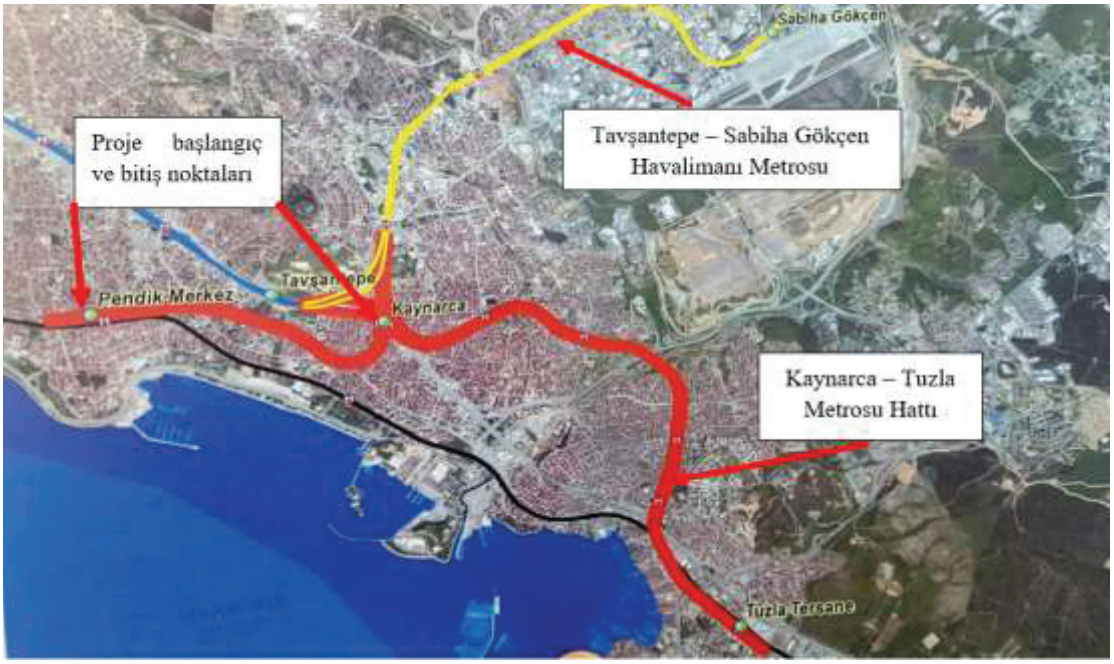
Bununla birlikte, çeşitli araştırmacılar ve ülkeler tarafından, patlatmalı kazı esnasında oluşan titreşimlerin, yapılar üzerindeki etkileri değerlendirilerek yapısal hasar kriterleri belirlenerek, bu kriterlere uygun eşik hasar limitleri belirlenmiştir (ÇGDYY 2010, ÇGKY 2022, DIN4150-3, Karadogan ve ark. 2014). Patlatma kaynaklı titreşimlerin, belirlenen eşik hasar limitleri dahilinde kalması durumunda, patlatma bölgesi ve çevresinde yer alan yapılarda hasar oluşumu beklenmediği değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, İstanbul ili Anadolu yakasında inşa edilmekte olan Kaynarca –Pendik Metrosu kapsamında gerçekleştirilen kontrollü patlatmalarında uygulanan patlatma modelleri, patlatmalar esnasında oluşan titreşim hızı değerleri ve ölçülen titreşim hızlarına bağlı olarak patlatmalı kazı uygulamalarının optimizasyonunda yapılan uygulamalar paylaşılmıştır.

2 ÇALIŞMA SAHASI VE JEOLOJİSİ

Bu araştırmaya konu olan Kaynarca – Pendik Metrosu, İstanbul İli Pendik İlçesinin, Yeni Mahallesi sınırları içerisinde kalan "TCDD Pendik İstasyonu" ile Kaynarca Mahallesi sınırları içerisinde kalan "Marmara Üniversitesi Pendik Eğitim ve Araştırma Hastanesi" arasında inşa edilecektir. Projenin konumu gösteren görsel Şekil 1'de paylaşılmıştır.

Söz konusu metro hattının; istasyon tünelleri ile şaft kazıları Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile inşa edilirken, ana hat tünelleri ağırlıklı olarak tünel açma makinası (TBM) ile inşa edilmektedir.



Şekil 1. Proje konumunu ve güzergahı

2.1 Çalışma Sahası Genel Jeolojisi

Projenin yer aldığı bölgede genel itibariyle Pelitli Formasyonuna (SDp) ait birimler yer almaktadır.

Büyük bölümü kireçtaşından oluşan formasyon değişik düzeylerinde ince kil arakatkılıdır; üst kesiminde yumrulu kireçtaşı düzeyini kapsar. Penck (1919) "Kalkerli Pendik Fasiyesi (kalkige Pendikfazies)", Paeckelmann (1938) Kartal-Pendik yöresindeki yüzeylemelerini Kartal-Pendik Halysitesli kireçtaşları adlarıyla incelemiştir. Haas (1968) istifin tabandan başlayarak büyük bölümünü kapsayan kesimini Akviran Serisi adıyla tanımlamış ve bu seriyi Tavşantepe, Bağlarbaşı Cumaköy, Çakıllı Dere, Pelitli ve Kireçhane birimlerine ayırtlamıştır; istifin en üst düzeyini oluşturan yumrulu kireçtaşı düzeyini ise Marmara Serisi'ne ait Soğanlı birimi olarak adlamıştır. Kaya (1973) Sedef Gurubu adıyla incelediği istifin alt bölümünü Dolayoba Kireçtaşı, üst bölümünü ise İstinye Formasyonu (Kaya 1978) olarak iki formasyona ayırtlamıştır. Önalan (1981) ise istifi Dolayoba, Sedefadası, İstinye ve Kaynarca formasyonları olmak üzere 4 formasyona ayırarak incelemiştir. Gedik ve diğ. (2004) Kaya (1973)'nın kullandığı adlamayı, yalnızca gurup adını Yumrukaya Gurubu şeklinde değiştirerek kullanmıştır.

Özgül (2005) tarafından, büyük bölümü şelf tipi karbonatlardan oluşan ve çökelme sürekliliği gösteren istifin, birden çok formasyona ayırtlanmasının, gerek haritalama gerekse yanal yönde izlenebilme açısından güçlük ve karışıklıklara neden olacağı gerekçesiyle, bu istifin tümünün tek bir formasyon adıyla adlandırılması yeğlenmiş. Bu düşünce ile, istifin büyük bir bölümünün incelemeye elverişli yüzeylemelerini kapsayan Gebze ilçesine bağlı Pelitli köyünün adı, daha önceleri bu adın Haas (1968) tarafından, söz konusu kireçtaşı istifinin bir bölümü için (Pelitli schichten) kullanılmış olduğu da gözönünde bulundurularak, formasyon adı olarak kullanılmıştır. İstanbul'un doğusunda, Gebze ilçesinin doğusunda yer alan Beylik dağının güneyinden geçen Büyükçeşme (çakal) deresi vadisi ve ilçenin kuzeyinden geçen Yumrukaya deresi vadisi, Pelitli köyü dolayı, Beykoz, Çubuklu ve İstinye dolayları, Dolayoba'nın DGD'sundan geçen Kınalı dere vadisi, Kartal taşocağı, Örnek mahallesinin doğu kesimi formasyonun geniş yüzeylemelerini kapsar.

Pelitli Formasyonu büyük bölümüyle şelf tipi neritik karbonatlardan oluşur. Alttan üste doğru kireçli şeyil-kumtaşı-killi kireçtaşı-kireçtaşı ardışığı (Mollafenari Üyesi), bol makrofosilli resifal kireçtaşı (Dolayoba Kireçtaşı Üyesi), orta-ince katmanlı, yer yer laminalı mikritik

kireçtaşı (Sedefadası Kireçtaşı Üyesi) ve en üstte ince şeyil arakatkılı yumrulu kireçtaşı (Soğanlık Kireçtaşı Üyesi) birimlerini kapsar.

3 ARAŞTIRMADA UYGULANAN YÖNTEM

Kaynarca – Pendik Metrosu inşası sırasında gerçekleştirilen patlatmalı kazı faaliyetleri üç aşamada incelenmiştir. Bunlar; kazı öncesi titreşim riskine dayalı patlatma modeli oluşturulması, patlatmalı kazı çalışmaları esnasında elde edilen titreşim hızlarının analizi ve saha sabitlerinin elde edilmesi, saha sabitlerinden yararlanılarak patlatmalı tünel modellerinin iyileştirilmesi olarak sıralanabilmektedir.

3.1 Patlatmalı Kazı Çalışmaları Öncesi Risk Değerlendirmesi

Proje kapsamında, öncelikli olarak, TBM İşletme Sahası olarak adlandırılan şantiye sahasında yer alan, yaklaşık 54 metre derinliğinde kazılması planlanan iki şafta yönelik patlatmalı kazı çalışmalarına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. SKP2C ve SKP2D olarak adlandırılan şaftlar, yaklaşık; 12 m x 15 m ölçülerinde ve 145 m^2 yüzey alanına sahiptir. Şaftların yer aldığı bölge Şekil 2'de paylaşılmıştır.

Şekil 2. SKP2C ve SKP2D şaftları

Söz konusu şaftların yer aldığı sahada daha önce patlatmalı kazı çalışması yapılmamıştır. Bu nedenle, patlatma esnasında oluşacak titreşimlerin yayılım karakteristikleri bilinmemektedir. Şantiye sahasının yerleşim birimlerinin içerisinde yer alması nedeniyle, çevre yapılarda hasarlara neden olmamak için gecikme başına kullanılabilecek maksimum patlayıcı miktarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Patlatmalı kazılarda titreşim kaynaklı yapı hasarlarını önlemek üzere, parçacık hızını, ölçekli mesafeye bağlı olarak tahmin etmeyi esas alan yaklaşımlar, yersarsıntısı ölçüm aletlerinin gelişmesi ve kullanılmaya başlanmasıyla ortaya atılmıştır. Literatürde ölçekli mesafenin belirlenmesinde en sık kullanılan formül Eşitlik 1'de verilmektedir.

$$SD = R / W^{0.5} \quad (1)$$

Burada; SD, Ölçekli mesafe; R, Patlatma noktasından uzaklık (m); W, Gecikme başına maksimum patlayıcı madde miktarını (kg) ifade etmektedir.

Patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntılarının önceden tahmin edilmesi, yer sarsıntılarının önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Birçok kişi ve kuruluş bu amaçla çeşitli araştırmalar yapmış ve ölçekli mesafeye bağlı maksimum parçacık hızı tahmininin en iyisi olduğu sonucuna varmışlardır. Maksimum parçacık hızı tahminine yönelik geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan ampirik ilişki Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$PPV = K \cdot SD^{-\beta} \quad (2)$$

Burada; R, mesafe (m); W, gecikme başına düşen patlayıcı miktarı (kg); K, β, Arazi katsayıları; PPV, Maksimum Parçacık Hızını (mm/sn) ifade etmektedir.

Eşitlik 2'de paylaşılan yaklaşım ile gecikme başına kullanılacak patlayıcı miktarı ve mesafe değişkenleri ile oluşması muhtemel titreşim hızları tahmin edilebilecektir. Fakat inceleme sahasında daha önce patlatmalı kazı çalışması gerçekleştirilmediği için sahaya ait arazi katsayıları bilinmemektedir. Bu nedenle, bir yaklaşımda bulunabilmek için, inceleme sahası çevresinde, benzer kaya birimlerinde gerçekleştirilen patlatmalı kazı faaliyetleri araştırılmış ve proje sahasına yaklaşık 650 metre mesafede yer alan, Tavşantepe – Sabiha Gökçen Havalimanı Metrosu inşası sırasında gerçekleştirilen patlatmalı kazılar esnasında türetilen titreşim yayılım eşitliğine ulaşılmıştır. Söz konusu eşitlik, Eşitlik 3'te verilmiştir (Mahmutoglu ve ark. 2018).

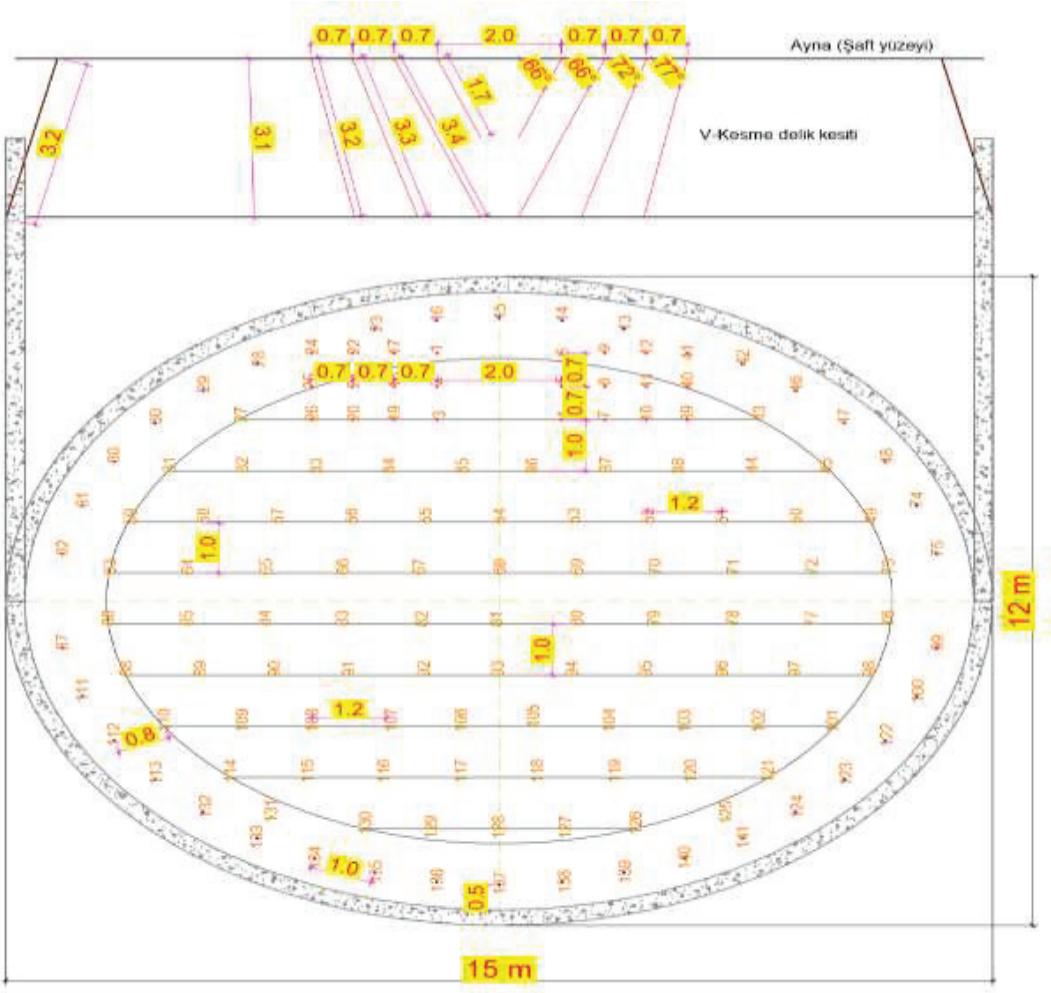
$$PPV=15256*SD^{-2,494} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te paylaşılan eşitlik kullanılarak, çalışmanın yapıldığı dönemde yürürlükte olan "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (ÇGDYY)" kapsamında önerilen, titreşim kaynaklı eşik hasar limitlerine göre, farklı mesafelerde kullanılabilecek patlayıcı miktarları tayin edilmiştir (ÇGDYY 2010). Gecikme başına kullanılabilecek maksimum patlayıcı miktarları Çizelge 1'de paylaşılmıştır.

Çizelge 1. Farklı mesafelerde kullanılabilecek patlayıcı madde miktarları (ÇGDYY'ye göre)

Mesafe R (m)	**Düşük Frekanslar (<40 Hz) İçin Eşik Hasar Limiti (mm/sn)**	**Gecikme Başına Kullanılabilecek Patlayıcı Miktarı (kg)**	**Yüksek Frekanslar (>40 Hz) İçin Eşik Hasar Limiti (mm/sn)**	**Gecikme Başına Kullanılabilecek Patlayıcı Miktarı (kg)**
15	**19**	1.1	**50**	2.3
20		1.9		4.1
25		2.9		6.4
30		4.2		9.2
35		5.7		12.5
40		7.5		16.3
45		9.5		20.6
50		11.7		25.4
55		14.2		30.8
60		16.9		36.6

Çizelge 1'de paylaşılan gecikme başına düşen patlayıcı miktarları, SKP2C ve SKP2D şaftları çevresinde yer alan yerleşim birimleri dikkate alınarak, şaftlar için patlatma modelleri oluşturulmuştur. Söz konusu şaftlara en yakın yerleşim birimleri yaklaşık 25 metre mesafede yer almaktadır. Emniyetli bölgede kalmak adına, düşük frekanslar için önerilen 19 mm/s'lik eşik hasar limiti dikkate alınarak, gecikme başına maksimum patlayıcı miktarı 2.0 kg ile sınırlandırılarak patlatma tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan tipik patlatma modeli Şekil 3'te paylaşılmıştır.



Şekil 3. Patlatmalı şaft kazıları için uygulanan başlangıç modeli

Oluşturulan atım modelinde, delik çapları 51 mm, ilerleme miktarı 2.6 m olarak belirlenmiştir. Düşey V-kesme uygulaması ile serbest yüzey oluşturulması planlanan modelde, ateşleme elemanları olarak yüzey ve delik içi gecikmesi bütünleşik, şok tüplü elektriksiz kapsüller; patlayıcı olarak ise kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcı tercih edilmiştir. Gecikme başına düşen patlayıcı miktarının asgari seviyede olması için, her deliğin ayrı gecikmelerde patlatılması sağlanmıştır. Elektriksiz kapsüllerin delik içi gecikmesi 3500 ms, delikler arası gecikmesi ise 17 ms olarak belirlenmiştir. Tam kesit şaft kazılarında kullanılan patlayıcı miktarları Çizelge 2'de paylaşılmıştır. Bu miktarlar, aynanın jeolojik durumuna göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Çizelge 2. Patlatmalı şaft kazılarında kullanılan patlayıcı madde ve kapsül miktarları

Gecikme sırası (delik numarası)	Gecikme başına düşen patlayıcı	Delik sayısı	Deliklerdeki toplam patlayıcı
1-8, 14, 15	1.1 ila 1.6 kg	10 adet	11 kg ila 16 kg
9-13, 16-123, 141, 143, 145	2.2 ila 2.6 kg	116 adet	255 kg ila 302 kg
124-140, 142, 144, 146-166	1.6 ila 2.2 kg	40 adet	64 kg ila 88 kg
TOPLAM		166 adet	330 kg ila 406 kg

Başlangıç modeline uygun olarak sürdürülen patlatmalı kazılar esnasında, şantiye sahası çevresinde yer alan yerleşim birimleri yakına titreşim ölçer cihazlar yerleştirilerek, yapılara etki eden titreşim hızı değerleri ölçülmüştür. Şantiye çevresinde oluşturulan istasyon noktalarının konumları Şekil 4'te, şaft kazılarında kayıt edilen bazı titreşim hızı değerleri ile ölçüm parametreleri Çizelge 3'te paylaşılmıştır.

Şekil 4. TBM İşletme Sahası çevresindeki titreşim ölçüm istasyonları

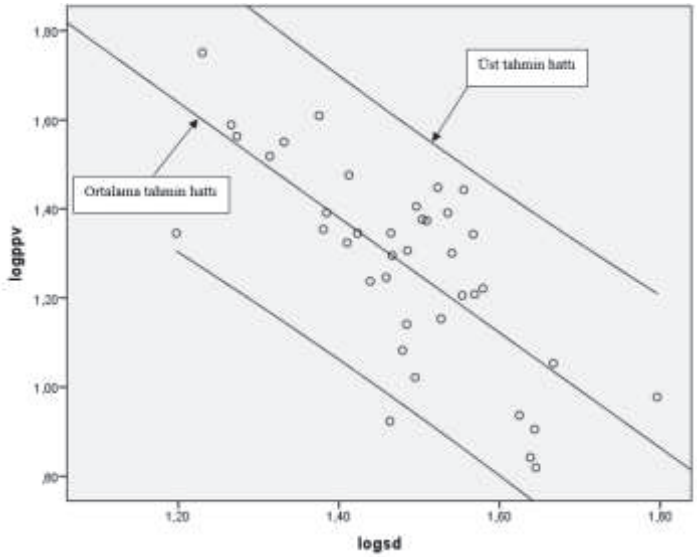
Çizelge 3. TBM İşletme Sahası şantiyesinde SKP2C ve SKP2D şaftlarında yapılan atımlara ait bazı titreşim ölçüm sonuçları

Atım No	Maksimum. Parçacık Hızı (PPV) (mm/s)	Frekans f (Hz)	Toplam Patlayıcı Miktarı (kg)	Gecikme Başına Maksimum Patlayıcı Miktarı (kg)	Ölçüm Mesafesi (m)	Ölçekli Mesafe (SD)	İstasyon No
1	24.63	93	290	2.2	35.97	24.25	2 nolu istasyon
1	8.38	114	290	2.2	43.13	29.08	3 nolu istasyon
6	14.23	73	90	2.6	54.28	33.66	2 nolu istasyon
6	22.16	64	90	2.6	25.41	15.76	3 nolu istasyon
7	13.84	100	140	2.6	49.18	30.50	4 nolu istasyon
11	22.18	73	300	2.6	47.00	29.15	7 nolu istasyon
11	19.99	51	300	2.6	55.99	34.72	2 nolu istasyon
12	19.75	100	400	2.6	47.19	29.27	6 nolu istasyon
12	8.64	45	400	2.6	67.95	42.14	9 nolu istasyon
13	6.95	85	360	2.6	70.13	43.49	8 nolu istasyon
13	12.09	57	360	2.6	48.60	30.14	7 nolu istasyon
13	16.06	73	360	2.6	57.68	35.77	2 nolu istasyon
14	20.25	78	400	2.6	49.30	30.57	6 nolu istasyon
14	11.3	64	400	2.6	74.90	46.45	10 nolu istasyon
15	22.03	102	360	2.6	59.52	36.91	2 nolu istasyon
15	10.51	51	360	2.6	50.40	31.26	7 nolu istasyon
15	6.59	114	360	2.6	71.23	44.17	8 nolu istasyon
16	23.81	79	400	2.6	51.44	31.90	6 nolu istasyon
16	16.16	60	400	2.6	59.78	37.07	5 nolu istasyon
16	8.04	68	400	2.6	70.96	44.01	9 nolu istasyon
17	16.65	73	360	2.6	61.22	37.97	2 nolu istasyon
17	23.64	56	360	2.6	52.08	32.30	7 nolu istasyon

TBM İşletme sahasında gerçekleştirilen patlatmalı kazılar neticesinde kayıt edilen titreşim hızı verileri, kullanılan patlayıcı miktarı ve mesafe verileri ile ilişkilendirilerek, sahanın titreşim yayılım eşitliği hesaplanmıştır. Toplamda 44 titreşim verisi kullanılarak hesaplanan ortalama tahmin eşitliği, Eşitlik 4'te, %95 üst tahmin eşitliği, Eşitlik 5'te, titreşim hızı ile ölçekli mesafe ilişkisini gösterir grafik ise Şekil 5'te paylaşılmıştır.

$$\%50 \text{ Ortalama Tahmin Hattı PPV} = 1548.82*SD^{-1.292} \quad (r=0.73) \tag{4}$$

$$\%95 \text{ Üst Tahmin Hattı PPV} = 3288.52*SD^{-1.292} \quad (r=0.95) \tag{5}$$



Şekil 5. TBM İşletme sahasına ait PPV-SD ilişkisi

Hesaplanan eşitliklerden yararlanarak, farklı mesafelerde, 19 mm/s'lik eşik hasar limitini aşmadan kullanılabilecek patlayıcı madde miktarları Çizelge 4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4. TBM İşletme Sahası için hesaplanan titreşim yayılım eşitliklerine göre, farklı mesafelerde 19 mm/s'lik titreşim hızını aşmadan kullanılabilecek patlayıcı madde miktarları (kg)

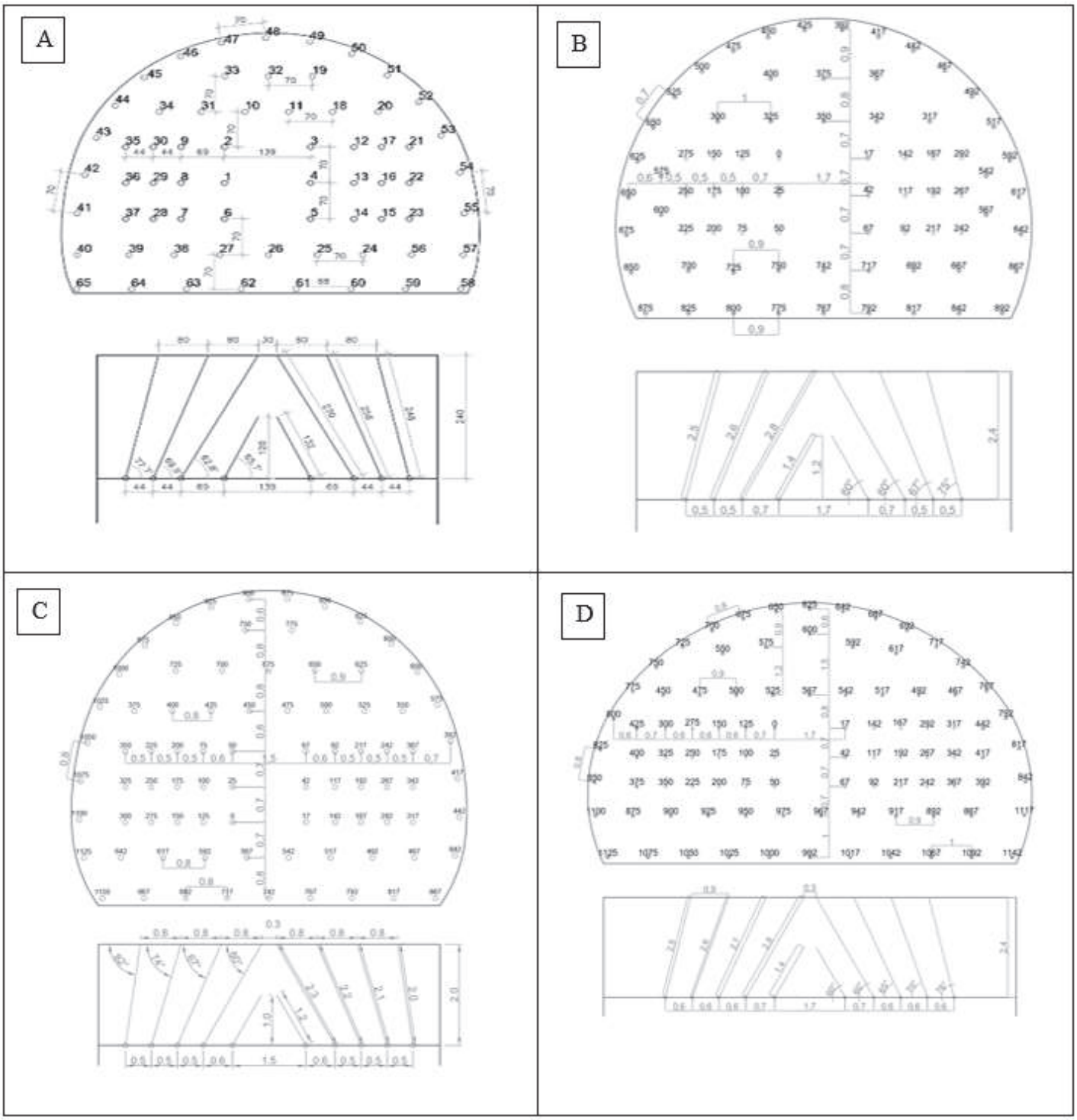
Mesafe R (m)	Eşik Hasar Limiti (mm/s)	Gecikme Başına Kullanılabilecek Patlayıcı Miktarı W (kg)	
		%50 Ortalama Tahmin Hattı Denklemine Göre	%95 Üst Tahmin Hattı Denklemine Göre
5	19	0.1	0.04
10		0.5	0.15
15		1.1	0.35
20		2.0	0.61
25		3.1	1.0
30		4.4	1.4
35		6.0	1.9
40		7.9	2.5
50		12.3	3.8
60		17.7	5.5
70		24.1	7.5
80		31.5	9.8
90		39.8	12.4
100		49.2	15.3

3.2 Tünel Patlatma Modellerinin Geliştirilmesi

TBM İşletme Sahasından türetilen titreşim yayılım eşitlikleri (Eşit. 4 ve 5) dikkate alınarak başta TBM İşletme Sahasında oluşturulacak tünel kazıları ve sonrasında ise projenin diğer şantiyelerinde gerçekleştirilecek patlatmalı kazılar için patlatma tasarımları oluşturulmuştur (Şekil 6).

Tasarımların oluşturulması esnasında; tünellerin risk unsuru yapılara olan mesafeleri (emniyet katsayısı kullanılarak) dikkate alınarak Çizelge 4'te paylaşılan, mesafeye göre kullanılabilecek maksimum patlayıcı miktarları belirlenmiştir. Belirlenen maksimum patlayıcı miktarı esas alınarak, kazı ilerleme boyu, delikler arası/sıralar arası mesafe, ateşleme sıralaması tayin edilmiştir. Ateşleme sistemi olarak, gecikme başına düşen şarj miktarını minimumda

tutmak adına, yüzey ve delik içi gecikme elemanının bütün halde olduğu çift kapsüllü elektriksiz kapsüller kullanılmıştır.



Şekil 6. ***A)*** A tipi tünel paterni, ***B)*** A2 tipi tünel paterni, ***C)*** B4 tipi tünel paterni, ***D)*** P tipi tünel paterni,

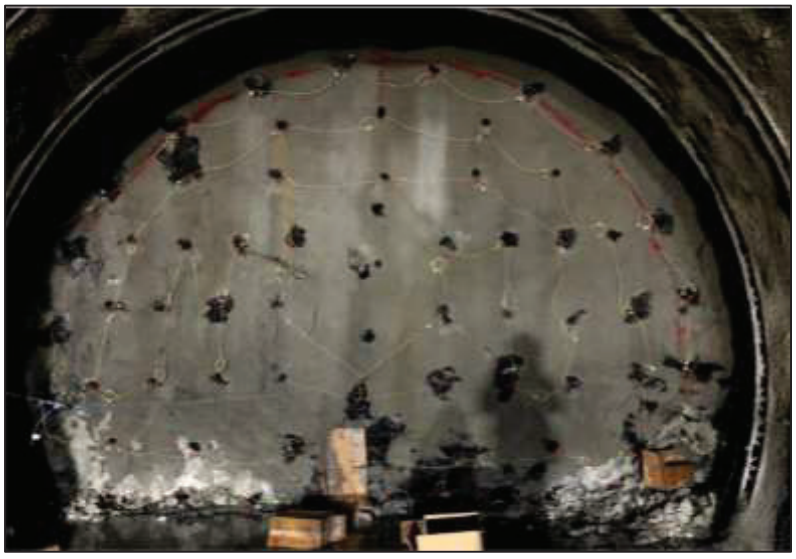
Geliştirilen patlatma modelleri, uygulanan noktadaki risk unsuru yapıların konumları dikkate alınarak, Çizelge 4'te paylaşılan, mesafenin fonksiyonu olarak değişen patlayıcı miktarlarına göre uyarlanarak patlatmalı kazı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamındaki tüm kontrollü patlatmalar, delik içi kapsülü ve yüzey gecikme elemanını bir arada bulunduran (delik içi ve yüzey gecikmesi bütünleşik) elektriksiz şok tüplü kapsül sistemi ile kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcılar ile beraber kullanılarak yapılmıştır.

Proje kapsamında patlatmalı kazı çalışması gerçekleştirilen diğer şantiyeler Şekil 7'de paylaşılmıştır.

Şekil 7. Proje kapsamında patlatmalı kazı uygulaması gerçekleştirilen şantiyeler

Çalışmalar kapsamında, TBM İşletme Sahasından (SKP2C ve SKP2D) türetilen titreşim yayılım eşitlikleri kullanılarak (Eşit. 4 ve 5); Kaynarca Bölgesi Şantiyeleri olan SKT1B, SKP2A ve SKP2B şantiyelerindeki patlatmalı kazı çalışmaları sürdürülmüştür. Çalışmalar kapsamında uygulanan patlatmalı kazı çalışmalarına ait örnek görsel Şekil 8'de paylaşılmıştır.



Şekil 8. SKT-1B şantiyesinde A tipi tünel aynasının elektriksiz kapsül sistemiyle bağlantısı

3.3 Farklı Şantiyeler İçin Titreşim Yayılım Eşitliklerinin Hesaplanması

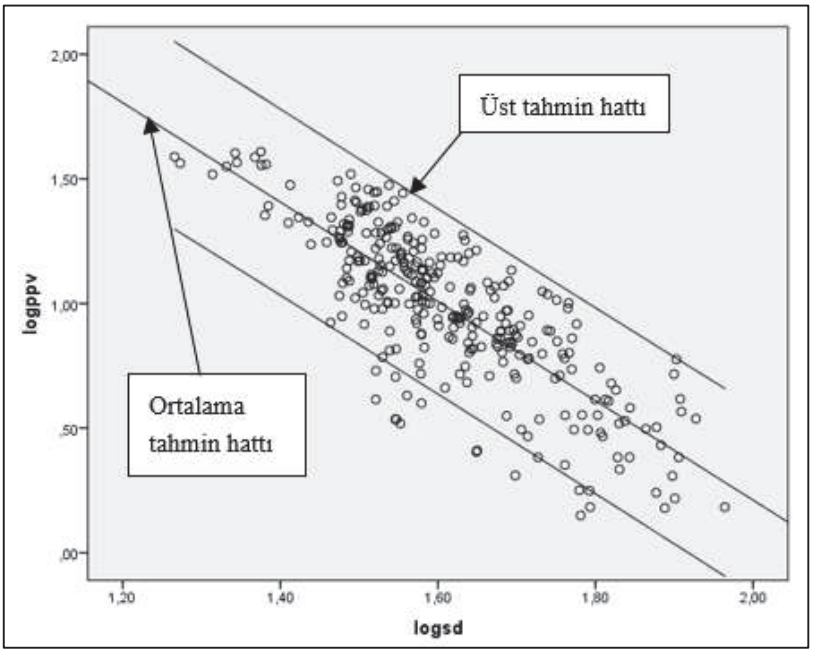
Çalışma kapsamında, yapılan risk analizleri ve deneme atımlarından türetilen titreşim yayılım eşitlikleri ile proje sahasındaki patlatmalı kazılar sürdürülmüştür. Patlatmalı kazılar esnasında kayıt edilen titreşim hızı verileri ile patlatmalı kazı parametreleri ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir.

Türetilen titreşim yayılım eşitlikleri geliştirilerek, TBM İşletme Sahası (SKP2C ve SKP2D) ve Kaynarca Bölgesi Şantiyeleri (SKT1B, SKP2A ve SKP2B) için ayrı ayrı titreşim yayılım eşitlikleri geliştirilmiştir.

TBM İşletme Sahası kapsamında kayıt edilen 347 atım verisi kullanılarak geliştirilen ortalama titreşim yayılım eşitliği, Eşitlik 6'da; %95 güvenirlilikle oluşturulmuş üst tahmin hattı eşitliği ise Eşitlik 7'de paylaşılmıştır. Eşitliklere ait PPV-SD ilişkisi grafiği ise Şekil 9'da paylaşılmıştır.

$$\%50 \text{ Ortalama Tahmin Hattı PPV} = 15739.8*SD^{-1.993} \quad (r=0.80) \tag{6}$$

$$\%95 \text{ Üst Tahmin Hattı PPV} = 36897.8*SD^{-1.993} \quad (r=0.95) \tag{7}$$



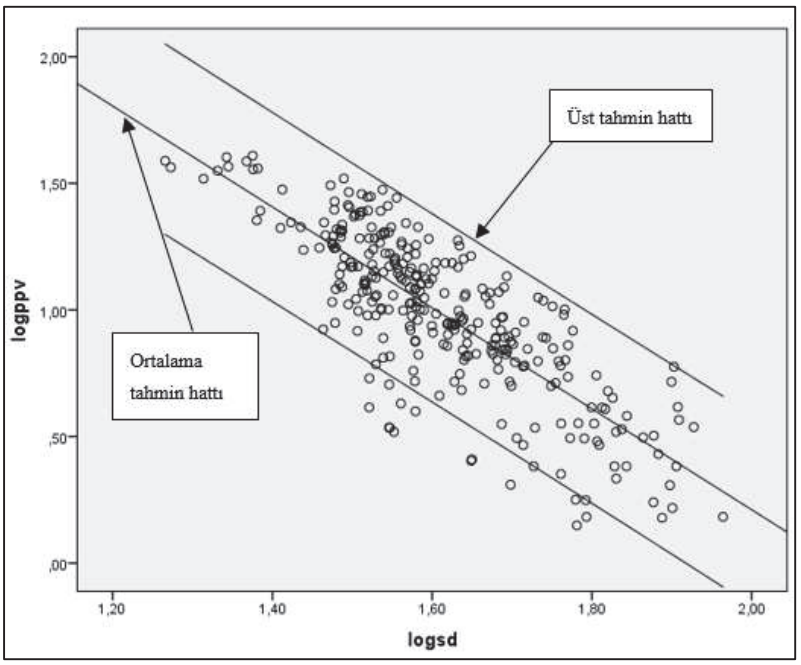
Şekil 9. TBM İşletme Sahası PPV-SD ilişki grafiği

Kaynarca Bölgesi şantiyelerinde kayıt edilen 287 atım verisi kullanılarak geliştirilen ortalama titreşim yayılım eşitliği, Eşitlik 8'de; %95 güvenirlilikle oluşturulmuş üst tahmin hattı eşitliği ise Eşitlik 9'da paylaşılmıştır. Eşitliklere ait PPV-SD ilişkisi grafiği ise Şekil 10'da paylaşılmıştır.

$$\%50 \text{ Ortalama Tahmin Hattı PPV} = 262.4*SD^{-1.003} \quad (r=0.77) \tag{8}$$

$$\%95 \text{ Üst Tahmin Hattı PPV} = 632.4*SD^{-1.003} \quad (r=0.95) \tag{9}$$

Oldukça iyi korelasyon katsayıları ile türetilen eşitler (Eşit. 6 ve 7 ile Eşit. 8 ve 9) söz konusu bölgelerde, gelecek dönemlerde gerçekleştirilecek atımlar için, patlatmalı kazı öncesi risk analizi yapmak ve çevre yapılarda hasarlara neden olmamak için emniyetli biçimde kullanılabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 10. Kaynarca Bölgesi PPV-SD ilişki grafiği

4 SONUÇLAR

Bu çalışmada, meskun mahallerde inşa edilmekte olan metro tünellerinde gerçekleştirilen patlatmalı kazılar esnasında oluşacak titreşimlerin, tahmin edilmesine yönelik uygulanan çalışmalar paylaşılmıştır.

Daha önce patlatmalı kazı çalışması gerçekleştirilmeyen proje için, başlangıç parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çalışma sahasına yakın konumlarda, benzer kaya ortamlarında gerçekleştirilen patlatmalı kazı faaliyetlerinden türetilen titreşim yayılım eşitlikleri kullanılmıştır. Bu yaklaşımdan yola çıkılarak deneme atımları yapılmıştır.

Deneme atımlarında kayıt edilen 44 titreşim hızı verisi, kullanılan patlayıcı miktarları ve patlatma noktasına olan mesafe ile ilişkilendirilerek, TBM İşletme Sahası olarak adlandırılan bölge için titreşim yayılım eşitliği türetilmiştir (Eşit. 4 ve 5).

Türetilen eşitliklerden yararlanılarak, risk unsuru yapı ile patlatmalı kazı noktası arasındaki mesafeye göre kullanılabilecek maksimum patlayıcı belirlenmiş ve bu miktarlara göre patlatma modelleri sürekli olarak revize edilmiştir. Türetilen titreşim yayılım eşitlikleri ile TBM İşletme Sahasında ve bu bölgeye yakın konumda bulunan Kaynarca Bölgesi Şantiyelerinde patlatmalı kazı faaliyetleri sürdürülmüştür.

Gerçekleştirilen her atımda kayıt edilen titreşim verileri, mevcut verilere eklenerek titreşim yayılım eşitlikleri hesaplanmıştır.

TBM İşletme Sahası kapsamında kayıt edilen 347 atım verisi kullanılarak geliştirilen ortalama titreşim yayılım eşitliği, Eşitlik 6'da, %95 güvenirlilikle oluşturulmuş üst tahmin hattı eşitliği ise Eşitlik 7'de; Kaynarca Bölgesi şantiyelerinde kayıt edilen 287 atım verisi kullanılarak geliştirilen ortalama titreşim yayılım eşitliği, Eşitlik 8'de, %95 güvenirlilikle oluşturulmuş üst tahmin hattı eşitliği ise Eşitlik 9'da paylaşılmıştır.

Bu bölgelerde gerçekleştirilecek patlatmalı kazı faaliyetleri öncesinde, oluşacak titreşim hızı değerlerinin tahmin edilmesinde, bu eşitlikler güvenle kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

ÇGDYY Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği. , 27601 § (2010). Geliş tarihi gönderen https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100604-5.htm

ÇGKY Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği. , 32029 § (2022). Geliş tarihi gönderen https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/11/20221130-1.htm

DIN4150-3 DIN 4150-3:2016-12, Erschütterungen im Bauwesen_- Teil_3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, Beuth Verlag GmbH. https://doi.org/10.31030/2579353

Dowding 1994. Blast Vibration Monitoring and Control, Second Edition, C. H. Dowding. Geliş tarihi gönderen https://www.biblio.com/book/blast-vibration-monitoring-control-second-edition/d/1352878179

Kahriman, A. 2001. Prediction of particle velocity caused by blasting for an infrastructure excavation covering granite bedrock. Mineral Resources Engineering, 10(02):, 205-218. https://doi.org/10.1142/S0950609801000622

Karadogan, A., Kahriman, A., Ozer, U. 2014. A new damage criteria norm for blast-induced ground vibrations in Turkey. Arabian Journal of Geosciences, 7(4):, 1617-1626. https://doi.org/10.1007/s12517-013-0830-8

Mahmutoglu, Y., Şans, G., Kahriman, A., Sarıdede, M. 2018. Patlatmalı Sığ Tünel Kazılarının Tasarımı ve Sanayi Tesislerine Etkilerinin Kontrolü.

Yilmaz, O. 2016. The comparison of most widely used ground vibration predictor equations and suggestions for the new attenuation formulas. Environmental Earth Sciences, 75(3):, 269. https://doi.org/10.1007/s12665-015-5011-5

Practical Models to Distinguish Between Seismic Events and Blast Signals

R. Shirani Faradonbeh, M. Ghiffari Ryoza, H. D. Jang, E. Topal
WA School of Mines: Minerals, Energy and Chemical Engineering, Curtin University, Kalgoorlie, Australia

ABSTRACT: The seismic events are contaminated with the blast/noise signals in microseismic monitoring of the underground excavations, negatively affecting the interpretation and detection of high-stress zones. This study proposes explicit and comprehensible classifiers by hybridizing the principal component analysis (PCA) with genetic programming (GP) and classification and regression tree (CART) algorithms. Six discriminant parameters representing the spectrum and source characteristics of the signals were used as input variables. PCA reduced the problem's dimensionality to two components, which were then fed into GP and CART algorithms as the new input variables. A systematic hyperparameter tuning procedure was employed to find the optimum values of the controlling parameters of the algorithms. The hybrid PCA-GP and PCA-CART classifiers provided practical mathematical equations and tree structures, respectively, capable of distinguishing between the signal types with high accuracy. However, the PCA-GP model outperformed the PCA-CART model based on the performance indices.

1 INTRODUCTION

Microseismic monitoring is a real-time technique for detecting fracture initiation and propagation within the rock mass in underground excavations and locating rockburst-prone areas. However, the major challenge in seismicity monitoring is the contamination of genuine seismic events with the noise signals due to human-induced activities, such as blasting operations. This, in other words, adversely affects the interpretation of recorded signals and results in determining the fictitious areas of high seismic stress (Dong et al., 2016a).

The techniques for distinguishing between seismic events and noise signals can be classified into three main groups: 1) Manual techniques, which include sliding window and threshold value-based algorithms, such as the multi-window technique (Chen and Stewart, 2005) and the short-term average to the long-term average (STA/LTA) ratio (Trnkoczy, 2002). These techniques calculate the absolute energies, amplitudes or the envelop function of the seismic trace over various time windows. Signals passing a user-defined event triggering threshold are defined as genuine seismic events. However, due to the sensitivity of these techniques to the defined thresholds, the noise signals whose amplitudes and energies are similar to those of seismic events are misclassified as seismic events, significantly reducing the accuracy and reliability of these techniques (Zhao and Gross, 2017). This can be seen in Figure 1, which represents the amplitude and STA/LTA ratio variation for typical seismic events and different noise signals. This figure shows that the noise signals, like seismic events, have exceeded the defined threshold (see dotted circles). Furthermore, the manual techniques require professional

knowledge and experience in signal processing and are time-consuming. 2) Multivariate statistical techniques, including the linear discriminant analysis, maximum-likelihood Gaussian classifier, and rigid discrimination techniques. The conventional statistical techniques are not robust enough to solve high-complex non-linear problems, such as signal processing, due to innate mathematical assumptions, which reduces the model generalization (Pu et al., 2020; Dong et al., 2016a). 3) Machine learning (ML)-based techniques, which can find the latent complex relationship between the independent and dependent variables in an intelligent manner. Recently, different types of supervised ML algorithms, such as artificial neural network (ANN), support vector machine (SVM), logistic regression (LR), random forest (RF), and hybrid models, have been used extensively by researchers to propose more accurate signal classifiers (Rao et al., 2021; Pu et al., 2020).

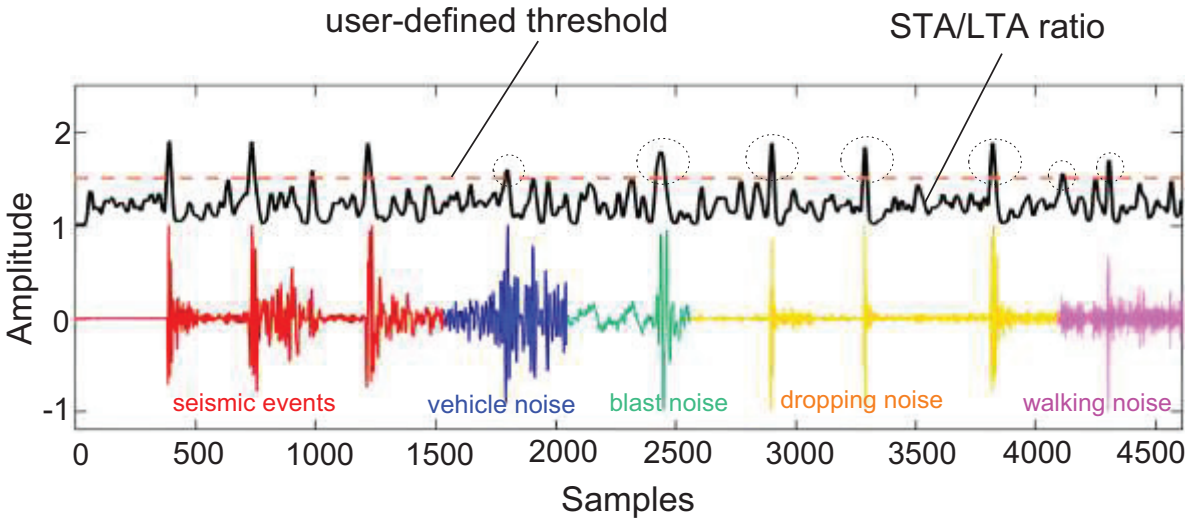


Figure 1. Sample waveforms recorded for microseismic and noise events, modified from Zhao and Gross (2017)

Although the applied ML models have notably improved the classification accuracy compared to the manual and statistical techniques, most of them are known as black-box techniques, which fail to provide explicit and comprehensible models and are prone to the over-fitting problem. According to Giustolisi et al. (2007), the interpretability of the models for users increases exponentially with physical knowledge, and the black-box techniques have the lowest level of interpretability compared to the grey-box and white-box techniques. The white-box techniques, which have the highest level of interpretability, refer to models constructed based on first principles (e.g., laws of physics) and all their variables and parameters are known. On the other hand, the grey-box modelling techniques take advantage of higher physical knowledge and interpretability compared to the black-box techniques, and by providing a mathematical relationship between the parameters, result in more explicit and comprehensible models. Therefore, the lack of a more practical and comprehensible classifier for distinguishing between the genuine microseismic signals and blast signals in underground excavations is tangible.

This study aims to propose novel binary classifiers based on grey-box modelling techniques. To do so, the principal component analysis (PCA) is hybridized with the genetic programming (GP) and classification and regression tree (CART) algorithms. The utilised methodology can open the black-box nature of the prior models by proposing mathematical equations and visual tree structures. The following sections describe the data collection procedure, model development and obtained results in more detail.

2 MICROSEISMIC MONITORING RECORDS

The modelling procedure in this study was conducted based on a microseismic monitoring database compiled from a coal mine in China operating at a depth greater than 800 m (Dong et al., 2016b). Mining at this depth is accompanied by sudden stress release, a serious threat to personnel safety and the project's economy. Therefore, a microseismic monitoring system comprising the sensors (i.e., 26 single-component sensors and two multi-component sensors), data acquisition system, signal processor, underground data center, communication cables, optical fibers, and surface monitoring office was utilised in this coal mine to record the events. The dataset used in this study contains 50 seismic events and 50 blast signals (i.e., a balanced dataset) extracted from a database prepared by 13 days of continuous monitoring. The blast signals were detected based on waveform analysis, blasting time and location, and calibration of the P- and S-wave arrival time.

On the other hand, microseismic events were recorded when there was no blasting operation at the mine site. However, the background noises induced by electrical circuits, mining vehicles etc., can be interfered with seismic events. These signals have specific characteristics, such as continuous waveform, large amplitude, and short signal rise time without attenuation. These characteristics were then used to identify and remove the noises from the compiled database. Furthermore, microseismic events are usually generated by shear fracturing of the rockmass, and therefore, they show obvious S-wave arrival time and result in waveform characteristics of "dense in front and sparse at the end". The energy curve of such events also shows an apparent upward mutation at the beginning of the arrival of the S wave, making it a verification method of microseismic events (Dong et al., 2016b).

The selection of discriminant parameters (input variables) is of paramount importance to prevent overtraining and the complexity of the model. Therefore, six parameters representing both the microseismic source, i.e., the logarithm of the seismic moment *lgM*, the logarithm of microseismic energy *lgE* and the number of triggered sensors *N*, and spectrum characteristics, i.e., dominant frequency *F*, the logarithm of the maximum peak arrival time *lgT*, and the logarithm of the first peak amplitude *lgA*, were selected for classifier development in this study. *M* reflects the physical characteristics of rockmass fracturing and seismic intensity. *E* refers to the energy released from the rockmass during the transition from elastic deformation to plastic deformation (overall energy radiated from the P- and S- waves). The number of sensors triggered by the microseismic events and blast signals was considerably different; therefore, it was considered an input variable for model development. *F* refers to the frequency at which the maximum energy is present in the seismic signal. *T*, on the other hand, represents the time at which the highest amplitude or strongest part of a seismic signal arrives at a seismic sensor or monitoring station. *A* also refers to the amplitude of the first significant peak in the seismic signal. The microseismic source parameters were determined through the time-domain and amplitude-domain analysis of the waveforms. In contrast, the spectrum characteristics were determined by frequency-domain analysis (e.g., Fast Fourier Transform *FFT*).

The box-plot, distribution, and descriptive statistics of these parameters can be seen in Figure 2. From this figure, it can be observed that the parameters almost follow a normal distribution. Additionally, it was found that the parameters lgA and lgT have a suspected outlier (i.e., $X_i > Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$ or $X_i < Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$; X_i is the data sample) which both correspond to a single recorded signal. This outlier was removed from the database.

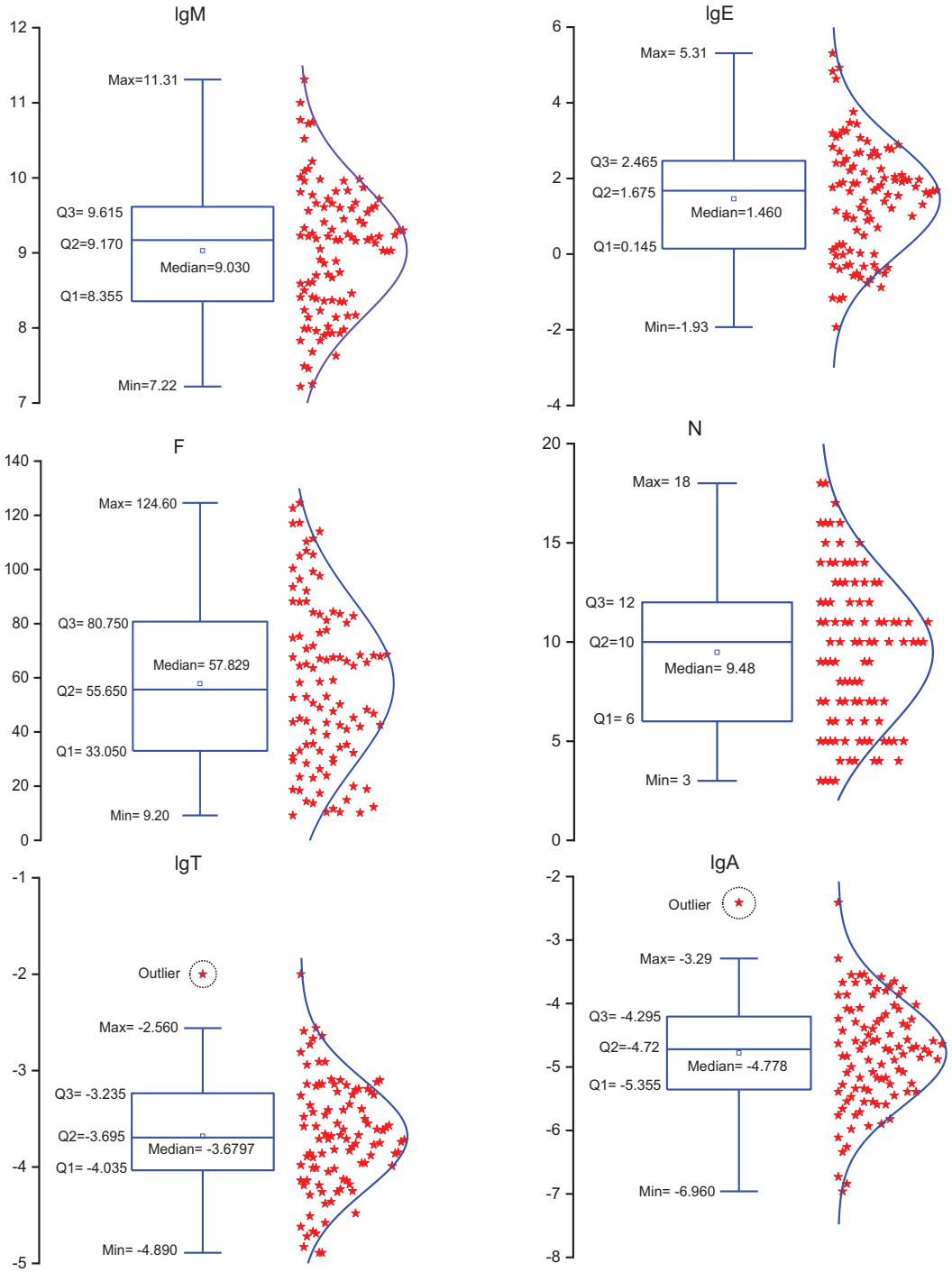


Figure 2. Box-plot and distribution of discriminant parameters

3 CLASSIFIER DEVELOPMENT

3.1 Principal Component Analysis

Principal component analysis (PCA) is a multivariate statistical technique to reduce the dimensionality of the problems by transferring data from a p-dimensional space to q dimensional space where q<p (Shirani Faradonbeh and Taheri, 2019; Shirani Faradonbeh and Monjezi, 2017). In the PCA analysis, the newly generated dimensions are known as principal components (PCs), which are the linear combinations of the original variables and retain the maximum possible variance of the datasets. To conduct the PCA analysis, first, the eigenvalues of the standardized matrix are calculated using Equation (1).

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (1)$$

where C, λ and I are, respectively, the correlation matrix of the standardized data, the eigenvalues, and the identity matrix. The weights corresponding to each variable in the PC are then calculated via Equation (2).

$$|C - \lambda I|W = 0 \quad (2)$$

where W is the matrix of the weights.

The influence of each variable in the PC can be evaluated using varimax rotation to determine the values of the rotated factor loadings. The loadings show the contribution of each variable in the specific PC. Finally, the PCs are generated by multiplying the calculated weights (W) by the standardized data matrix (Çamdevýren et al., 2005). To ensure the suitability of the database for PCA, the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) test was performed, and the value KMO=0.714 was obtained, proving the sampling adequacy for analysis. Figure 3a shows the scree plot of the PCA and the cumulative variance of datasets explainable by each component. According to the Kaiser criterion (Guttman, 1954), the first two components have eigenvalues greater than 1, which were selected as new input variables for model development. These two components, in other words, cover 73% of the total variance. Figure 3b also shows the scatter of datasets projected on the new space. As seen from this figure, there is no natural group within the database, which means a single model can be developed for the whole database. Based on the weights calculated by the PCA techniques for the original inputs, the following equations were obtained for the selected components:

$$PC1 = -0.090lgM + 0.063lgE - 0.165N + 0.403lgA + 0.396lgT + 0.376F \quad (3)$$

$$PC2 = 0.475lgM + 0.278lgE + 0.502N - 0.060lgA - 0.080lgT - 0.1F \quad (4)$$

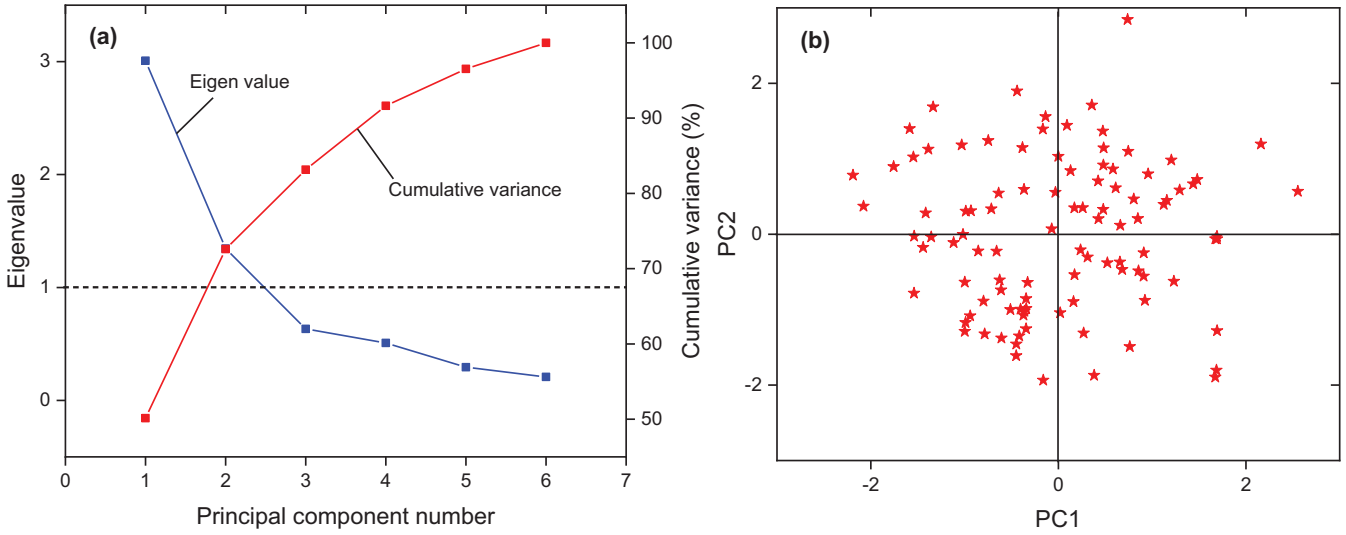


Figure 3. (a) Scree plot and the corresponding cumulative variance, and (b) the scatter plot of PC1 and PC2

3.2 Hybrid PCA-GP Model

Genetic programming (GP) is a metaheuristic algorithm which has been inspired by the Darwinian principle of the "survival of the fittest" and represents the solutions as computer programs (CPs) following the LISP language. As a grey-box modelling technique, GP can provide an explicit model for both regression and classification tasks. The GP modelling starts with the generation of the initial population of CPs. Each CP is comprised of mathematical functions and terminals (input variables and constant values), which are combined through different strategies, including Grow, Full, and Half techniques. Then, the generated CPs are expressed as parse trees, and their fitness is evaluated via a user-defined fitness function. Next, using a selection operator, the CPs are selected for the next generation and undergo extreme structural modification using three genetic operators (i.e., mutation, crossover, and reproduction). Finally, the fitness of the modified CPs is re-evaluated, and if the stopping criterion (i.e., the maximum iteration number or a specific fitness value) is met, the algorithm is stopped, and the best solution is extracted (Koza, 1992; Shirani Faradonbeh et al., 2017, 2018). To develop the PCA-GP classifier, the database was first randomly divided into training

(70% of the database) and testing (30% of the database) sections. PC1 and PC2 were introduced as the inputs, and the set of $\{+,-,/,\times, sine, cosine, tangent, arctangent, log10, e^x\}$ was defined as the function set for the algorithm. The output class was labelled as "1" for the seismic events and "0" for the blast signals. The GP algorithm was also allowed to select the constant values with the range of [0,10] to improve the model accuracy. The accuracy (ACC) measure was defined as the fitness function to evaluate the fitness of the generated CPs, which can be calculated as follows:

$$ACC = (TP + TN)/(TP + TN + FP + FN) \times 100 \quad (5)$$

where TP, TN, FP, and FN are respectively true positive (correctly classified as positive), true negative (correctly classified as negative), false positive (falsely classified as positive), and false negative (falsely classified as negative).

A series of sensitivity analyses was conducted to find the optimum values of the GP parameters. Table 1 summarises the range of values examined for each parameter and the obtained optimum values. Finally, the mathematical structures of the non-linear classifier model developed by GP algorithm for distinguishing between the seismic and blast signals can be obtained using the following equations:

$$Y = (-log\sqrt[3]{1.92674}/PC2) - PC2 - 2PC1 \quad (6)$$

$$Y' = 1/(1 + e^{-Y}) \quad (7)$$

$$\text{Signal type} = \begin{cases} 1\ (\text{microseismic event})\ Y' \geq 0.5 \\ 0\ (\text{blast/noise signal})\ Y' < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

As seen from Equation 8, the binary classification of the recorded signals by the proposed classifier is conducted based on the determined threshold value (i.e., 0.5).

Table 1. GP settings and optimum values/methods

Parameter	Examined range/method	Optimum value
Population size	100-1000	700
Initialisation method	Full, Grow, Half	Grow
Selection method	Fitness proportionate selection, rank selection, tournament selection	Rank selection
Mutation rate	0.1-1	0.1
Crossover rate	0.1-1	0.8
Reproduction rate	0.1-0.5	0.2
Maximum tree depth	3-10	8

3.3 Hybrid PCA-CART Model

Classification and regression tree (CART) is another grey-box supervised algorithm invented by Breiman et al. (1984), which performs the classification through a binary recursive method. In the CART algorithm, the most important variable/PC with the minimum variance for predicting the target value is selected as the root node and contains all the datasets. Then, the root node is split into successive sub-nodes (child/internal nodes) using a series of rules (specific ranges of values for the input variables) determined for each branch. At each step of the recursive procedure, the nodes determine groups of regions according to the divisive rule that aims to minimize the impurity measure (residual sum of squares). The branching procedure continues until the maximum tree depth is achieved and tree pruning is conducted to prevent the over-fitting problem. The nodes at the end of each branch are known as leaf nodes, representing the predicted class (Shirani Faradonbeh et al., 2022a).

The same training and testing datasets used for the PCA-GP model were also utilised for developing the PCA-CART classifier. There are several controlling parameters in the CART algorithm, including the parent size, son size, and maximum tree depth, whose optimum values should be determined. A series of sensitivity analyses were conducted for each parameter by changing the values within a specific range and recording the accuracy value. Table 2 shows these ranges of values and the obtained optimum values for each parameter. The tree structure of the PCA-CART model can be seen in Figure 4. As seen in Figure 4, the application of PCs as the input variables rather than the original independent variables has significantly reduced the tree structure's complexity and made it easy to understand and implement. Table 3 shows the predicted values by each node and their associated rules.

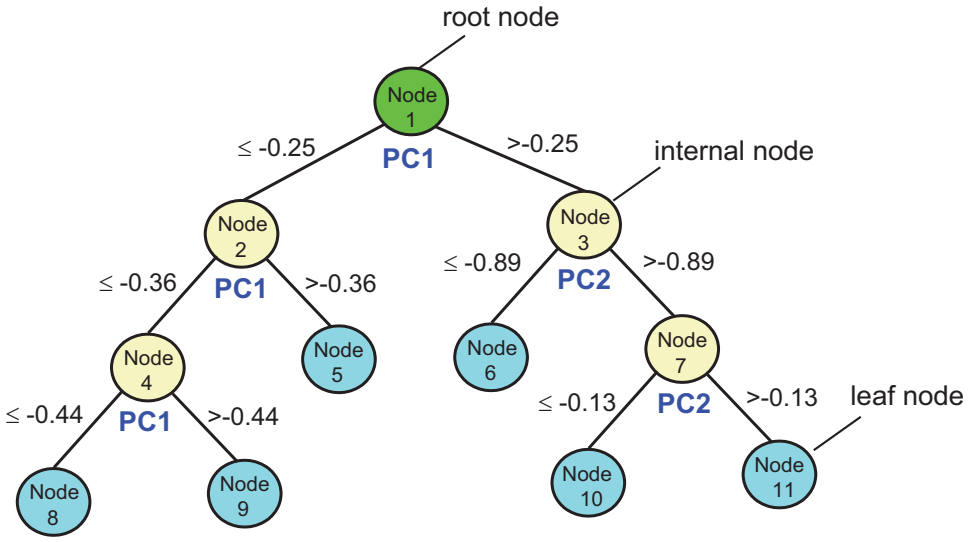


Figure 4. The developed PCA-CART model

Table 2. CART settings and optimum values/method

Parameter	Examined range/method	Optimum value/method
Parent size	40-70	40
Son size	5-30	5
Maximum tree depth	4-9	4

Table 3. Tree structure

Node number	Predicted class	Rules
1	0	-
2	1	If PC1 <= -0,25 then Type = 1 in 41,4% of cases
3	0	If PC1 > -0,25 then Type = 0 in 58,6% of cases
4	1	If PC1 <= -0,25 and PC1 <= -0,36 then Type = 1 in 38,6% of cases
5	1.	If PC1 <= -0,25 and PC1 > -0,36 then Type = 1 in 2,9% of cases
6	1	If PC1 > -0,25 and PC2 <= -0,89 then Type = 1 in 10% of cases
7	0	If PC1 > -0,25 and PC2 > -0,89 then Type = 0 in 48,6% of cases
8	1	If PC1 <= -0,25 and PC1 <= -0,36 and PC1 <= -0,44 then Type = 1 in 32,9% of cases
9	0	If PC1 <= -0,25 and PC1 <= -0,36 and PC1 > -0,44 then Type = 0 in 5,7% of cases
10	0	If PC1 > -0,25 and PC2 > -0,89 and PC2 <= -0,13 then Type = 0 in 10% of cases
11	0	If PC1 > -0,25 and PC2 > -0,89 and PC2 > -0,13 then Type = 0 in 38,6% of cases

4 PERFORMANCE APPRAISAL OF THE MODELS

To evaluate the classification performance of the proposed hybrid PCA-GP and PCA-CART models for discriminating the genuine seismic events and blast/noise signals, the confusion matrix and the receiver operating characteristic (ROC) curve were determined for both training and testing stages. The ROC curve is a measure to evaluate the diagnostic ability of the binary classifier model as its discrimination threshold is changed. ROC is obtained by plotting the true positive rate (TPR=TP/TP+FN) against the false positive rate (FPR=FP/FP+TN). The area under the curve (AUC) equal to 0.5 refers to the random classification by the model, while the AUC=1 (TPR=1 and FPR=0) refers to the perfect classification (Shirani Faradonbeh et al., 2022b). The confusion matrices for the constructed models can be observed in Tables 4 and 5.

According to Table 4, the PCA-GP model, with two misclassified events, resulted in 100% and 93.10% accuracy values in the training and testing stages, respectively. On the other hand, the PCA-CART model (Tab. 5) misclassified a total of 8 microseismic monitoring records, which caused 92.86% and 89.66% accuracy values in the training and testing stages, respectively. In terms of AUC measure, as seen in Figures 5 and 6, the PCA-GP outperformed relatively the PCA-CART classifier. However, both the PCA-GP and PCA-CART models, compared to the existing black-box models, are particularly simpler and, by providing explicit mathematical equations and visual patterns (tree structures), respectively, can be employed easily in practice with high reliability.

Table 4. Confusion matrix for the PCA-GP model

Training stage		Predicted class		Misclassified	ACC
		1 (seismic event)	0 (blast signal)	0	100%
Actual class	1 (seismic event)	TP= 33	FN= 0		
	0 (blast signal	FP= 0	TN= 37		
Testing stage		Predicted class		2	93.10%
		1 (seismic event)	0 (blast signal)		
Actual class	1 (seismic event)	TP= 17	FN= 1		
	0 (blast signal	FP= 1	TN= 10		

Table 5. Confusion matrix for the PCA-CART model

Training stage		Predicted class		Misclassified	ACC
		1 (seismic event)	0 (blast signal)	5	92.86%
Actual class	1 (seismic event)	TP= 30	FN= 3		
	0 (blast signal	FP= 2	TN= 35		
Testing stage		Predicted class		3	89.66%
		1 (seismic event)	0 (blast signal)		
Actual class	1 (seismic event)	TP= 15	FN= 2		
	0 (blast signal	FP= 1	TN= 11		

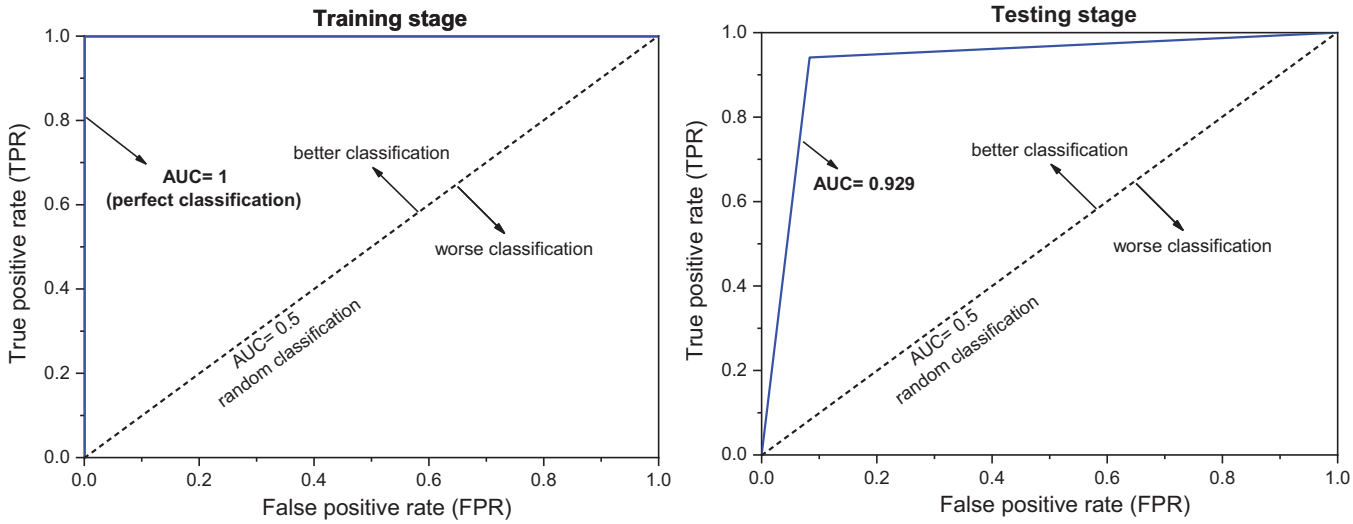


Figure 5. ROC curves and AUC values for the PCA-GP model in the training and testing stages

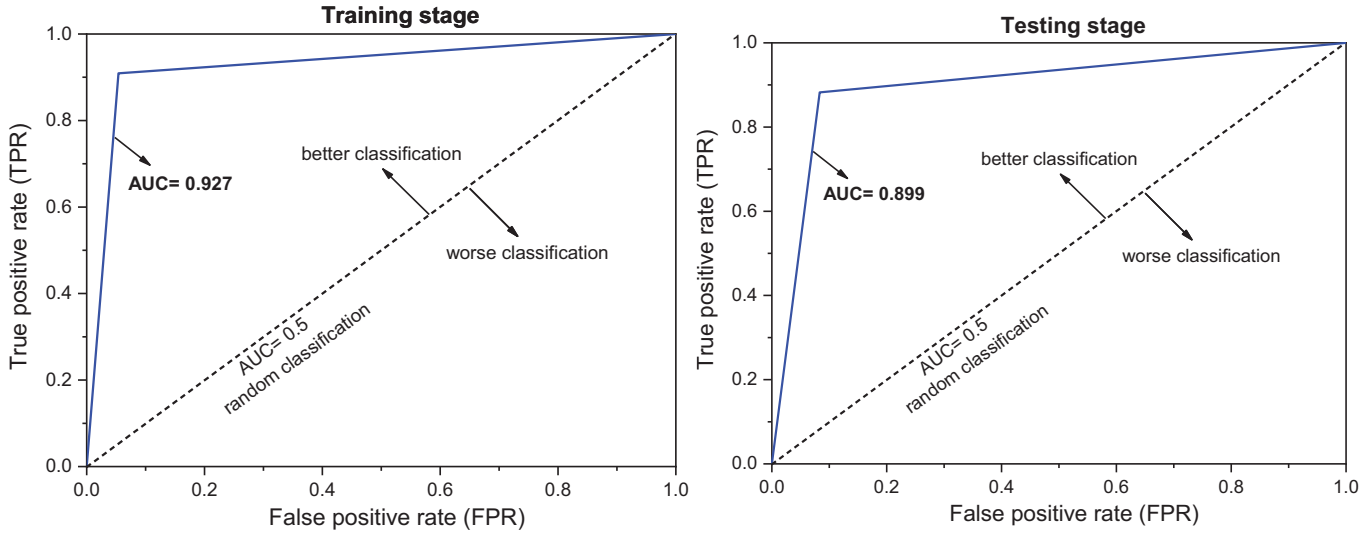


Figure 6. ROC curves and AUC values for the PCA-CART model in the training and testing stages

5 CONCLUSIONS

New grey-box modelling methodologies were proposed in this study for discriminating the genuine seismic events from the blast/noise signals by hybridizing principal component analysis (PCA) with genetic programming (GP) and classification and regression tree (CART) algorithms. The application of the PCA technique significantly reduced the problem's dimensionality so that the original six independent variables were transformed into two principal components (PCs), while the effect of all original variables was kept indirectly. This, on the other hand, affected the complexity reduction of the final models remarkably. Feeding the selected PCs as inputs to the GP algorithm and performing a series of sensitivity analyses for hyperparameter tuning resulted in an explicit non-linear mathematical classifier capable of estimating the recorded signal type with high accuracy (i.e., ACC=100% and AUC=1 for the training stage & ACC= 93.10% and AUC= 0.929 for the testing stage). The hybrid PCA-CART model also, with its simple and comprehensible tree structure, provided a practical tool for engineers to detect the seismic events during the microseismic monitoring with good accuracy (i.e., ACC= 92.86% and AUC= 0.927 in the training stage & ACC= 89.66% and AUC= 0.899 in the testing stage). Considering the high classification performance of the proposed hybrid

models in this study, the models' accuracy, reliability, and generalization can be further improved by incorporating more datasets and developing a multi-class classifier considering more noise signal types in future studies.

REFERENCES

Çamdevýren, H., Demýr, N., Kanik, A. and Keskýn, S., 2005. Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-a in reservoirs. *Ecological Modelling*, 181(4), pp.581-589.

Chen, Z. and Stewart, R., 2005. *Multi-window algorithm for detecting seismic first arrivals*. In Abstracts, CSEG National Convention (pp. 355-358).

Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R. and Stone, C.J., 1984. *Classification and regression decision trees*, Monterey, CA: Wadsworth & Brooks.

Dong, L.J., Wesseloo, J., Potvin, Y. and Li, X.B., 2016a. Discriminant models of blasts and seismic events in mine seismology. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 86, pp.282-291.

Dong, L.J., Sun, D.Y., Li, X.B., Ma, J., Chen, G.H. and Zhang, C.X., 2016b. A statistical method to identify blasts and microseismic events and its engineering application. *Chin. J. Rock Mech. Eng*, 35(7), pp.1423-1433.

Giustolisi, O., Doglioni, A., Savic, D.A. and Webb, B.W., 2007. A multi-model approach to analysis of environmental phenomena. *Environmental Modelling & Software*, 22(5), pp.674-682.

Guttman, L., 1954. Some necessary conditions for common-factor analysis. *Psychometrika*, 19(2), pp.149-161.

Pu, Y., Apel, D.B. and Hall, R., 2020. Using machine learning approach for microseismic events recognition in underground excavations: Comparison of ten frequently-used models. *Engineering Geology*, 268, p.105519.

Koza, J.R.G.P., 1992. *On the programming of computers by means of natural selection*. MIT Press, Cambridge.

Rao, D., Shi, X., Zhou, J., Yu, Z., Gou, Y., Dong, Z. and Zhang, J., 2021. An Expert Artificial Intelligence Model for Discriminating Microseismic Events and Mine Blasts. *Applied Sciences*, 11(14), p.6474.

Shirani Faradonbeh, R., and Monjezi, M., 2017. Prediction and minimization of blast-induced ground vibration using two robust meta-heuristic algorithms. *Engineering with Computers*, 33(4), pp.835-851.

Shirani Faradonbeh, R., Salimi, A., Monjezi, M., Ebrahimabadi, A. and Moormann, C., 2017. Roadheader performance prediction using genetic programming (GP) and gene expression programming (GEP) techniques. *Environmental earth sciences*, 76(16), pp.1-12.

Shirani Faradonbeh, R., Hasanipanah, M., Amnieh, H.B., Armaghani, D.J. and Monjezi, M., 2018. Development of GP and GEP models to estimate an environmental issue induced by blasting operation. *Environmental monitoring and assessment*, 190(6), pp.1-15.

Shirani Faradonbeh, R. and Taheri, A., 2019. Long-term prediction of rockburst hazard in deep underground openings using three robust data mining techniques. *Engineering with Computers*, 35(2), pp.659-675.

Shirani Faradonbeh, R., Taheri, A. and Karakus, M., 2022a. Fatigue failure characteristics of sandstone under different confining pressures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(3), pp.1227-1252.

Shirani Faradonbeh, R., Taheri, A. and Karakus, M., 2022b. The propensity of the over-stressed rock masses to different failure mechanisms based on a hybrid probabilistic approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119, p.104214.

Trnkoczy, A., 2009. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. In *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)* (pp. 1-20). Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

Yıldırım, E., Gülbağ, A., Horasan, G. and Doğan, E., 2011. Discrimination of quarry blasts and earthquakes in the vicinity of Istanbul using soft computing techniques. *Computers & geosciences*, 37(9), pp.1209-1217.

Zhao, Z. and Gross, L., 2017, September. Using supervised machine learning to distinguish microseismic from noise events. In *SEG International Exposition and Annual Meeting*. OnePetro.

Boğaziçi Üniversitesi/Hisarüstü-Aşiyan Füniküler Hattı İnşaatı Sırasında Yapılan Patlatmalı Kazı Çalışmalarının Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi

Evaluation of the Environmental Effects of Blasting During the Construction of the Bogazici University/Hisarüstü-Aşiyan Funicular Line

M.C. Özyurt, Ü. Özer, A. Karadoğan, Z. Sertabipoğlu, Ü.K. Şahinoğlu
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

M. Çallıoğlu, Ç. Karstarlı
Ankara İnşaat Ticaret ve Sanayi Limited Şirketi, Ankara

ÖZET: Bu çalışmada, Boğaziçi Üniversitesi/Hisarüstü-Aşiyan Füniküler Hattı inşaatı sırasında yapılan patlatmalı kazı çalışmalarının çevresel sonuçları değerlendirilmiştir. Tünel güzergâhının İstanbul'un en zengin semtlerinden birinden geçmesi, tarihi ve turistik açıdan oldukça önemli olan Rumeli Hisarı'na komşu, ve semtteki sosyal yaşamın günün her saatinde canlı olması gibi nedenlerden ötürü, tünel inşaatı sırasında meydana gelecek patlatma kaynaklı çevresel etkilerin kontrol altında tutulması gerekmiştir.

Çalışma kapsamında, söz konusu tünel inşaatında kazı yapılacak farklı tünel kesitleri için, arzu edilen teknik sonuçların ekonomik ve emniyetli limitlerde, patlatmadan kaynaklanan çevresel problemlerin en aza indirilmesine izin veren bir yaklaşımla risk analizine dayalı patlatma ön tasarımları yapılmıştır. Yapılan patlatma ön tasarımları, deneme atımları ile test edilerek kaya davranışı incelenmiş ve patlatma kaynaklı titreşim ve hava şoku değerleri ölçülmüştür. Ölçülen frekans ve en yüksek parçacık hızı (PPV) değerleri, söz konusu tarihlerde yürürlükte olan T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği"ne göre değerlendirilerek, patlatma kaynaklı titreşimlerin tünel çevresinde bulunan yapılar üzerinde olumsuz bir etkisi olup olmadığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, hem bu titreşim yayılım trendleri, hem de kazı ilerleme miktarları dikkate alınarak farklı tünel aynaları için patlatma ön tasarımları modifiye edilmiştir. Deneme atımlarında izlenen bu yönteme kazı süresince devam edilmiş, sürekli yinelenen bulgulara göre patlatma tasarımları dinamik bir şekilde modifiye edilmiş ve patlatma kaynaklı titreşimlerin kontrol altında tutulması hedeflenmiştir.

ABSTRACT: In this study, the environmental impacts of the blastings carried out during the construction of the Boğaziçi Üniversitesi/Hisarüstü-Aşiyan Füniküler line were evaluated. Due to the reasons such as the tunnel route passing through one of the wealthiest districts of Istanbul, adjacent to the Rumeli Fortress, which is very important in terms of history and tourism, and the social life in the district being lively at all hours of the day, the environmental effects caused by the blasting during the tunnel construction had to be kept under control.

Within the scope of the study, blasting preliminary designs based on risk analysis were made for the different tunnel sections to be excavated in the tunnel construction in question, with an approach that allows the desired technical results to be within economic and safe limits, minimizing the environmental problems caused by blasting. Preliminary blasting designs were tested with test shots, rock behaviour was examined, and blast-induced vibration and air shock values were measured. The measured frequency and maximum particle velocity (PPV) values

were evaluated under the "Regulation on the Evaluation and Management of Environmental Noise" of the T.R. Ministry of Environment and Urbanization, which was in force at the time, and it was determined whether the vibrations caused by blasting had a negative effect on the structures around the tunnel. According to the findings, blasting preliminary designs for different tunnel faces were revised considering both these vibration propagation trends and the excavation advance. This method, followed in trial shots, continued throughout the excavation, blasting designs were dynamically modified according to the recurring findings, and it was aimed to keep the blast-induced vibrations under control.

1 GİRİŞ

Ülkemizin yaklaşık % 42'si büyük ölçüde can ve mal kaybına neden olan depremlerin meydana geldiği birinci derece deprem kuşağı üzerinde, geri kalan bölümü ise diğer deprem kuşakları üzerinde yer almaktadır (Karagöz, 2008). Bu durum, şehirlerimizin bir bölümünün veya büyük bir kısmının bir proje kapsamında sistematik bir şekilde yenilenmesi zorunluluğunu doğurmuştur. Özellikle büyük şehirlerde artan nüfusun ve modern hayatın gerekliliklerinin bir sonucu olarak şehir içlerinde büyük inşaat ve alt yapı projeleri hayata geçmiştir.

Büyük inşaat ve alt yapı projelerindeki artışa paralel olarak artan ve genellikle kaçınılmaz olan patlatmalı kaya kazısı işleri, çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Bunlar arasında en fazla şikâyet konusu olan ise patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntısıdır. Yer sarsıntıları depreme benzer etkiler yaratmakta, benzer yapısal hasarlar oluşturmaktadır. Buna ek olarak, yer sarsıntıları insanlar ve diğer tüm canlılar üzerinde psikolojik etkileri de bulunmaktadır. Bu gibi nedenlerle gündeme gelen haklı veya haksız şikayetler, teknik elemanların uğraşması gereken en önemli problemlerinden biri haline gelmiştir. Bilinçli ve duyarlı işletmeler, patlatmaların yarattığı olumsuz etkileri asgari düzeyde tutabilmek ve çevreye zarar vermemek için gerekli ölçüm, değerlendirme ve önlem alma çalışmalarını yapmak ya da yaptırmak zorundadırlar.

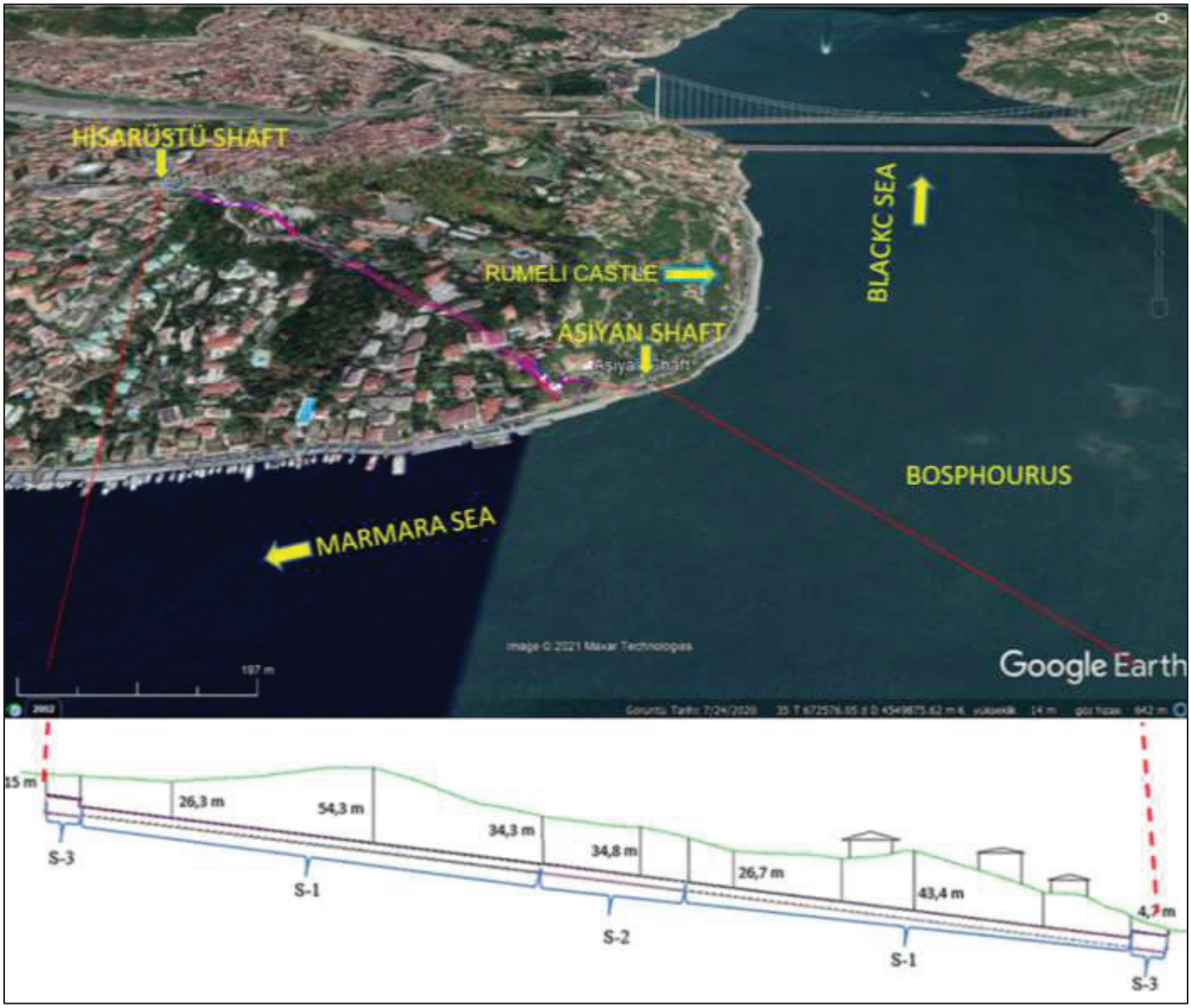
Bu çalışmada, Boğaziçi Üniversitesi/Hisarüstü-Aşiyan Füniküler hattı inşaatı sırasında yapılan patlatmalı kazı çalışmalarının çevresel sonuçları değerlendirilmiştir. Tünel güzergâhının İstanbul'un en zengin semtlerinden birinden geçmesi, tarihi ve turistik açıdan oldukça önemli olan Rumeli Hisarı'na komşu, ve semtteki sosyal yaşamın günün her saatinde canlı olması gibi nedenlerden ötürü, tünel inşaatı sırasında meydana gelecek patlatma kaynaklı çevresel etkilerin kontrol altında tutulması gerekmiştir.

İlk önce, çalışma sahasının yeri, önemi ve jeolojik bilgileri temin edilmiş ve proje incelenmiştir. Ardından maksimum parçacık hızına dayalı risk analizi yapılarak atımlarda kullanılabilecek gecikme başına maksimum şarj miktarları Çevresel Gürültü Yönetmeliği Eşik Hasar Limitine göre belirlenmiştir. Risk analizi çalışmalarından elde edilen maksimum patlayıcı madde miktarı verileri göz önünde bulundurularak, proje içerisinde bulunan farklı tünel kesitleri için patlatma ön tasarımları oluşturulmuştur. Çalışmanın devamında, oluşturulan ön tasarımların etkinliklerini test etmek üzere yapılan deneme atımlarının parçalama performansı ve çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Kaydedilen titreşim ve hava şoku değerleri, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne ve Birleşik Devletler Madencilik Bürosu (USBM) normuna göre irdelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre patlatma ön tasarımları modifiye, patlatma süresi ise optimize edilmiştir. Patlatma optimizasyon aşamaları çalışma kapsamında detaylı olarak açıklanmıştır.

2 BOĞAZİÇİ ÜNİVERSİTESİ/HİSARÜSTÜ-AŞİYAN FÜNİKÜLER HATTI

2.1 Konumu

Çalışma alanı, İstanbul'un Sarıyer ilçesinde, Boğaziçi'nin Avrupa yakasında, genelde yüksek gelirlilerin oturduğu ve aynı adı taşıyan bir deniz koyuna sahip olan Bebek semtindedir (Şekil 1). Semt, Çatalca Yarımadası'nın en doğu kesiminde yer alan sırtın, bir yandan İstanbul Boğazı'na, öbür yandan da kuzeyde Karadeniz'e doğru alçalan bölümlerden oluşmaktadır (Özer ve diğ., 2018).



Şekil 1. Çalışma alanı ve tünel hattının kesiti

Bebek, İstanbul Boğazı'na ve Rumeli Kalesi'ne komşu olması sebebiyle önemli bir turistik merkez olma özelliği taşımaktadır. Yoğun bir insan sirkülasyonu olan ilçede sosyal yaşam günün hemen her saati hareketlidir. Ayrıca, tünel hattının güzergahı üzerinde ve çevresinde çok sayıda konut ve tarihi yapı birbirine çok yakın mesafelerde bulunmaktadır.

2.2 Jeolojik ve Jeomekanik Özellikleri

Çalışma sahasında Alt-Orta Devoniyen yaşlı Kartal formasyonu (Dk) ve Kozyatağı üyesi (Dkk), Alt Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu (Ct) ve Holosen yaşlı Yapay Dolgu (Yd) birimleri gözlenmektedir. Çalışma alanındaki Paleozoyik birimler, temelden başlayarak yer yer

kıvrımlanmış, faylanmış ve bindirmeler kazanmıştır. Tabakalı kayaçlar tektonik kuvvetlerin etkisine bağlı olarak dalga şeklinde kıvrımlı yapı kazanmışlardır. Kıvrım eksenleri ve düşey kırıklar arasında uyumluluk bulunup birbirlerine az çok paraleldirler. Bu nedenle kıvrımların ve kırıkların beraber geliştikleri düşünülmektedir. Bindirme, kıvrım ve kırıklar nedeni ile oldukça kalın ezik zonlar gelişmiştir (Şenol ve Aydoğan, 2016).

Çalışma sahasında karşılaşılan jeolojik birimlerin mühendislik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Patlatma ile kazılan kesitlerdeki kaya birimlerinin genelde zayıf ve orta sert sınıfında oldukları, dayanımlarının (UCS) 27 ile100 MPa arasında değiştiği (ortalama 69 MPa), kaya kalite belirtecinin (RQD) ise % 10 ile % 65 arasında değiştiği (ortalama % 52) olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 1. Kaya kütlesi tanımlama ölçütleri (Şenol ve Aydoğan, 2016)

Tanımlama Ölçütleri		**Kumtaşı-Kiltaşı-Silttaşı**	**Şeyl-Silttaşı**	**Şeyl-Kireçtaşı**
Tane Boyu		İnce-orta taneli	İnce-orta taneli	İnce-orta taneli
Doku ve Yapı		Masif	Tabakalı	Tabakalı
Süreksizlikler	Türü	Tabaka	Tabaka	Tabaka
	Durumu	Açık-Kapalı	Açık-Kapalı	Açık-Kapalı
	Aralığı	Orta Derecede Yakın-Geniş	Orta Derecede Yakın-Geniş	Orta Derecede Yakın-Geniş
	Açıklığı	Orta Derecede Dar-Dar	Orta Derecede Dar-Dar	Orta Derecede Dar-Dar
	Dolgu	Kil-silt	Kil-silt	Kalsit
	Pürüzlülük	Dalgalı-pürüzlü	Dalgalı-az pürüzlü	Dalgalı-az pürüzlü
	Yönelimi	(Giriş) 135/25, (Çıkış) 310/34	307/27	307/27
	Devamlılığı	Orta Devamlılık	Orta Devamlılık	Orta Devamlılık
	Takım Sayısı	1 (Tabaka)+tali süreksizlikler	1 (Tabaka)	1 (Tabaka)
	Su Sızıntıları	Olabilir	Olabilir	Olabilir
	Blok Boyutu	Küçük-orta boyutlu bloklar	Küçük-orta boyutlu bloklar	Küçük-orta boyutlu bloklar
Ayrışma		Az-Orta Derecede Ayrışmış	Orta-Çok ayrışmış	Az-orta ayrışmış
Dayanım		Zayıf-Orta Zayıf Dayanımlı	Zayıf- Orta Dayanımlı	Orta Dayanımlı
RQD (%)		10-50	27-55	50-65
USC (MPa)		12-28	18-50	50-100

2.3 Proje Bilgileri

Söz konusu tünelin uzunluğu 956 metredir, derinliği ise 4.7 ile 54.3 metre arasında değişmektedir.

Projede S-1 (36.5 m^2), S-2 (62.65 m^2) ve S-3 (191.7 m^2) olmak üzere üç farklı tünel kesiti söz konusudur (Şekil 1). Başlangıçta, her üç kesitin de patlatma ile kazılması ön görülmüştür. Ancak, S-2 kesitinin bulunduğu ve tünelin en orta kısmında yer alan bölümlerde zayıf kaya birimleri ile karşılaşılmasından ötürü patlatmalı kazı ihtiyacı ortadan kalkmış ve mekanik kazı yöntemi tercih edilmiştir.

Aşiyan portal girişinin bulunduğu nokta, tünel güzergahının yer yüzüne en yakın olduğu (4.67 m-10.9 m) olduğu bölgedir. Bu bölgede yapılan sondaj bilgileri (Şenol ve Aydoğan, 2016) dikkate alındığında, buranın genellikle yapay dolgu olduğu, kaya birimlerinin 10.9 m'den daha derinlerde gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu bölgenin de genellikle mekanik kazı ile kazılacağı planlanmıştır.

Kazıya, tünelin iki uç noktasını temsil eden Aşiyan portal girişinde ve Hisarüstü portal girişinde eş zamanlı başlanması, bu noktalardan tünelin orta kısımlarına doğru ilerlenmesi planlanmıştır. Bu kapsamda, patlatmalı kazı çalışmaları Hisarüstü Bölgesi ve Aşiyan Bölgesi olmak üzere iki ayrı grupta incelenmiştir. Kaya birimlerinin zayıfladığı ve patlatmalı kazıya ihtiyaç duyulmadığı bölgeler mekanik kazı ile geçilmiş, diğer bölgelerin kazılması ise toplam 369 adet patlatma ile gerçekleştirilmiştir.

3 MAKSİMUM PARÇACIK HIZI TAHMİNİ

Patlatma kaynaklı titreşimin büyüklüğünü ifade etmek için en önemli indeks maksimum parçacık hızıdır, PPV ile ifade edilir. PPV, yönetmeliklerde belirtilen maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlatma nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapıda yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri aştığında çevreye zarar verebilir. Proje süresince yürürlükte olan *Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği*'nde belirtilen Maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapının dışında yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapının dışında yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri

Titreşim Frekansı (Hz)	İzin Verilen En Yüksek Titreşim Hızı (Tepe Değeri-mm/s)
1	5
4-10	19
30-100	50
**(1 Hz- 4 Hz arasında 5 mm/s'den 19 mm/s'ye; 10 Hz- 30 Hz arasında 19 mm/s'den 50 mm/s'ye, logaritmik çizilen grafikte doğrusal olarak yükselmektedir)*	
*** Bu değerler, 30 Kasım 2022 tarih ve 32029 sayılı Resmi Gazete' de yayınlanan Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği ile beraber değişmiştir.*	

Patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntılarının önceden tahmin edilmesi, yer sarsıntılarının önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Birçok kişi ve kuruluş bu amaçla çeşitli araştırmalar yapmış ve ölçekli mesafeye bağlı maksimum parçacık hızı tahmininin en iyisi olduğu sonucuna varmışlardır. Maksimum parçacık hızı tahminine yönelik geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan ampirik ilişki Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$PPV = k\,(SD)^{-\beta} \tag{1}$$

Burada; PPV maksimum parçacık hızı (mm/sn), SD ölçekli mesafe, k ve β ise saha sabitleridir. Çalışma sahasının sabitleri ise ölçülen maksimum parçacık hızı ve ölçekli mesafe değerlerinin (en az 30 nokta yada atımla) ilişkilendirilmesi sonucunda belirlenmektedir. Bulunan bu değerler, kontrollü patlatma tasarım ve uygulamalarında, titreşim ölçüm aletinin olmadığı durumlarda; bazı pratik tabloların hazırlanması suretiyle uygulayıcılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Ölçekli mesafe (SD), bir defada patlayan veya gecikme başına düşen maksimum patlayıcı madde miktarı (W) ve patlatma noktasına olan mesafe (R) arasındaki ilişki Eşitlik 2 ile hesaplanır.

$$SD = {}^{R}/_{\sqrt{W}} \tag{2}$$

4 RİSK ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında, çalışılan füniküler inşaatındaki patlatmalı kazı nedeniyle mevcut meskenlerde oluşabilecek hasarlara yönelik risk analizi yapılmıştır. Analizde mümkün olan en uygun parametreler kullanılarak en olumlu durumda oluşabilecek sarsıntı etkilerinin kabul edilebilir olup olmadığı tahkik edilmiştir.

Şekil 1'de füniküler güzergahı boyunca yeryüzüne olan mesafeler, bir başka deyişle de risk mesafeleri gösterilmektedir. Buna göre, güzergahın kotlarının yüzeye olan en yakın mesafenin 4.67 m olduğu anlaşılmaktadır.

S-1 (Tek Hat) ve S-3 (İstasyon) olarak adlandırılan tünellerde yapılacak patlatmalardan kaynaklanacak titreşimlerin, tünel güzergâhları boyunca yerüstü yapılarına etkisini en aza indirmek için, söz konusu tünel kazılarında, yerüstü yapılarına yakınlık mesafelerine göre gecikme başına kullanılacak en yüksek patlayıcı madde miktarının belirlenmiştir (Çizelge 3). Bu kapsamda, söz konusu füniküler güzergahındaki hakim jeolojik formasyonlarla benzer özellik gösteren ve söz konusu çalışma alanına yakın bir bölgede yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen tahmin denklemi, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" hasar limiti göz önünde tutularak kullanılmıştır.

Çizelge 3. Gecikme başına kullanılabilecek patlayıcı madde miktarının tahmini

R (m)	**Kullanılan Yaklaşım**	**Çevresel Gürültü Yönetmeliği Eşik Hasar Limiti (mm/sn)**	**W (kg)**
4.67 (En Yakın Mesafe)	$PPV = 235{,}63 \times (R / W^{0,5})^{-1,03}$	19	**0.15**
10.9 (Patlatmaya İhtiyaç Duyulan En Yakın Mesafe)			**0.91**
15			1.7
18			**2.44**
20			3
25			4.7
30			6.78

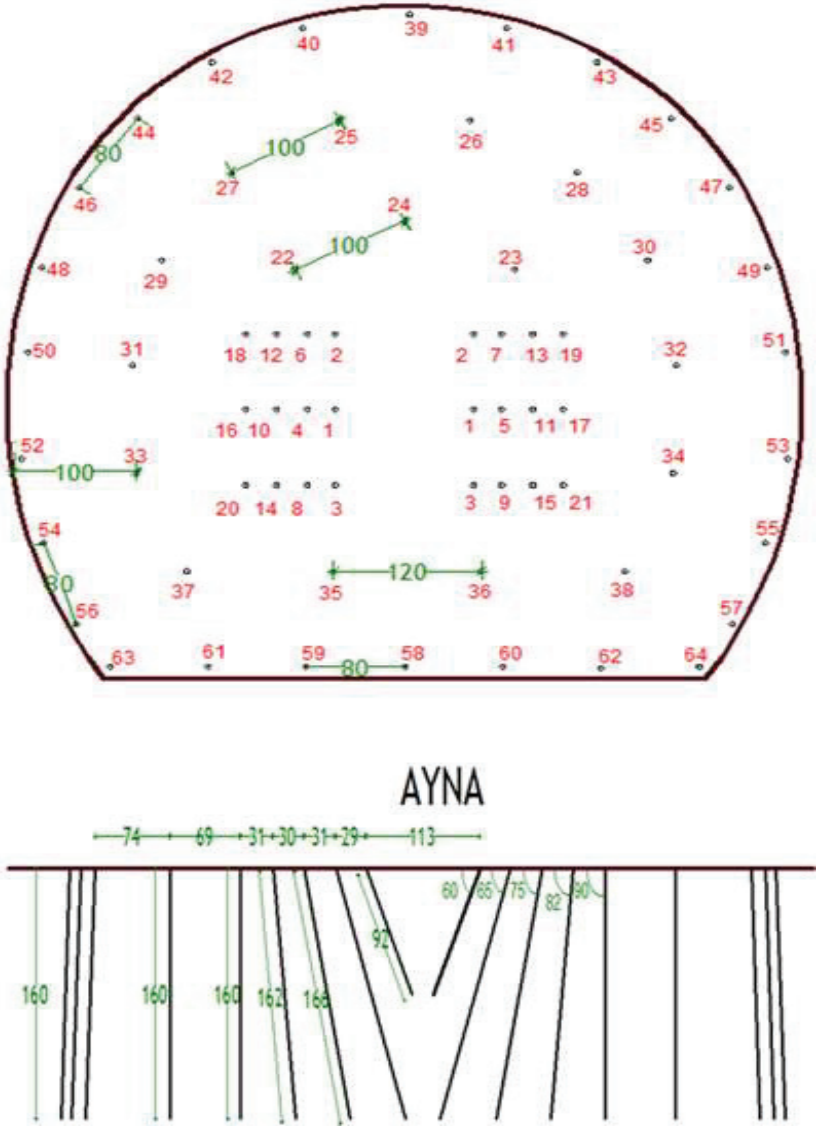
Proje bilgileri başlığı altında, tünel güzergahının yer yüzüne en yakın olduğu bölgenin Aşiyan portal girişinin olduğu nokta olduğu, bu bölgede de kaya birimlerinin de 10.9 m'den daha derinlerde gözlemlendiği ifade edilmiştir. Bu bilgiden hareketle, patlatmaya ihtiyaç duyulan en sığ derinliğin 10.9 m olduğu anlaşılmaktadır.

5 PATLATMA ÖN TASARIMLARI

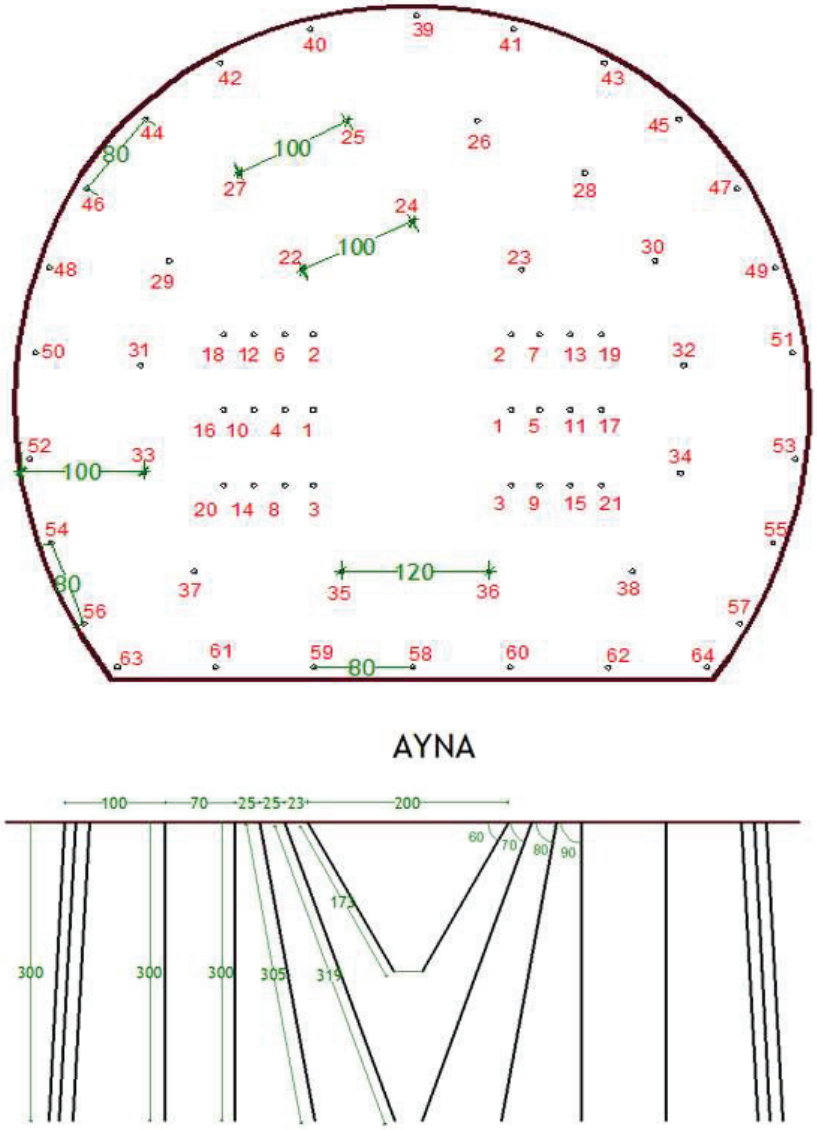
5.1 S-1 Kesiti İçin Patlatma Ön Tasarımları

S-1 kesiti, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu'na uygun olarak tek aşamada patlatmalı kazı yapılacak şekilde model önerilmiştir. Tasarımlarda V Orta Çekme tasarımları kullanılmış (Şekil 2 ve 3) ve kullanılan tüm delikler 42 mm çapındadır. Çizelge 4'de S-1 tünellerinde bir atımdaki patlayıcı madde tüketimleri ve bir gecikmede kullanılan maksimum şarj miktarları (W) sunulmuştur. Patlayıcı madde olarak kapsüle duyarlı patlayıcı (dinamit) ve ateşleme elemanı olarak da yeraltı patlatmaları için (genellikle) önerilen uzun gecikme (LP) sağlayan elektriksiz kapsül sisteminin kullanılması planlanmıştır.

S-1 kesitine sahip tünellerin yeryüzüne, bir başka deyişle de risk unsuruna olan mesafeleri 10.94 m ile 54.31 m olarak değişmektedir. Çevresel riski minimize etmek için bir kritik mesafe (18 m) belirlenmiş, kritik mesafeden daha yakın (Şekil 2) ve daha uzak (Şekil 3) mesafelerde yapılacak patlatmalar için 2 ayrı ön tasarım yapılmıştır.



Şekil 2. Yeryüzüne 18 m'den Daha Yakın Mesafelerde Bulunan S-1 Tünelleri V- Orta Çekme Delik Paterni, Gecikme Sırası, Kesit Görünüşleri (S-1(a) Tasarımı)



Şekil 3. Yeryüzüne 18 m'den Daha Uzak Mesafelerde Bulunan S-1 Tünelleri V- Orta Çekme Delik Paterni, Gecikme Sırası, Kesit Görünüşleri (S-1(b) Tasarımı)

Çizelge 4. S-1 Tünellerinde bir atımdaki patlayıcı madde tüketimi

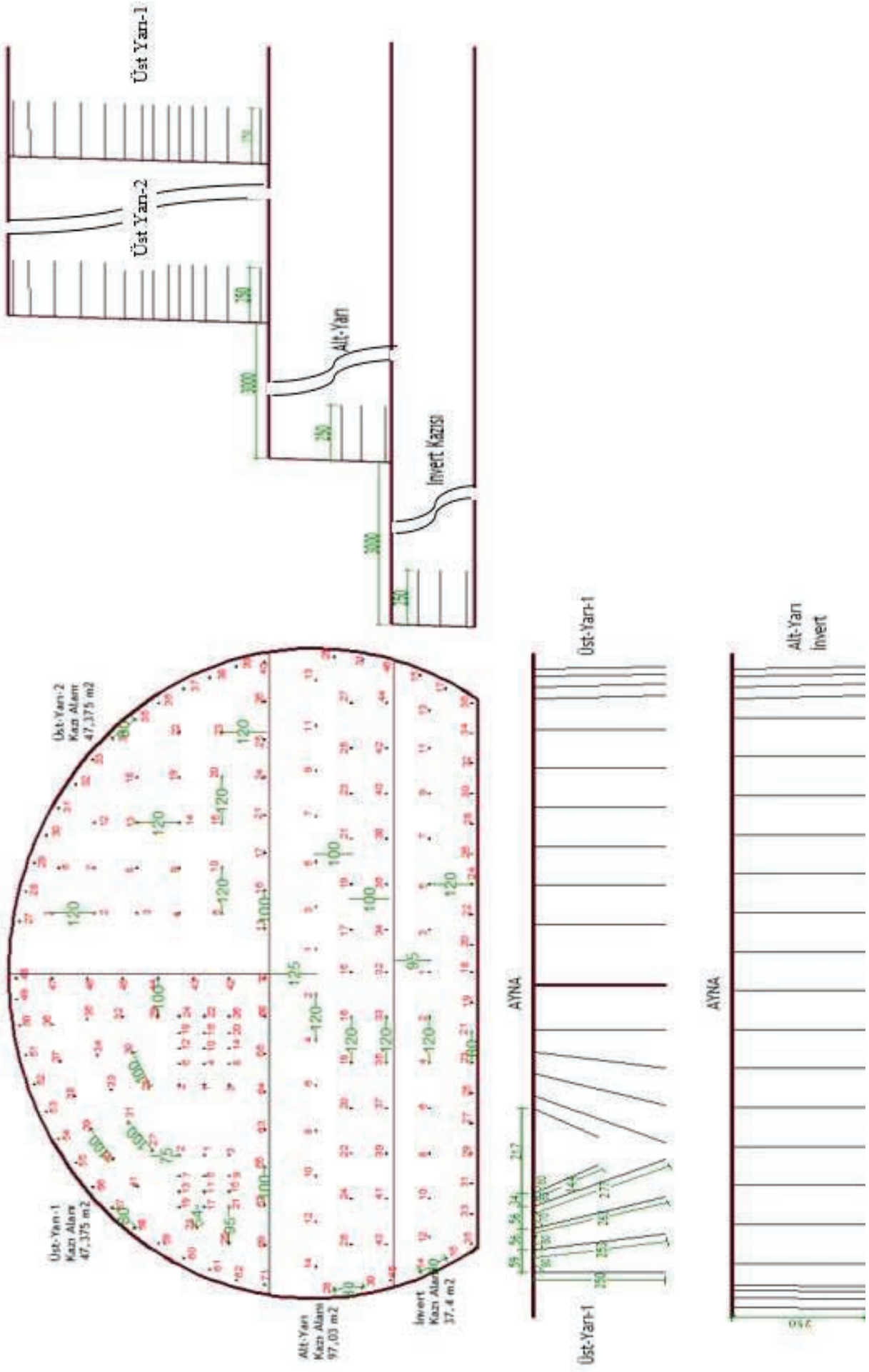
	Delik Tipi	Delik Sayısı	Delik Boyu (m)	Sıkılama (m)	Şarj Boyu (m)	Delik Şarj Miktarı (kg)	Toplam Şarj Miktarı (kg)
(S-1(a) Tasarımı) (R<18 m)	**Tarama**	23	1.6	0.6	1	0.77	17.76
	V Cut 1.Sıra	6	0.9	0.4	0.5	0.39	2.35
	V Cut 2.Sıra	6	1.7	0.6	1.1	0.77	4.62
	V Cut 3.Sıra	6	1.7	0.6	1.1	0.77	4.62
	Taban	7	1.6	0.6	1	0.77	5.40
	Çevre	19	1.6	0.6	1	0.80	15.20
	Toplam	**67**		**Bir Atımdaki Toplam Şarj Miktarı (kg)**			**49.94**
						Özgül Şarj Miktarı(kg/m^3)	**0.63**
(S-1(a) Tasarımı) (R>18 m)	**Tarama**	23	3	0.6	2.4	2.12	48.83
	V Cut 1.Sıra	6	1.7	0.5	1.2	0.97	5.82
	V Cut 2.Sıra	6	3.2	0.8	2.4	1.93	11.58
	V Cut 3.Sıra	6	3.2	0.8	2.4	1.93	11.58
	Taban	7	3	0.6	2.4	2.12	14.86
	Çevre	19	3	1.1	1.9	1.6	30.40
	Toplam	**67**		**Bir Atımdaki Toplam Şarj Miktarı (kg)**			**123.04**
						Özgül Şarj Miktarı(kg/m^3)	**1.56**

5.2 S-3 Kesiti İçin Patlatma Ön Tasarımı

S-3 (istasyon) tipi tüneller, sadece tünel güzergahının Aşiyan portal girişinin ve Hisarüstü portal girişinin olduğu noktalardadır. Aşiyan portal girişinin bulunduğu noktalar yapay dolgudan meydana geldiği için bu bölgenin mekanik kazı ile geçilmesi planlanmıştır. Dolayısıyla, S-3 tipi tüneller için patlatma ön tasarımı sadece Hisarüstü portal girişinin bulunduğu bölge göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu noktanın yeryüzündeki yapılara en yakın mesafesi ise 15 m'dir.

S-3 tünelinde tek aşamalı kazı yapılması halinde, tünel kesitinin büyük olması ve kaya birimlerinin zayıflığı nedeniyle yeraltı stabilizasyonunun zorlaşacağı düşüncesiyle, kazının Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu'na uygun olarak dört aşamada yapılması planlanmıştır. Buna göre S-3 tüneli üst sol yarı, üst sağ yarı, alt yarı ve invert kazısı olmak üzere dört bölgeye ayrılmış, her bir bölge için farklı patlatma ön tasarımları yapılmıştır (Şekil 4) (Özer ve diğ., 2018).

Sol üst yarı için önerilen tasarımda V Orta Çekme tasarımı, diğer bölgelerde ise paralel delik tasarımı kullanılmıştır. Kullanılan tüm delikler 42 mm çapındadır. Çevre deliklerinin şarjı diğer deliklerden farklı olarak yapılmıştır. Çizelge 5'de S-3 tünelinde bir atımdaki patlayıcı madde tüketimi ve bir gecikmede kullanılan maksimum şarj miktarı (W) sunulmuştur. Patlayıcı madde olarak kapsüle duyarlı patlayıcı (dinamit) ve ateşleme elemanı olarak da yeraltı patlatmaları için (genellikle) önerilen uzun gecikme (LP) sağlayan elektriksiz kapsül sisteminin kullanılması planlanmıştır.



Şekil 4. Hisarüstü Portal Girişinde Bulunan S-3 Tüneli V- Orta Çekme Delik Paterni, Gecikme Sırası, Kesit Görünüşleri

Çizelge 5. S-3 Tünelinde bir atımdaki patlayıcı madde tüketimi

	Delik Tipi	Delik Sayısı	Delik Boyu (m)	Sıkılama (m)	Şarj Boyu (m)	Delik Şarj Miktarı (kg)	Toplam Şarj Miktarı (kg)
Üst Sol Yarı	**Tarama**	34	2.5	0.6	1.9	**1.6 (W)**	52.5
	V Cut 1.Sıra	6	1.4	0.5	0.6	0.8	4.8
	V Cut 2.Sıra	6	2.8	0.9	1.9	1.6	9.6
	V Cut 3.Sıra	6	2.6	0.7	1.9	1.6	9.6
	V Cut 4.Sıra	6	2.6	0.6	1.9	1.6	9.6
	Çevre	16	2.5	1.1	1.4	1.2	19.2
	Toplam	**74**		**Bir Atımdaki Toplam Şarj Miktarı (kg)**			**104.1**
						Özgül Şarj Miktarı(kg/m^3)	**0.78**
Üst Sağ Yarı	**Tarama**	26	2.5	0.6	1.9	**1.6 (W)**	40.2
	Çevre	14	2.5	0.6	1.9	1.6	16.8
	Toplam	**40**		**Bir Atımdaki Toplam Şarj Miktarı (kg)**			57
						Özgül Şarj Miktarı(kg/m^3)	0.43
Alt Yarı	**Tarama**	40	2.5	0.6	1.9	**1.6 (W)**	61.8
	Çevre	6	2.5	0.6	1.9	1.6	7.2
	Toplam	**46**		**Bir Atımdaki Toplam Şarj Miktarı (kg)**			69
						Özgül Şarj Miktarı(kg/m^3)	0.41
İnvert	**Tarama**	13	2.5	0.6	1.9	**1.6 (W)**	20.1
	Taban	19	2.5	0.6	1.9	1.6	29.4
	Çevre	4	2.5	0.6	1.9	1.6	4.8
	Toplam	**36**		**Bir Atımdaki Toplam Şarj Miktarı (kg)**			**54.2**
						Özgül Şarj Miktarı(kg/m^3)	**0.52**

6 TEST ATIMLARI

6.1 Hisarüstü Bölgesi Test Atımları Ölçüm Sonuçları

Araştırma kapsamında patlatmalı kazı çalışmaları sırasında Hisarüstü Bölgesinde 11 test atımına ait kayaç içi titreşimlerin oluşturduğu parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kayıt cihazları ile tespit edilmiştir. İzlenen 11 test atımında kaydedilen 32 olayın maksimum parçacık hızı (PPV), frekans (f), hava şoku (SPL_{dB}), ölçekli mesafe (SD) değerlerini içeren bilgileri Çizelge 6'da verilmiştir (Özer ve diğ., 2019).

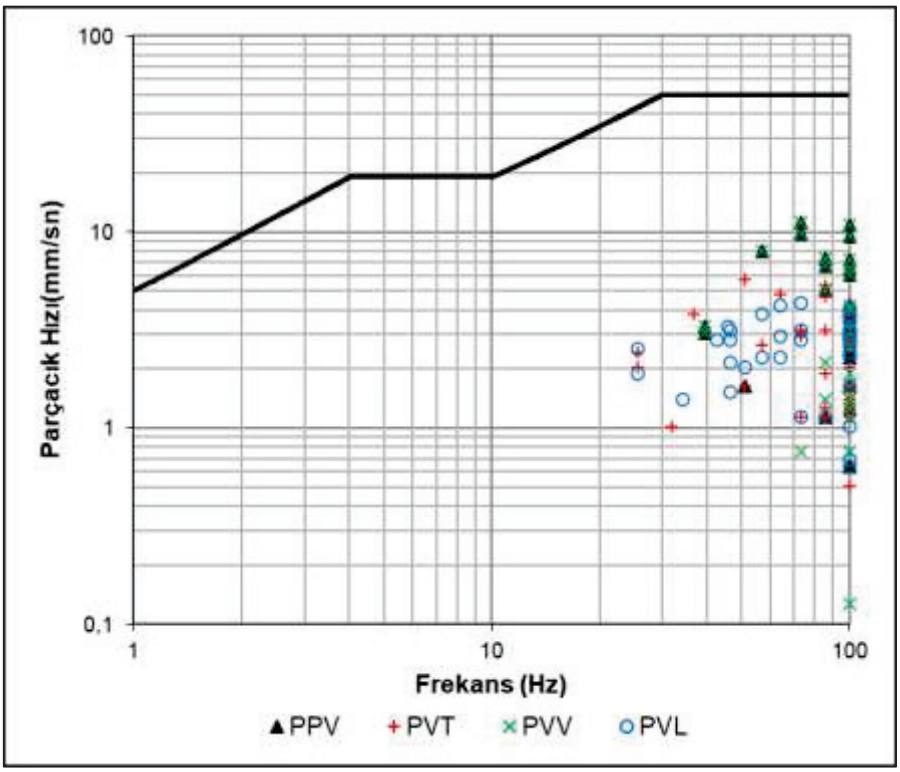
Çizelge 6. Hisarüstü Bölgesi test atımlarına ait bilgiler, titreşim ve hava şoku ölçümleri

Atım No	Titreşim Ölçer Modeli	PPV (mm/sn)	F (Hz)	SPL_{dB} (dB)	W (kg)	R (m)	SD	İlerleme Miktarı (m)
1	BE10705	0.635	100	116.9	0.872	74.03	77.49	1.5
	BE10708	2.921	100	97.5	0.872	34.06	35.65	
2	BE10705	1.270	100	129.5	0.872	75.46	78.99	1.5
	BE10708	6.477	100	112.0	0.872	34.29	35.89	
	BE10771	2.540	100	119.1	0.872	34.23	35.83	
3	BE10705	3.048	100	131.1	0.872	76.90	80.49	1.5
	BE10708	7.366	85.33	113.5	0.872	34.60	36.22	
	BE10771	3.175	100	120.3	0.872	34.37	35.98	
4	BE10705	3.175	100	127.5	1.31	76.90	70.28	2.5
	BE10708	11.180	73.14	110.2	1.31	34.60	31.62	
	BE10771	4.064	100	115.6	1.31	34.37	31.41	
5	BE10705	2.540	100	126.5	1.74	78.34	65.13	3
	BE10706	8.001	56.89	108.4	1.74	34.96	29.07	
	BE10771	3.302	39.38	114.4	1.74	34.59	28.76	
6	BE10705	1.143	85.33	128.0	1.74	78.34	65.13	3
	BE10706	6.731	85.33	112.0	1.74	34.96	29.07	
	BE10771	1.651	100	118.5	1.74	34.59	28.76	

Çizelge 6 (devamı). Hisarüstü Bölgesi test atımlarına ait bilgiler, titreşim ve hava şoku ölçümleri

Atım No	Titreşim Ölçer Modeli	PPV (mm/sn)	F (Hz)	SPL_{dB} (dB)	W (kg)	R (m)	SD	İlerleme Miktarı (m)
7	BE10705	2.286	100	125.4	1.74	82.67	68.73	3
	BE10706	7.239	100	111.2	1.74	36.42	30.28	
	BE10771	3.048	39.38	115.2	1.74	35.60	29.60	
8	BE10705	1.651	100	123.9	1.74	84.12	69.94	3
	BE10706	9.525	100	108.4	1.74	37.01	30.77	
	BE10771	5.080	85.33	110.6	1.74	36.06	29.98	
9	BE10705	3.683	100	126.1	1.74	87.03	72.36	3
	BE10706	10.920	100	110.9	1.74	38.36	31.89	
	BE10771	4.191	100	114.4	1.74	37.15	30.89	
10	BE10705	2.794	100	120.9	0.872	89.94	94.14	1.5
	BE10706	6.096	100	107.5	0.872	39.89	41.75	
	BE10771	1.651	51.20	109.2	0.872	38.45	40.25	
11	BE10705	4.064	100	126.3	1.28	94.82	87.33	2.5
	BE10706	9.779	73.14	110.6	1.28	42.80	39.42	
	BE10771	3.429	100	115.9	1.28	41.02	37.78	

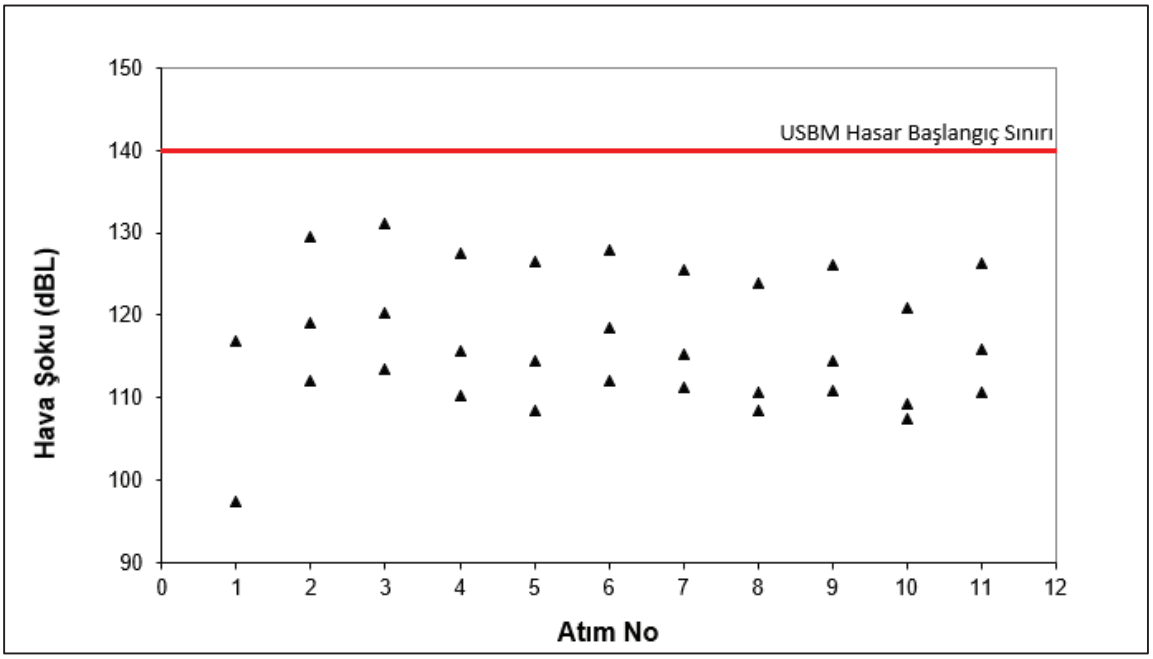
Hisarüstü Bölgesi test atımlarında kaydedilen parçacık hızı bileşenleri ve frekans değerlerinin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" nin 25/a maddesinde verilen limitler kullanılarak çizilen grafik üzerindeki ilişkileri Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Hisarüstü Bölgesi test atımlarında kaydedilen parçacık hızları ve frekansların T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yorumu (Maksimum Parçacık hızı: PPV, Enine Parçacık hızı: PVT, Düşey Parçacık hızı: PVV ve Boyuna Parçacık hızı: PVL)

Şekil 5'te görüldüğü üzere. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normuna göre, Hisarüstü Bölgesinde füniküler hattına ait tünelde yapılan test atımlarının, çevre yapılarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

Hisarüstü Bölgesi test atımlarında titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Şekil 6'da gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere, test atımlarında kaydedilen hava şoku değerleri, USBM'in sınır hava şoku değeri altında kaydedilmiştir. Dolayısı ile sahada yapılan patlatmaların hava şoku açısından çevre yerleşim birimlerinde ve binalarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Hisarüstü Bölgesi test atımlarında kaydedilen hava şoku değerlerinin USBM Normu'na göre toplu değerlendirmesi

İlk üç test atımında 1.5 m'lik ilerleme amaçlanmış ve her bir delikte 0.872 kg'lık patlayıcı kullanılmış; kaydedilen titreşim ve hava şoku değerlerinin hasar eşik değerlerinin oldukça altında olduğu görülmüştür. Bunun üzerine, ilerleme miktarı 2.5 m veya 3 m seviyesine çıkarılmış ve buna bağlı olarak her bir delikte kullanılan patlayıcı madde miktarı arttırılmıştır. Buna rağmen, kaydedilen titreşim ve hava şoku değerleri hasar eşik değerlerinin oldukça altında kalmaya devam etmiştir. Dolayısıyla, Hisarüstü Bölgesi'nde yapılacak patlatmalarda, önerilen patlatma ön tasarımlarının kullanılabileceği gibi, söz konusu ön tasarımların ilerleme miktarı 3 m olacak şekilde delik ve sıkılama boyları ile şarj miktarlarının revize edilebileceği sonucuna varılmıştır.

6.2 Aşiyan Bölgesi Test Atımları Ölçüm Sonuçları

Araştırma kapsamında patlatmalı kazı çalışmaları sırasında Aşiyan Bölgesinde 11 test atımına ait kayaç içi titreşimlerin oluşturduğu parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kayıt cihazları ile tespit edilmiştir. İzlenen 11 test atımında kaydedilen 32 olayın maksimum parçacık hızı (PPV), frekans (f), hava şoku (SPL_{dB}), ölçekli mesafe (SD) değerlerini içeren bilgileri Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Aşiyan Bölgesi test atımlarına ait bilgiler, titreşim ve hava şoku ölçümleri

Atım No	Titreşim Ölçer Modeli	PPV (mm/sn)	F (Hz)	SPL_{dB} (dB)	W (kg)	R (m)	SD	İlerleme Miktarı (m)
1	BE10704	31.62	100	124.7	0.654	16.59	19.11	1.5
	BE10708	26.29	64	123.2	0.654	21.84	25.16	
	BE10705	26.03	100	127.5	0.654	20.73	23.88	
	BE10706	6.858	100	120.7	0.654	30.91	35.61	
	BE10704	31.62	100	124.7	0.654	16.59	19.11	
2	BE10704	20.70	100	121.4	0.436	16.50	21.76	1.5
	BE10708	13.33	100	122.2	0.436	23.01	30.35	
	BE10705	23.88	100	127.3	0.436	21.01	27.71	
	BE10706	3.048	100	122.3	0.436	29.83	39.34	
	BE10771	6.096	100	121.6	0.436	39.60	52.22	
3	BE10705	26.03	100	126.0	0.436	21.38	28.20	1.5
	BE10771	6.096	100	124.9	0.436	38.38	50.61	
4	BE10708	12.32	100	125.5	0.436	25.46	33.58	1.5
	BE10705	18.16	100	126.0	0.436	21.86	28.83	
	BE10771	7.493	100	124.2	0.436	37.18	49.03	
5	BE10705	15.24	100	124.9	0.436	22.42	29.57	1.5
	BE10706	8.001	100	124.9	0.436	26.72	35.24	
	BE10771	3.81	100	123.4	0.436	36.01	47.49	
6	BE10705	10.67	100	127.0	0.654	23.07	26.58	1.5
	BE10706	4.953	100	127.1	0.654	28.01	32.27	
	BE10771	3.048	100	123.8	0.654	34.86	40.16	
7	BE10705	12.19	100	123.5	0.436	23.80	31.39	1.5
	BE10706	6.985	100	124.6	0.436	29.32	38.67	
	BE10771	6.477	100	121.7	0.436	33.74	44.50	
8	BE10705	12.57	100	123.9	0.436	23.80	31.39	1.5
	BE10706	6.35	100	123.7	0.436	29.32	38.67	
	BE10771	4.191	100	119.8	0.436	33.74	44.50	
9	BE10705	16.13	100	122.1	0.436	24.60	32.44	1.5
	BE10706	9.652	85.33	112.4	0.436	30.65	40.42	
	BE10771	7.747	100	121.5	0.436	32.65	43.06	

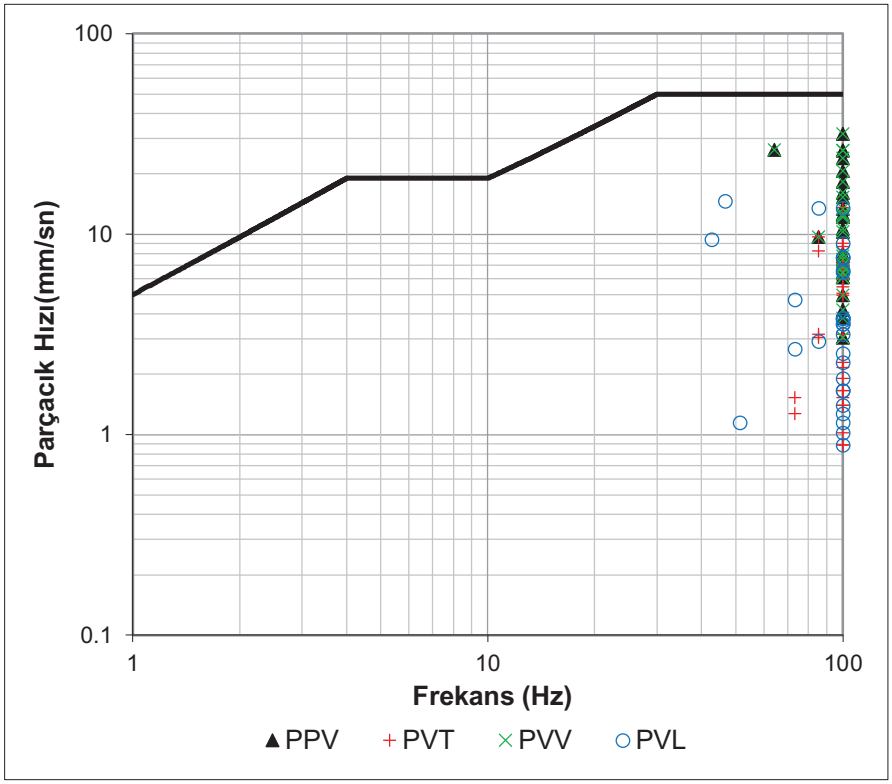
Aşiyan Bölgesi test atımlarında kaydedilen parçacık hızı bileşenleri ve frekans değerlerinin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" nin 25/a maddesinde verilen limitler kullanılarak çizilen grafik üzerindeki ilişkileri Şekil 7'de sunulmuştur.

Şekil 7'de görüleceği üzere. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normuna göre, Aşiyan Bölgesinde füniküler hattına ait tünelde yapılan test atımlarının, çevre yapılarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

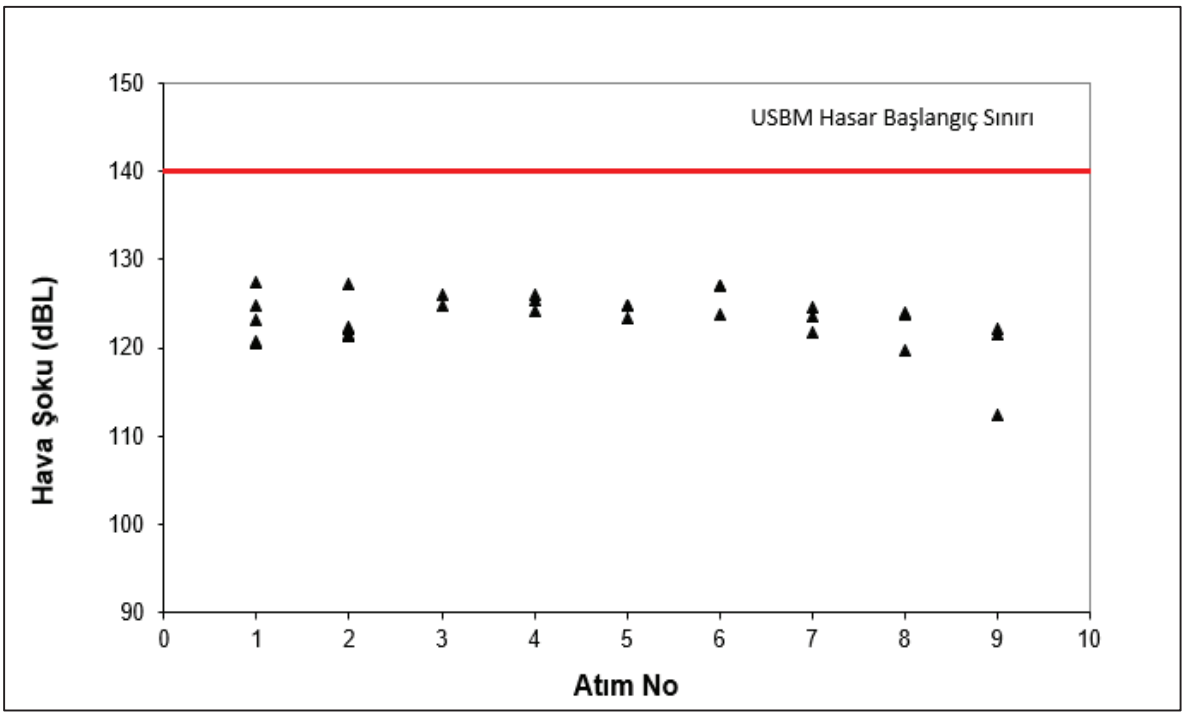
Aşiyan Bölgesi test atımlarında titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Şekil 8'de gösterilmiştir.

Şekil 8'de görüleceği üzere, test atımlarında kaydedilen hava şoku değerleri, USBM'in sınır hava şoku değeri altında kaydedilmiştir. Dolayısı ile sahada yapılan patlatmaların hava şoku açısından çevre yerleşim birimlerinde ve binalarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

İlk test atımında 1.5 m'lik ilerleme amaçlanmış ve her bir delikte 0.654 kg'lık patlayıcı kullanılmış; kaydedilen titreşim değerlerinin yüksek çıktığı, ancak frekanslarının da yüksek olması nedeniyle hasar eşik değerinin altında kaldığı görülmüştür. Bunun üzerine, ilerleme



Şekil 7. Aşiyan Bölgesi test atımlarında kaydedilen parçacık hızları ve frekansların T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yorumu



Şekil 8. Aşiyan Bölgesi test atımlarında kaydedilen hava şoku değerlerinin USBM Normu'na göre toplu değerlendirmesi

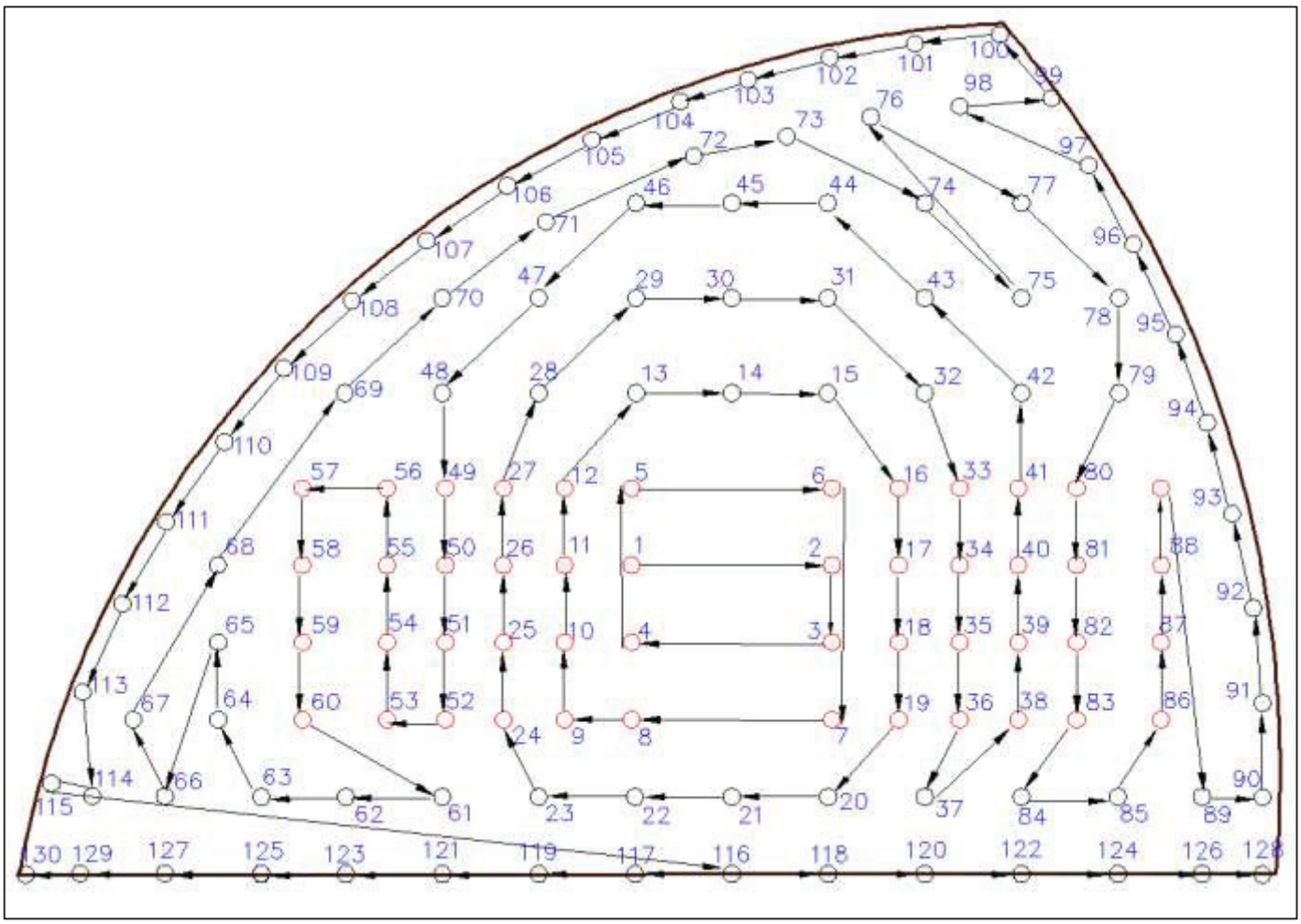
miktarı sabit bırakılarak, her bir delikte kullanılan patlayıcı madde miktarı azaltılmıştır. Buna bağlı olarak ölçülen maksimum parçacık hızı değerlerinde %30-40 oranında azalma meydana gelmiştir. Dolayısıyla, Aşiyan Bölgesi'nde yapılacak patlatmalarda, önerilen S-1(a) Tasarımı'nın tercih edilmesi gerektiği, söz konusu tünelin orta bölümlerine yaklaşılması ile birlikte artan derinliğe bağlı olarak ilerleme miktarı ve her bir delikte kullanılan patlayıcı madde miktarının arttırılabileceği anlaşılmıştır.

7 PATLATMA SÜRESİNİN ÖNEMİ

Projenin erken aşamalarında, patlatma ön tasarımlarında da planlandığı gibi uzun gecikme sağlayan elektriksiz kapsüller kullanılmıştır. Ancak, kaydedilen titreşim ve hava şoku değerlerinin hasar limit değerlerinin altında kalmasına rağmen, atım süresinin görece uzun olması (~8 saniye) sebebiyle insanların patlatmaları algılama seviyeleri yükselmiştir. Bunun sonuncunda da bir takım tepkiler ile karşılaşılmıştır.

Atım süresini kısaltmak için deliklerin belirli gruplar halinde patlatılması, gecikme başına düşen maksimum şarj miktarını birkaç katına çıkaracağından ötürü bu alternatifin uygulanabilmesi söz konusu değildir. Projenin hedeflenen tarihte tamamlanabilmesi de her bir patlatmada yeterli parçalanma seviyesine ulaşmak ile mümkündür. Bu da özgül şarjın yeterli büyüklükte olmasına bağlıdır. Dolayısıyla, bir diğer çözüm alternatifi olan delik sayısının azaltılması, bir delikte kullanılması gerekilen patlayıcı madde miktarı artması gerektiğinden dolayı elenmiştir.

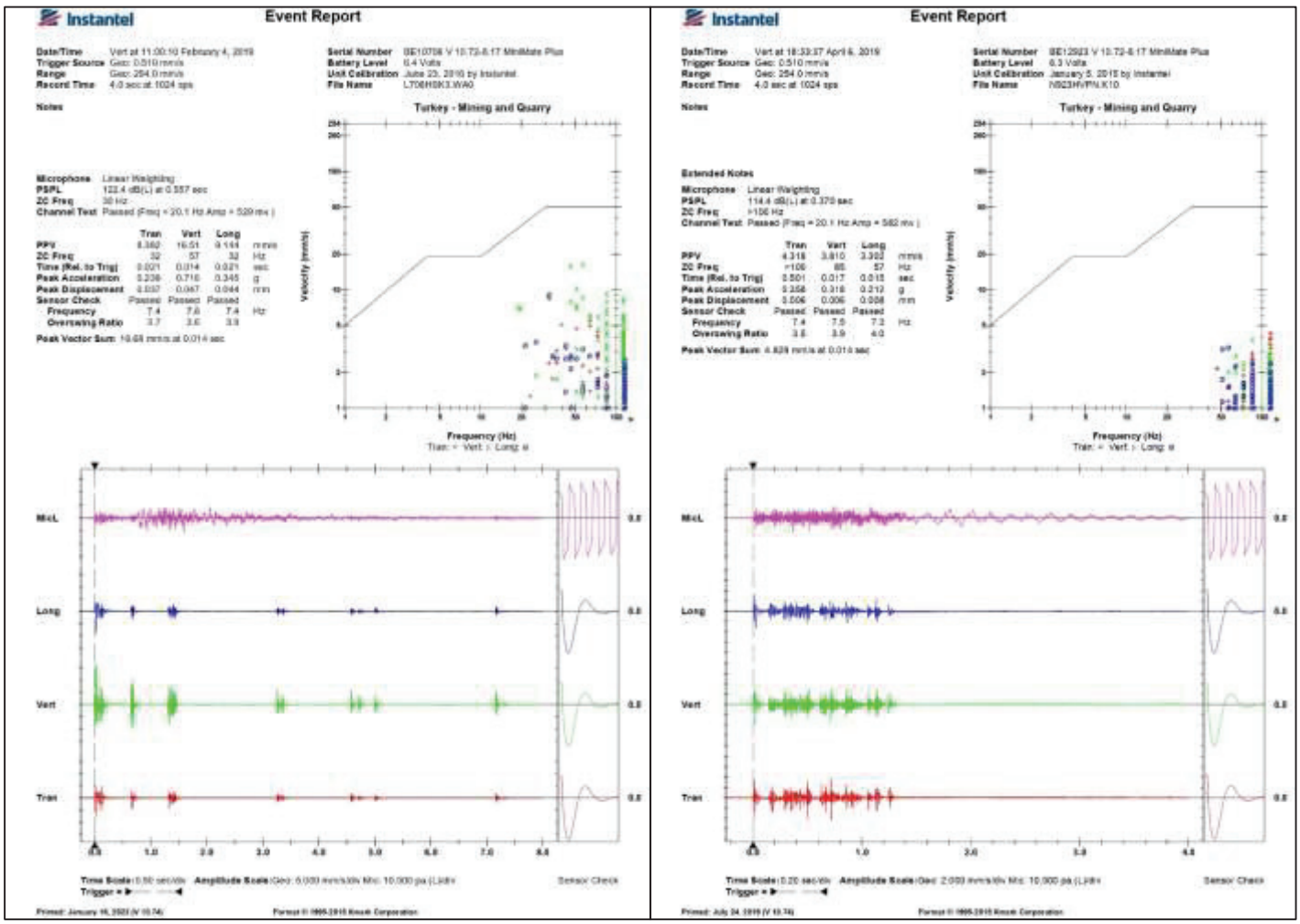
Çözüm arayışları sonucunda, yeraltı patlatmaları için (genellikle) önerilen uzun gecikme sağlayan elektriksiz kapsül serileri yerine, delik içinde tek seriden (numara) oluşan uzun gecikmeli kapsül ile genellikle yerüstü patlatmaları için önerilen 17 ms, 25 ms vb. kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsülleri birlikte kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. S-3 Tüneli sol üst yarı için delik içinde tek seriden oluşan uzun gecikmeli kapsül ile kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsüllerinin birlikte kullanıldığı örnek bir patlatma tasarımı

Delik içinde tek seriden oluşan uzun gecikmeli kapsül ile kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsüllerinin birlikte kullanıldığı atımlarda atım süresinin oldukça düştüğü (~2 saniye), parçalanma performansının değişmediği ve istenilen ilerlemenin sağlandığı görülmüştür. Bu nedenle, bundan sonraki atımlarda delik içinde tek seriden oluşan uzun gecikmeli kapsül ile kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsüllerinin birlikte kullanılmaya devam edilmiştir.

Şekil 10(a)'da patlatma ön tasarımlarında planlanan ve uzun gecikme sağlayan elektriksiz kapsüller kullanıldığı bir patlatmada kaydedilen bir olayın raporu, Şekil 10(b)'de ise delik içinde tek seriden oluşan uzun gecikmeli kapsül ile kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsüllerinin birlikte kullanıldığı bir patlatmada kaydedilen bir olayın raporu sunulmuştur.



(a) (b)

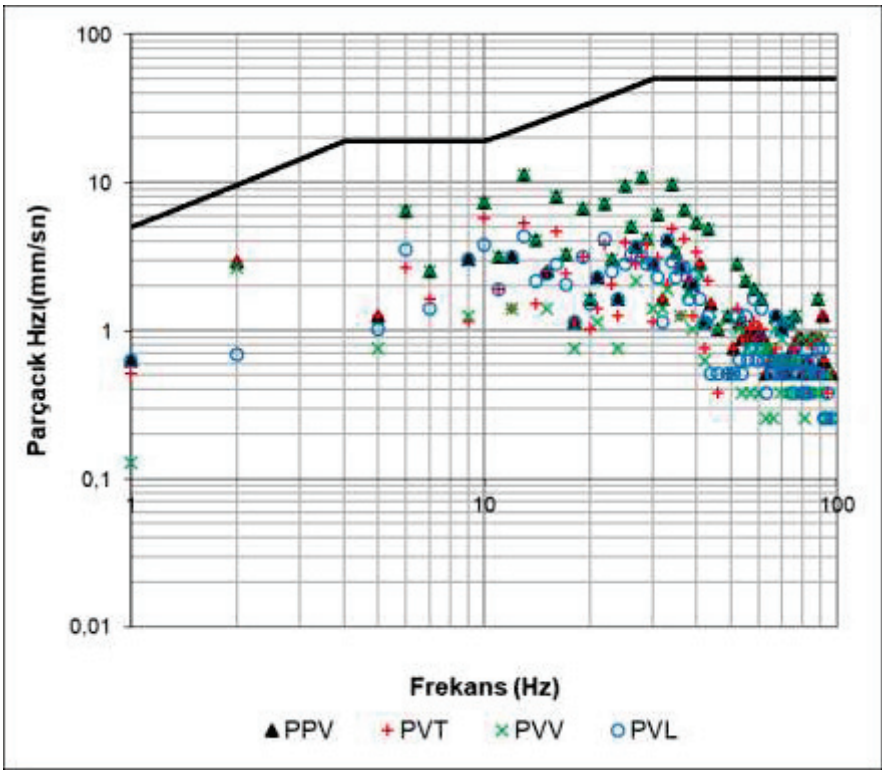
Şekil 10. (a) Uzun gecikme sağlayan elektriksiz kapsüllerin kullanıldığı (b) delik içinde tek seriden oluşan uzun gecikmeli kapsül ile kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsüllerinin birlikte kullanıldığı bir patlatmada kaydedilen bir olayın raporu

8 PROJEDE ÖLÇÜLEN DEĞERLERİN HASAR RİSKİ DEĞERLENDİRİLMESİ

8.1 Hisarüstü Bölgesi Atımları Ölçüm Sonuçları

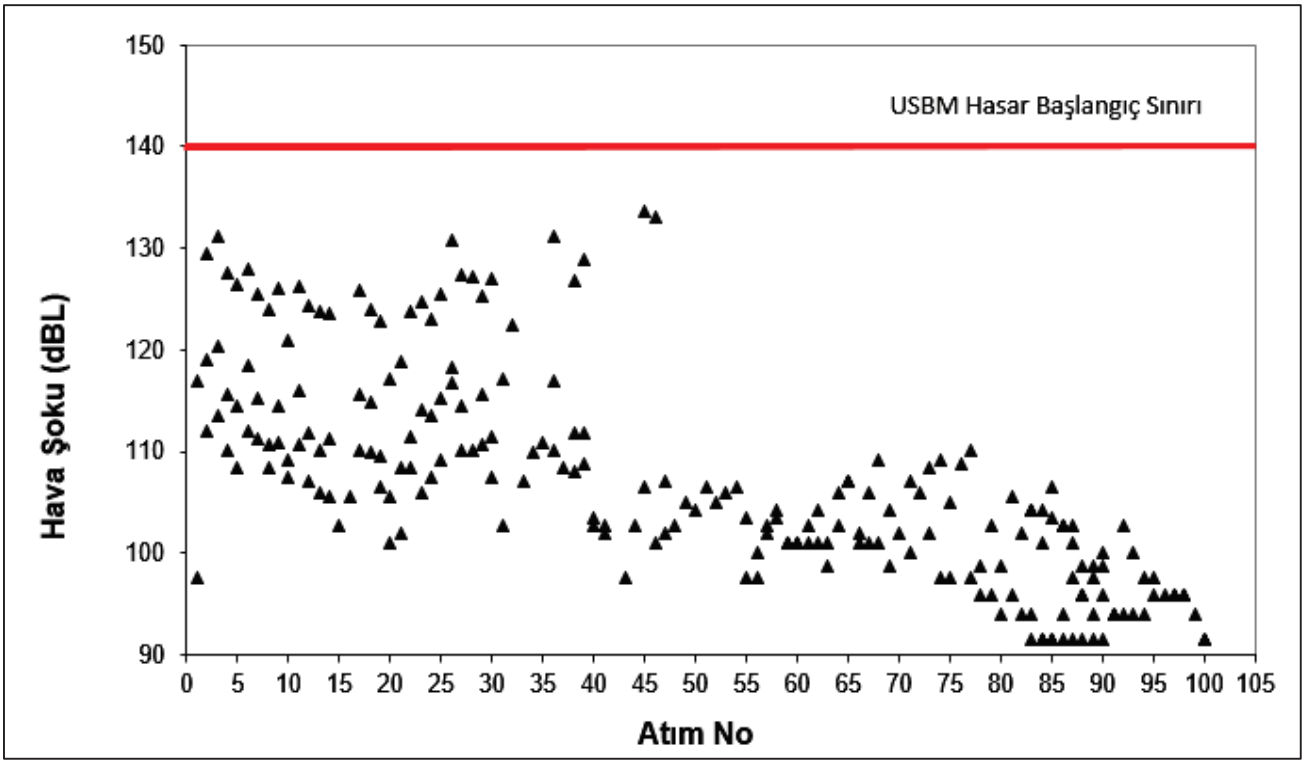
Çalışma kapsamında patlatmalı kazı çalışmaları sırasında Hisarüstü Bölgesinde toplam 100 test atım gerçekleştirilmiş, kayaç içi titreşimlerin oluşturduğu parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kayıt cihazları ile tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen 100 atımda kaydedilen 223 olayın parçacık hızı bileşenleri ve frekans değerlerinin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" nin 25/a maddesinde verilen limitler kullanılarak çizilen grafik üzerindeki ilişkileri Şekil 11'de sunulmuştur.

Şekil 11'de görüldüğü üzere. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normuna göre, Hisarüstü Bölgesinde füniküler hattına ait tünelde yapılan atımların, çevre yapılarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 11. Hisarüstü Bölgesi atımlarında kaydedilen parçacık hızları ve frekansların T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yorumu.

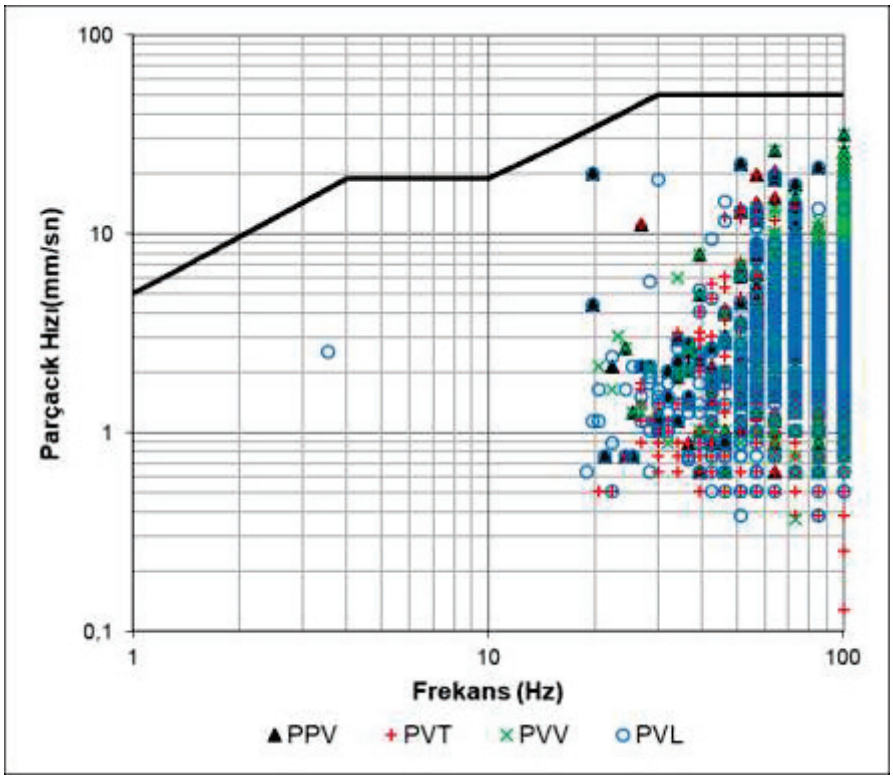
Hisarüstü Bölgesi atımlarında titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Şekil 12'de gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere, test atımlarında kaydedilen hava şoku değerleri, USBM'in sınır hava şoku değeri altında kaydedilmiştir. Dolayısı ile sahada yapılan patlatmaların hava şoku açısından çevre yerleşim birimlerinde ve binalarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 12. Hisarüstü Bölgesi atımlarında kaydedilen hava şoku değerlerinin USBM Normu'na göre toplu değerlendirmesi

8.2 Aşiyan Bölgesi Atımları Ölçüm Sonuçları

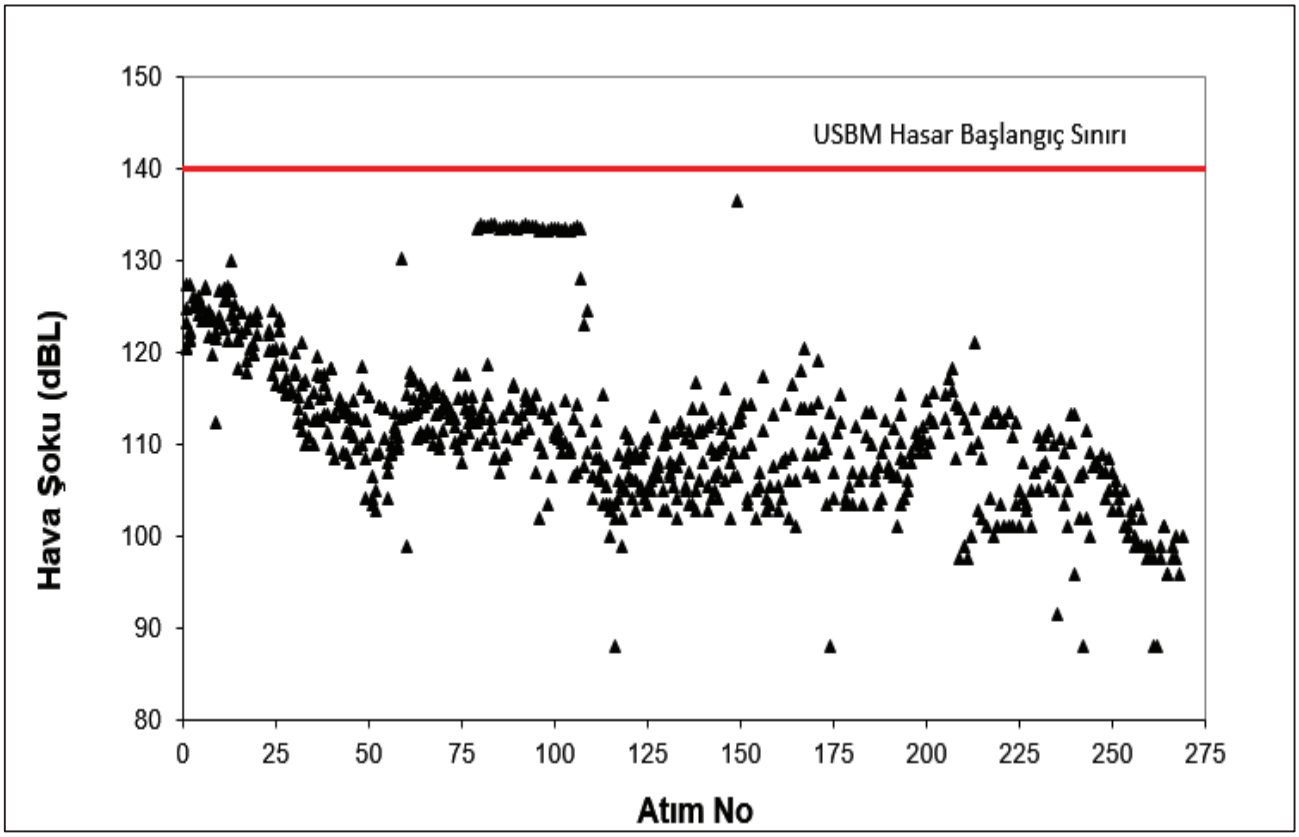
Çalışma kapsamında patlatmalı kazı çalışmaları sırasında Aşiyan Bölgesinde toplam 269 atım gerçekleştirilmiş, kayaç içi titreşimlerin oluşturduğu parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kayıt cihazları ile tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen 269 atımda kaydedilen 672 olayın parçacık hızı bileşenleri ve frekans değerlerinin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" nin 25/a maddesinde verilen limitler kullanılarak çizilen grafik üzerindeki ilişkileri Şekil 13'de sunulmuştur.



Şekil 13. Aşiyan Bölgesi atımlarında kaydedilen parçacık hızları ve frekansların T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yorumu

Şekil 13'te görüldüğü üzere. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normuna göre, Aşiyan Bölgesinde füniküler hattına ait tünelde yapılan atımların, çevre yapılarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

Aşiyan Bölgesi atımlarında titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Şekil 14'te gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere, test atımlarında kaydedilen hava şoku değerleri, USBM'in sınır hava şoku değeri altında kaydedilmiştir. Dolayısı ile sahada yapılan patlatmaların hava şoku açısından çevre yerleşim birimlerinde ve binalarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 14. Aşiyan Bölgesi atımlarında kaydedilen hava şoku değerlerinin USBM Normu'na göre toplu değerlendirmesi

9 SONUÇLAR

Bu çalışmada, Boğaziçi Üniversitesi/Hisarüstü-Aşiyan Füniküler hattı inşaatı sırasında yapılan patlatmalı kazı çalışmalarının çevresel sonuçları değerlendirilmiştir. Tünel güzergâhının İstanbul'un en zengin semtlerinden birinden geçmesi, tarihi ve turistik açıdan oldukça önemli olan Rumeli Hisarı'na komşu, ve semtteki sosyal yaşamın günün her saatinde canlı olması gibi nedenlerden ötürü, tünel inşaatı sırasında meydana gelecek patlatma kaynaklı çevresel etkilerin kontrol altında tutulması gerekmiştir. Bu gereklilik doğrultusunda atılan adımlar ve gerçekleştirilen çalışmalar önceki bölümlerde açıklanmıştır. Projenin tamamlanması ile beraber çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

Çalışma kapsamında, Aşiyan Bölgesinde 269 adet atıma ait 672 olay ve Hisarüstü Bölgesinde 100 adet atıma ait 223 olay olmak üzere toplam 369 atıma ait 941 adet olay cihazlar tarafından ölçülmüştür. Kayıt alınan atımların maksimum parçacık hızları, hava şokları, frekans değerleri ile patlayıcı madde miktarlarını ve ölçekli mesafe değerlerini içeren bilgiler, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği Normu'na değerlendirilmiş, proje süresince gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarının güzergâh üzerindeki ve çevresindeki yapılarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmıştır.

Proje süresince kaydedilen titreşim ve hava şoku değerlerinin, yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin altında kalmasına rağmen atım süresinin görece uzunluğu nedeniyle çevre sakinlerinin patlatmaya olan algısı artmış ve bu durum bir takım rahatsızlıklara yol açmıştır. Çözümlenmesi gerekilen önemli bir sorun olan bu durum, delik içinde tek seriden oluşan uzun gecikmeli kapsül ile kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsüllerinin birlikte kullanılması ile çözülmüştür. Elde edilen bu bulgudan yola çıkarak, özellikle çevresinde ve üzerinde birçok risk unsuru barından yeraltı kazılarında delik içinde tek seriden oluşan uzun gecikmeli kapsül ile kısa gecikme aralığı içeren yüzey kapsüllerinin birlikte kullanılmasının olumlu etkileri olacağı saptanmıştır.

Çevresinde pek çok risk unsurunu barındıran bu tünel inşaatı projesi kapsamında gerçekleştirilen patlatmalı kazıların meydana getirdiği çevresel etkilerin, yönetmelikte belirtilen limit değerlerin altında kalmış olması, araştırmada izlenen yöntemin başarısının ve kontrol mekanizmasının dinamik şekilde çalışmasının bir sonucudur.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışma sırasında her türlü yardımda bulunan İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na, T.C: İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ve Ankara İnşaat Tic. ve San. Ltd. Şti. yetkililerine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Karagöz, Ö, 2008. Deprem Bilgilendirme Notları, syf 100.

Özer, Ü., Karadoğan, A, Sertabipoğlu, Z, Özyurt, MC, 2018. Rumeli Hisarüstü- Aşiyan Füniküler Hattı İnşaat, Elektromekanik ve Araç Alım İşi Risk Analizine Dayalı Patlatma Tasarımı ve Projesi, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi.

Özer, Ü, Karadoğan A, Sertabipoğlu, Z, Özyurt M C, Şahinoğlu ÜK, 2019. Rumeli Hisarüstü- Aşiyan Füniküler Hattı İnşaat, Elektromekanik ve Araç Alım İşi Kapsamında Patlatma Kaynaklı Titreşim ve Hava Şoku Ölçümü ve Değerlendirilmesi, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi.

Şenol G, Aydoğan S, 2016. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Daire Başkanlığı Raylı Sistem Projeler Müdürlüğü, İstanbul İli-Sarıyer İlçesi Rumeli Hisar Üstü-Aşiyan Füniküler Hattı Etüt Proje İşi (Km: 0+000.000 – 0+815.000), Sondaj Etüt Raporu, Emay Uluslararası Mühendislik ve Müsavirlik A.Ş.

Sapça-2 Tüneli Patlatma Tasarımı ve Yerleşim Alanında Titreşim ve Gürültü Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Sapça-2 Tunnel Blast Design and Evaluation of Vibration and Noise Monitoring at Residential Area

H. A. Bilgin
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü Emekli Öğretim Üyesi, Ankara

ÖZET: Bu bildiride, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından, jeolojik-jeoteknik etüdü ve projesi yaptırılmış bulunan Zonguldak-Ankara karayolu güzergahında Sapça-2 tünelinin açılması için yürütülen "patlatma kaynaklı yapısal hasar riskinin araştırılması, titreşim değerlendirmesi ile jeoteknik verilere dayalı tünel patlatma tasarımı ve tünel açılırken yapılmış titreşim ve hava şoku ölçüm sonuçlarının Türkiye Yönetmeliğine uygunluğunu araştırma" çalışması açıklanmış, tartışılmış, ulaşılan sonuçlar sunulmuştur. Sapça-2 tüneli, mevcut Sapça-1 karayolu tüneli yanında, Sapça-1 tüneline 17 m ile 23,7 m yatay mesafede ve Elvan Pazarcık Beldesi Celepçioğlu Mahallesi yerleşim alanındaki binaların 33 m ile 69,9 m altında açılmıştır. Bu açıdan değerlendirildiğinde yapılaşma alanında yeraltı kazısı türünde ilginç bir projedir.

Tünelde yapılan ilk üç ayna patlatması esnasında yerleşim yerinde kaydedilen yer titreşim hızları, sismik dalga frekansları ile hava şoku ve gürültü değerleri verilmiş ve tartışılmıştır. Ülkemiz Yönetmeliği'nde izin verilen titreşim hızlarının aşılmadığı, yerleşim yerine ulaşan hava şoku ve gürültü seviyelerinin ABD Federal Tüzük'üne uygun olduğu anlaşılmıştır. Olumsuz çevresel etki yaratılmadan açılan tünel halen servise alınmış bulunmaktadır.

ABSTRACT: In this paper, "investigation of structural damage potential of tunnel blasts, tunnel blast design based on vibration evaluation and geotechnical information and the results of vibration and air-blast monitoring conducted during the construction of the Sapça-2 tunnel located along Zonguldak-Ankara highway are explained, discussed and concluded. The Sapça-2 tunnel was opened at 17 m to 23.7 m horizontal distances to the existing Sapça-1 tunnel and 33 m to 69.9 m under the residential buildings and their annexes at Celepçioğlu locality of Elvan Pazarcık region. In this respect, it is an interesting underground excavation project carried out under a residential area.

Ground vibration velocities, seismic wave frequencies and air-blast and noise amplitudes recorded during the first three full face blasts are presented and discussed. It is understood that the peak particle velocity levels permitted in the Turkish regulation and the air-blast and noise levels permitted in US Federal Regulation are not violated. The tunnel driven without causing any adverse environmental impacts are in service at present.

1 GİRİŞ

1.1 Tünel Yeri ve Özellikleri

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlatılmış "Sapça Tüneli Tünel Kesin Proje Jeolojik ve Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu"nda (MEGA Ltd. Şti., 2011) belirtildiği üzere Devrek'ten Zonguldak'a gidiş itibarı ile yapılacak olan "Sapça Sol Tünel" (Sapça-2), o tarihte gidiş-geliş çift yönlü trafiğe açık olan mevcut tünelin (Sapça-1)

solunda (Güneyinde) yer almaktadır. Projesine göre Km 19+961,24 (Giriş) ile Km 20+532,57 (Çıkış) arasında toplam 571,33 m uzunluğa sahip iki şeritli bir karayolu tünelidir. Sapça-2 tüneli inşaatı halen bitmiş ve tünel servise girmiş olup, Devrek-Zonguldak karayolu her biri çift şeritli bölünmüş yol olarak hizmet vermektedir.

Tünel kesiti tabanda 11,40 m genişlikte, tabandan 2,55 m yükseklikte 12,00 m genişlikte, tabandan toplam kazı yüksekliği 8,55 m olup, atnalına yakın şekildedir. Projesinde tünelin "Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu" (NATM) ile açılması öngörülmüştür. "Sapça Sol Tünel" olarak anılan Sapça-2 tüneli, Sapça-1 tüneline 17 m ile 23,7 m arasında değişen yatay mesafede ve Elvan Pazarcık Beldesi Celepçioğlu Mahallesi yerleşim alanındaki binaların 33 m ile 69,9 m altında açılmıştır. Bu açıdan değerlendirildiğinde yapılaşma alanında yeraltı kazısı türünde ilginç bir proje olup, yapılacak patlatmalar sırasında binalara hasar, binalarda oturan kişilere rahatsızlık verilmemesi gerekmektedir.

1.2 Jeolojik ve Jeoteknik Özellikler

"Sapça Tüneli Tünel Kesin Proje Jeolojik ve Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu"nda belirtildiği üzere tünel güzergahında toplam uzunluğu 435,20 m olan 6 adet sondaj yapılmış olup, tünelin Km 19+961 giriş ile Km 20+260 arasındaki sondajlarda yeraltı suyu tespit edilmiştir. Tünelin geçeceği zemin Kilimli Formasyonu'nun Sapça Üyesi (Kks), zemin grubu "Giriş" ve "Çıkışta" "B1 Gevrek", tünel güzergahında "A2 sonradan az sökülen" olarak tanımlanmıştır. Ayrıca tarafımızca 10 ve 11 Ocak 2013 tarihlerinde doğrulama amaçlı, ancak yüzeyde bulunan kar örtüsü sebebiyle sınırlı jeolojik inceleme yapılmıştır.

1.2.1 Jeolojik Bilgi

Sapça tünel güzergahında birimdeki fosillere göre Alt Kretase yaşlı Kilimli Formasyonunun Sapça Üyesi yüzeylenmektedir (MEGA Ltd. Şti., 2011). Formasyona ait birimler kumtaşı, silttaşı ve kiltaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Bol miktarda kumlu kireçtaşı ve kireçtaşı ara seviyeleri bulunmaktadır. Kumtaşı taneleri kuvars, glokoni, metamorfik kaya parçası ve magmatik kaya parçalarından oluşmaktadır. Genellikle gri ve yeşil renkli olan kumtaşlarında katmanlaşma ince-orta tabakalıdır.

1.2.2 Mühendislik Jeolojisi

Yüzeyde özellikle silttaşı ve kiltaşlarının ayrışması sonucu oluşmuş, kalınlığı yer yer 1 m'ye varan bitkisel toprak gözlenmektedir. Kumtaşlarında yapılan ölçümlere göre tabakalanma eğim/eğim yönü $28^0/231^0$'dir. Hakim eklemlerin (çatlakların) eğim/eğim yönleri ise $82^0/240^0$ ve $70^0/150^0$'dir. Buna göre Sapça-2 tünelinde biri tabakalanma, ikisi eklem olmak üzere üç belirgin ve hakim süreksizlik bulunmaktadır. Bu hakim süreksizlik yönelimleri tarafımızca da incelenmiş ve doğrulanmıştır. Ne var ki, tabakalanma olarak adlandırılan hakim süreksizliğin eğim derecesinin yer yer 11^0'ye düşmesi, çoğunlukla 17^0-23^0 aralığında bulunması sebebiyle doğrultusuna bakılmaksızın tabakaların tünel tavanına yaklaşık paralel konumda olduğu, bu sebeple tünelin açılması sırasında kil dolgulu tabakalanma düzlemlerinin kavlak düşmesi (Kapak atma) şeklinde yenilmeye neden olabileceği değerlendirilmiştir.

Öte yandan tünel üzeri hali arazide ve çıkışına yakın kesimde yüzeyde yaptığım incelemede tabakalar arasında kalınlığı 20-70 mm arasında değişen kil/toprak dolguların bulunduğu görülmüştür. Eklem aralıklarının 20-60 cm arasında değiştiği, eklem yüzeylerinin pürüzlü oldukları, süreksizlik açıklıklarının 20-60 mm olduğu, temiz veya kalın kil dolgulu oldukları gözlenmiştir. Sapça Tüneli giriş kesiminde portal kazı şevinde de bu üç tür süreksizlik sistemi gözlenmiştir. Tünel giriş ve çıkışındaki şevlerde görülen tabakalanma ve eklem türü süreksizliklerin sürekliliklerinin (5m-8m) de oldukça fazla olduğu gözlenmiştir.

1.2.3 Jeoteknik Bilgi

Toplam 6 sondajdan elde edilen RQD değerleri %90 ile %100 arasında değişmektedir. Tek eksenli basınç dayanım değerleri sondaj karotları üzerinde yaptırılan testler sonucu portallar için 27-68 MPa, ortalama 54 MPa, güzergah için 25-83 MPa, ortalama 57 MPa saptanmıştır. Süreksizlik yönelimi açısından değerlendirildiğinde; tünel eksenine yaklaşık dik olan hakim eklemin eğimi 70^0 olduğundan "çok uygun", doğrultusu tünel eksenine yaklaşık paralel olan tabakalanma eğimi 17^0-28^0 arasında değiştiğinden "orta" olarak kabul edilmiştir. MEGA (2011) tarafından hazırlanan raporda tünel; her iki portalde yaklaşık 50'şer metrelik bölüm "Tünel giriş ve çıkışı" ve ortada kalan yaklaşık 471 m'lik bölüm "Tünel güzergahı" olarak iki kesimde incelenmiş, kaya ve kazı sınıflamaları yapılmıştır. Giriş ve çıkış portalları için RMR değeri 65, Q değeri 9,8; tünel güzergahı için RMR değeri 75, Q değeri 19,6 olarak elde edilmiştir.

Destek sistemleri tünel giriş ve çıkış portallarında RMR=65 için kaya sınıfı II ve tam kesit ilerleme (1,0 m-1,5 m), tavanda 3 m uzunluğunda bulonlar, 50 mm püskürtme beton, çelik iksa "yok"; Q=9,8 değerine göre NATM kazı sınıfı "B1 Gevrek", ilerleme adımı üst yarıda 2,0-3,0 m, altyarıda 4 m, destek kategorisi 18A-18B, 1 m aralıklı 2,3 m-4 m uzunlukta gerdirmeli bulonlar, olarak öngörülmüştür.

Destek sistemleri tünel güzergahında RMR=75 için kaya sınıfı II ve tam kesit ilerleme (1,0 m-1,5 m), tavanda 3 m uzunluğunda bulonlar, 50 mm püskürtme beton, çelik iksa "yok"; Q=19,6 değerine göre NATM kazı sınıfı "A2 sonradan az sökülen", adım boyu üstyarı kazısında 2,5-3,5 m, altyarıda 4 m, destek kategorisi 13A-14A, 1 m aralıklı 3,5 m-7 m uzunlukta gerdirmeli bulonlar olarak öngörülmüştür.

1.2.4 İksasızlık Durumu

MEGA (2011) raporunda "jeolojik ve jeomorfolojik yapı gözönüne alındığında herhangi bir stabilite problemi ile karşılaşılmayacaktır" denilmiştir. Raporda "Unwedge v.3.005 programı ile yapılan analiz sonucunda tünel açılımı sırasında büyük ölçekli bir kama tipi kaymanın olmayacağı gözlenmekle beraber tünel açılımı sırasında jeolojik koşullar izlenerek oluşabilecek kama tipi kaymalar için gerekli önlemler alınmalıdır" uyarısı yapılmıştır. MEGA (2011) tarafından yapılan kama tipi kayma analiz sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Tünel giriş portal kesiminde tavanda 0,613 m^3 hacminde, FS=0,342 emniyet faktörüne sahip bir kama oluşabileceği hesaplanmıştır. Kayanın birim hacim ağırlığı 2,35 ton/m^3 olduğundan bu kamanın tavanda oluşması halinde ağırlığı 0,613 m^3x2,35 t/m^3=1,44 ton olacaktır.

Tünel güzergah kesiminde sol üstte (tünel sol omuzda) FS=0,304 güvenlik faktörlü 14,02 m^3, tünel tavanında FS=0,098 güvenlik faktörlü 0,037 m^3, sağ üstte (tünel sağ omuzda) FS=0,00 güvenlik faktörlü 3,98 m^3 hacime sahip kamaların oluşabileceği hesaplanmıştır. Kaya birim hacim ağırlığı 2,35 ton/m^3 olduğundan oluşması halinde bu kamaların ağırlıkları sırası ile sol omuzda 32,94 ton, tavanda 0,090 ton, sağ omuzda 9,35 ton olacak ve tehlike yaratacaktır.

Tünel çıkış portal kesiminde sadece tünel sol omuzda FS=0,00 güvenlik faktörlü 0,237 m^3 hacime sahip bir kama oluşabileceği hesaplanmış olup, bunun ağırlığı 0,237 m^3x2,35 t/m^3 =0,56 ton olacaktır. Bu tehlikeleri önlemek ve hiç bir risk üstlenmemek için çelik iksa önerilmiş, uygulanmış ve tehlike giderilmiş bulunmaktadır.

2 YAPISAL HASAR RİSK DEĞERLENDİRMESİ

Sapça Tüneli tek tüp olarak Devrek-Zonguldak yolunda mevcutta bulunan (Şekil 1) 568 m uzunluğundaki tünelin kilometre artış yönüne doğru sol tarafında (Güneyinde) açılacaktır. Sapça-2 tünelinin hem giriş (Şekil 1) ve çıkış (Şekil 2) hem de güzergahı üzerinde Elvan Pazarcık Beldesi Celepçioğlu Mahallesi, dolayısı ile çok sayıda konut binası ve samanlık, ahır, odunluk ve benzeri müştemilat bulunmaktadır. Sapça-2 tünelinin açılması esnasında bu binalara hasar, içinde oturan kişilere rahatsızlık verilmemesi gerekli ve zorunlu bulunmaktadır.

Uzunluğu 571,33 m olan bu kısa tünelin açılması için iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar: (1) İş makinalı kazı, (2) Patlatmalı kazı ile açılmasıdır. Makinalı kazı hem yavaş, dolayısı ile yüksek maliyetli, hem de sürekli ve yüksek gürültü çıkaran, kesik kesik de olsa gün boyu titreşim yaratan bir yöntemdir. Patlatmalı kazı ise titreşim kontrollü patlatma yapıldığı takdirde hem hızlı ve düşük maliyetli, hem de kısa süreli gürültü ve titreşim yaratan uygun bir yöntemdir.

Şekil 1. Sapça tüneli konumu ve giriş bölümü üzerinde yer alan binalar

Şekil 2. Sapça tüneli konumu ve çıkış bölümü üzerinde yer alan binalar

Yapılan değerlendirme sonucu tünelin titreşim kontrollü patlatma yöntemi ile açılmasına karar verilmiştir (Bilgin, 2013). Bu amaçla patlatmalara başlamadan önce binaların tünele nazaran konumlarının, halihazır durumda hasarlı olup olmadıklarının tespiti ile etüde başlanmıştır. Öte

yandan titreşim kontrollü patlatma tasarımında gerekli olan gecikme başına en yüksek emniyetle patlatılabilecek patlayıcı miktarının tayini için Zonguldak İlinde önceki yıllarda gerçekleştirilen projeler esnasında yapılmış titreşim ölçüm sonuçlarından yararlanılmasına karar verilmiştir.

2.1 Binaların Konum ve Durumu

Tünelin açılacak olduğu sahada topoğraf marifeti ile ölçüm yaptırılmış ve Sapça Sol Tünelinin en yakınında bulunan binaların konumları belirlenmiştir. Bina konumları dikkate alınarak her binanın tünel yan duvarına olan yatay ve tünel tavanına olan düşey mesafeleri saptanmış ve Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Sapça Tüneli sol tüp güney ve kuzeyindeki binaların tünele mesafeleri

Km	Açıklama	Yatay Mesafe (m)	Düşey Mesafe (m)
19 + 961,24	Giriş		
19 + 990	Güneyde ev-1	85,60	50,02
20 + 010	Güneyde ev-2	78,56	54,51
20 + 021	Güney samanlık-1	72,89	59,74
20 + 050	Güneyde ev-3	29,65	53,40
20 + 110	Güneyde ev-4	40,74	70,29
20 + 121	Güney samanlık-2	40,86	69,87
20 + 156	Kuzeyde ev-1	44,73	69,40
20 + 168	Kuzeyde ev-2	54,57	69,83
20 + 187	Kuzeyde ev-3	39,19	68,18
20 + 225	Güneyde ev-5	82,45	65,86
20 + 350	Kuzeyde ev-4	46,97	42,06
20 + 425	Tünel üstü ev-1	0,00	34,06
20 + 444	Tünel üstü ev-2	6,11	34,98
20 + 456	Tünel üstü ev-3	3,11	33,13
20 + 532,57	Çıkış		

Şekil 3. Patlatmalar başlatılmadan önce hasarlı olduğu saptanan binalardan bir örnek

Bina mesafeleri saptandıktan sonra, patlatmalara başlanmadan önce binaların halihazır durumları incelenmiş ve hasarlı olup olmadıkları ve hangi seviyede titreşim hızına tahammül edebilecekleri belirlenmiştir. Patlatmalar başlatılmadan önce hasarlı olduğu saptanan binalara bir örnek Şekil 3'te verilmiştir.

2.2 Yapısal Hasar Risk Değerlendirmesi

Sapça Tüneli sol tüp (Sapça-2) patlatmaları sırasında hasar görme olasılığı bulunan iki tür yapı vardır. Bunlardan ilki mevcut ve trafiğe açık olan Sapça-1 (sağ tüp) tüneli, ikincisi tünel üstü mahallede bulunan konut binaları ve müştemilatıdır. Celepçioğlu mahallesinde bulunan tüm yapılar incelenmiştir. Bu incelemede konut binaları ile müştemilatının büyük çoğunluğunun mühendislik hizmeti almamış, yerel ustalar tarafından eksik malzeme ve düşük işçilik ile inşa edilmiş, hafif veya orta hasarlı eski yapılar oldukları, az sayıdaki yeni betonarme binanın hasarsız olduğu saptanmıştır. Konut binalarını hasarlandırabilecek veya mevcut hasarlarını büyütebilecek titreşim hızı seviyelerinin tünel beton kaplamasına hasar verebilecek titreşim seviyesine göre çok daha düşük olduğu bilinen bir gerçektir.

2013 yılında yürürlükte bulunan "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği"ne göre hassas kullanım olarak tanımlanan konut binaları zemininde aşılmaması gereken titreşim hızları; sismik dalga frekansı 1 Hz ise 5 mm/s, 4-10 Hz arasında ise 19 mm/s ve 30-100 Hz arasında ise 50 mm/s'dir. Oysa ki, tünellerde hasar oluşturabilecek en düşük titreşim hızları Dowding ve Rosen (1978) tarafndan 200 mm/s, Kaslik ve ark. (2001) tarafından 263 mm/s, Sakurai ve Kitamura (1977) tarafından 338 mm/s olarak verilmektedir.

Yeni tünel mevcut tünele 17 m ile 23,7 m arasında değişen yatay mesafede açılacaktır. Mevcut tünel betonarme kaplamalı olmasına rağmen eski teknoloji ile yapılmış olduğundan kaplama betonu yer yer çatlamış olup, su yalıtımı bulunmamakta ve tavandan su damlamaktadır. Titreşim kontrollü patlatma tasarımı mevcut tünel kaplama betonuna kesinlikle hasar vermeyecek şekilde yapılmıştır. Mevcut eski tünelin betonu üzerine sonradan atılmış olan 3mm-5mm kalınlıktaki püskürtme-beton sıvanın yer yer kavlamış ve dökülmekte olduğu yapılan incelemede saptanmıştır. Bu nedenle püskürtme betonun tünel patlatmaları sırasında düşme riski bulunmaktadır. Bu gerekçe ile patlatmalar sırasında mevcut tünelin 20 dakika gibi kısa sürelerle trafiğe kapatılması önerilmiş ve trafik durdurulmuştur.

3 TİTREŞİM KONTROLLU PATLATMA TASARIMI

3.1 Gecikme Başına Emniyetle Patlatılabilecek Patlayıcı Madde Miktarı

Binaların Sapça-2 tünelinin kaç metre üzerinde ve kaç metre yatay mesafede bulundukları Çizelge 1'de verilmiştir. Düşey mesafelerin 33 m ile 69,9 m aralığında, yatay mesafelerin ise 0,00 m ile 85,60 m arasında değiştiği görülmektedir. Bu mesafeler çok kısa mesafeler olup, daha önce kısa mesafede yapılan patlatma titreşimi ölçümlerinde sismik dalga frekanslarının genellikle 20 Hz, herhangi bir jeolojik arıza bulunmadığı takdirde kesinlikle 10 Hz değeri altına düşmediği bilinmektedir (Bilgin ve Ark. 2004, Bilgin 2010a, Bilgin 2010b, Bilgin ve Çakmak 2012). Gerek kısa mesafe gerekse de kaya malzemesi dayanımının 50 MPa üzerinde ve kaya kütle sınıfının (RMR) tünel güzergahında 75 olması sebepleriyle sismik dalga frekansının 10 Hz altına düşmesi beklenmemektedir. 2013 yılında yürürlükte bulunan "ülkemiz yönetmeliği" frekans 4 Hz-10 Hz aralığında oluştuğunda konut binası gibi hassas kullanım zemininde 19 mm/s titreşim hızına kadar izin vermektedir. Sismik dalga frekansı 12 Hz ise 24,10 mm/s, 14 Hz ise 26,0 mm/s, 16 Hz ise 29,8 mm/s, 18 Hz ise 32,3 mm/s, 20 Hz ise 35,0 mm/s değerine kadar zemin titreşim hızına izin vermekte ve bu değerlerin aşılmamasını şart koşmaktadır.

Zonguldak Ilıksu mevkiindeki ÖNCÜ İnşaat kireçtaşı ocağında yapılan patlatmaların Ilıksu mağarası yönünde yapılan titreşim ölçümleri (Bilgin ve Çakmak, 2009) ve Zonguldak-Kozlu Fatih Mahallesinde OPET benzin istasyonu yanında yapılan temel kazısı patlatmalarında Fatih

Sitesi yönünde yapılan titreşim ölçümleri (Bilgin, 2010b) kullanılarak sismik dalgaların zeminde yayılma ve sönümlenme formülleri saptanmıştı. Bu formüller ve Sapça tünelinin en yakın binaya olan en kısa mesafeleri kullanılarak yapılan hesap neticesinde orta çekme (kesme) işleminde gecikme başına emniyetle ateşlenebilecek patlayıcı madde miktarları; ÖNCÜ İnşaat formülüne göre 3,50 kg/gecikme, Fatih Sitesi formülüne göre 4,0 kg/gecikme olarak tespit edilmiştir. Her koşulda gecikme başına 10 Kg miktarın kesinlikle aşılmaması kabul edilmiştir.

Bu değerlere uyumlu olarak, üst yarıda orta çekme (kesme) için adım boyu 1,5 m olarak sınırlandırılmış, orta çekmede gecikme başına 3,20 Kg, serbest yüzeyin fazla olduğu diğer üst yarı delikleri ile alt yarı patlatmalarında gecikme başına 4,5 Kg, en çok 10 Kg ateşlenmek üzere delme ve patlatma düzenleri tasarlanmış, gecikme numaraları ve delik aralıkları belirlenmiştir. Bu esaslara göre numara verilen her deliğe kaç Kg patlayıcı madde konulacağı ve kaç numaralı gecikmeli kapsül yerleştirileceğini gösteren delik doldurma çizelgeleri hazırlanmıştır.

3.2 Titreşim Kontrollu Patlatma Tasarımı Özeti

MEGA (2011) tarafından hazırlanmış olan "Sapça Tüneli Tünel Kesin Proje Jeolojik ve Jeolojik-Jeoteknik Etüd Raporu"nda "Üst yarıda" her biri 50 m uzunlukta olan giriş ve çıkış (portal) kesimlerinde 2m-3m, 471 m uzunlukta olan tünel güzergahında 2,5m-3,5m, "Alt yarıda" 4,0 m ilerleme öngörülmüştür. Ancak bu öngörüde sadece kaya sınıfı esas alınmış, titreşim kontrollü patlatma ihtiyacı dikkate alınmamıştır. Titreşim kontrollü yapılan patlatma planında delik çapı 45 mm-azami 50 mm, adım (raunt) boyu üst yarıda 1,50 m olarak sınırlandırılmış, alt yarıda ise üst yarı açılmış ve yeterli serbest yüzey oluşmuş olması nedeniyle titreşim seviyesi düşeceğinden projesinde önerildiği gibi 4,0 m alınmıştır.

Üst yarıda adım boyunun 1,50 m ile sınırlandırılmasının sebepleri; Şekil 3'te gösterilen gibi hasarlı konut ve müştemilat binaları bulunması, henüz patlatmalara başlanmamış ve hiç bir titreşim ölçümü yapılamamış, bu nedenle zeminin sismik dalgaları iletme ve sönümlendirme kabiliyetinin yerinde tespit edilememiş olması ve hiçbir risk üstlenmemek olarak sayılabilir.

Projesinde verilen tünel kazı kesitine göre üst yarı alanı 56,55 m^2, alt yarı alanı 30 m^2'dir. Titreşimi sınırlandırmak için üst yarıda azami 98 adet delik öngörülmüş, böylece deliklere konulacak ve gecikme başına ateşlenecek patlayıcı madde miktarının kısıtlanması amacı güdülmüştür. Alt yarıda ise azami 39 delik delinmesi ve altyarının iki aşamada patlatılması planlanmıştır. Böylece delik başına düşen ayna alanı üst yarıda 0,58 m^2/delik, alt yarıda 0,77 m^2/delik olmuştur. Tünel aynasında çok çatlaklı kısımlar, ayrışmış kaya veya makaslama zonu bulunan zayıf kesimlerde delik sayıları yukarıda belirtilenden çok daha düşük olmuştur.

Her deliğe konulan farklı patlayıcı madde miktarına bağlı olarak gecikme başına üst yarıda kesmede, yanal ve yukarı yönde patlayan deliklerde 2, 3 veya en çok 4 adet deliğin, aşağı yönde patlayan delikler ile tavan ve duvar deliklerinde kullanılan patlayıcı miktarları düşük olduğundan ihtiyaca göre 5, 7, 8, 9, 11 adet deliğin aynı anda (aynı gecikme numarası ile) ateşlenmesine izin verilmiştir. Alt yarıda ise delik uzunlukları 4,0 m ve her deliğe konulan patlayıcı madde miktarı fazla olduğundan en çok 2 ya da 3 adet deliğin aynı gecikme numarasında ateşlenmesine izin verilmiştir.

Üst yarıda azami 98 adet 1,50 m'lik delikte toplam 79-80 kg patlayıcı kullanılmış, ortalama özgül şarj 1,05 kg/m^3 olmuştur. Üst yarıda 1,05 kg/m^3 özgül şarjın yeterli olmasında silttaşı-kiltaşı-kumtaşı kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımının ortalama olarak 54-57 MPa olması ve tabakalanma ile tabakalanmaya ve birbirlerine yaklaşık dik yönde gelişmiş iki eklem takımı bulunması ve eklem aralığının en çok 60 cm dolayında olmasının rolü olduğu değerlendirilmektedir. Alt yarıda ise azami 39 adet 4,0 m'lik delikte 63-64 kg patlayıcı kullanılmış, ortalama özgül şarj 0,58 kg/m^3 olarak gerçekleşmiştir. Bunda alt yarı deliklerinin yukarı doğru patlamasının ve parçalanan kayaların yukarı yönde (yer çekimine karşı) hareket etmesinin etkisi bulunmaktadır.

Yapılacak ilk 3-5 patlatma esnasında titreşim ve hava şoku-gürültü ölçümleri yapılarak kayıt alınması, dalga formlarının analiz edilmesi, zeminde ilerleyen sismik dalgaların en düşük hakim frekansının ve oluşan zemin titreşim hızlarının tespiti planlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Ölçülen değerler dikkate alınarak binalara hasar vermeden veya hasarlı binalardaki hasarı büyütmeden ve kişileri rahatsız etmeden patlatma yapıldığının belirlenmesi, bunun yanısıra sismik dalga sönümlenme formülünü saptayarak gecikme başına emniyetle patlatılabilecek patlayıcı madde miktarını artırma olanağı bulunup bulunmadığının araştırılması planlanmıştır.

4 KONTROL AMAÇLI TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ ÖLÇÜMLERİ

Bilgin (2013) tarafından hazırlanan 01 Şubat 2013 tarihli titreşim analizine dayalı patlatma tasarım ve patlayıcı madde ihtiyaç raporu idareye sunulduğundan 08 Şubat 2013 günü idare tarafından patlayıcı madde satın alma ve kullanma izin belgesi verilmiştir. Bu nedenle ilk üç patlatma 12 ve 13 Şubat 2013 günlerinde yapılmış, bu patlatmalar sırasında tünel üzerinde binalar bulunan Celepçioğlu Mahallesinde titreşim ve hava şoku-gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde amaç titreşim hızlarının kişileri rahatsız edecek seviyede olup olmadığını, sismik dalga hakim frekansının en düşük kaç Hertz olarak oluştuğunu, kişisel rahatsızlık seviyesi geçildi ise titreşim hızının frekansa bağlı olarak binaları hasarlandıracak düzeye ulaşıp ulaşmadığını belirlemek ve sismik dalga sönümlenme formülünü tespit etmektir. Bir cihaz da tünel ağzının karşısında oluşacak hava şokunu ölçmek için tünel giriş portalı açığında konumlandırılmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Sapça Tüneli üzeri mahallede yapılan titreşim ve hava-şoku ölçüm değerleri

Sıra No	Ölçüm Yeri	Ölçülen Titreşim Hızı, mm/s				Patlayıcı Miktarı, Kg	Mesafe metre	Ölçekli Mesafe	Hakim Frekans, Hz			Cihaz Tarihi	Kayıt Saati	Havaşoku dB / Hz
		R	V	T	PPV				R	V	T			
1	Mah.	5,08	2,66	2,54	5,08	9,25	65,87	21,66	23,44	36,19	23,44	12/02	13,44	128 / 3,8
2	Mah.	3,00	2,00	2,22	3,00	9,25	93,94	30,89	75,30	76,60	90,80	12/02	13,44	123 / 3,8
3	Mah.	1,02	1,14	0,64	1,14	9,25	157,00	51,62	102,70	18,63	72,31	12/02	13,44	120 / 3,8
4	Gir.Karş.	0,64	0,76	0,51	0,76	4,50	176,40	83,16	21,25	20,38	22,75	12/02	21,25	141 / 9,7
5	Mah.	3,62	1,83	1,00	3,62	4,50	92,44	43,57	77,20	50,10	22,70	12/02	21,25	122 / 3,3
6	Mah.	0,89	0,51	0,64	0,89	4,50	155,50	73,30	15,75	21,06	16,44	12/02	21,25	118 / 3,3
7	Mah.	5,08	2,79	3,30	5,08	6,00	62,87	25,67	23,94	37,63	18,81	13/02	18,52	128 / 3,1
8	Mah.	3,03	1,71	1,13	3,03	6,00	90,94	37,13	79,40	76,60	88,40	13/02	18,52	122 / 3,1
9	Mah.	1,14	0,89	0,64	1,14	6,00	154,00	62,87	112,9	65,31	116,4	13/02	18,52	118 / 3,1

Kısaltmalar Açıklaması:
Mah: Mahalle, Gir.Karş.:Tünel Girişi Karşısı, R:Titreşim Boyuna Bileşeni, V:Titreşim Düşey Bileşeni, T:Titreşim Yanal Bileşeni, PPV: Tepe Parçacık Hızı, Patlayıcı Miktarı: Kg/Gecikme, Ölçekli Mesafe: Fiziki Mesafe bölü Karekök Kg, dB: Desibel, Hz: Hertz

İlk üç patlatmada kaydedilen en yüksek zemin titreşim hızı (PPV) boyuna bileşende 5,08 mm/s, bu dalganın en düşük hakim frekansı 23,44 Hz (Hertz) olarak gerçekleşmiştir. O tarihte yürürlükte olan ülkemiz yönetmeliği 23,44 Hz frekans için 40,5 mm/s zemin titreşim hızına izin vermektedir. Buna göre ölçülen hız, izin verilen hızın ((5,08 / 40,5)x100=)%12,5'si seviyesinde (yaklaşık sekizde biri oranında) düşük bir hız olup, binalarda yeni çatlak oluşturmadığı gibi, hasarlı binalarda eski çatlakların açılması ve hasarın büyümesine de neden olmamıştır.

Sismik dalga hakim frekansları beklendiği ve önceki projelerden edinilen tecrübelerin gösterdiği gibi genellikle 20 Hz ve üzerinde oluşmuştur. Bunun nedeni patlatma yeri ile bina yakınında ölçüm yapılan yerler arasındaki mesafelerin kısa olması ve tünelde mevcut kaya malzemesi dayanımı ile kaya kütle dayanımının orta-yüksek olmasıdır. Sismik dalganın yol aldığı zeminlerde bulunan ezik, ayrışmış veya makaslama zonu gibi zayıf/topraklaşmış kesimlerden geçmesi durumunda saptanan en düşük hakim frekans 15,75 Hz olmuştur. Bu

frekans değeri için ülkemiz yönetmeliğinde izin verilen tepe titreşim hızı 29,3 mm/s olup, bu freans değerinde ölçülen hız 0,89 mm/s'dir. Bu duruma göre ölçülen hız, izin verilen hızın ((0,89 / 29,3)x100=)%3,04'ü seviyesinde (yaklaşık otuzikide biri oranında) düşük bir hızdır. Bu durumun zayıf/topraklaşmış kesimde sismik dalga enerjisinin yutulması/sönümlenmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Ülkemiz yönetmeliğinde hakim frekansa bağlı olarak hassas kullanım zemininde aşılmaması gereken titreşim hızı değerleri verilmekte, ancak bina içerisinde bulunan kişilerin rahatsız olmaması için belirtilen herhangi bir üst sınır (limit) titreşim hızı değeri verilmemektedir. Bu nedenle ABD Ulusal Standardlar Enstitüsü (ANSI) tarafından belirtilen değerler dikkate ve değerlendirmeye esas alınmıştır. Kişisel rahatsızlığa yol açmamak (kişilerin katlanamayacakları kadar yüksek titreşime maruz kalmamalarını temin etmek) için aşılmaması gereken sınır değer günde en çok iki kez patlatma yapılabileceği ve tünel patlatmasında uzun gecikme süreli (LP) kapsüller kullanılacağı ve titreşim süresinin 8 saniyeye ulaşacağı dikkate alınarak 6,35 mm/s kabul edilmiştir. Gerek ilk üç patlatmada, gerekse 2013 yılı Mart ayı sonuna değin denetim amaçlı yapılan tünel patlatmalarında kaydedilen tepe titreşim hızları daima 6,35 mm/s değerinden düşük oluşmuş ve kişisel rahatsızlık oluşmamıştır.

Ülkemiz Yönetmeliğinde kişisel rahatsızlık veya binalarda pencere camı kırılması, sıva çatlaması, dökülmesi ve benzeri hasar yaratmamak için herhangi bir üst sınır (limit) hava şoku-gürültü değeri verilmemektedir. Bu nedenle ABD Açık Ocak Maden Dairesi (OSMRE) tarafından belirtilen değerler dikkate ve değerlendirmeye esas alınmıştır. Ölçüm sırasında kullanılan mikrofon 2 Hz veya daha düşük frekansa sahip hava basıncı dalgalarını ölçebilir kabiliyette ve L-tipi olduğundan aşılmaması gereken hava şoku-gürültü seviyesi 133 dB (Desibel)'dir. Dowding (1985) patlatma gürültülerinin ölçümünde A ve C ağırlıklı mikrofonların düşük frekanslı hava basınç dalgalarına yeterince tepki veremediğini ve doğru ölçüm yapamadığını, bu nedenle patlatma kaynaklı hava şoku-gürültü ölçümünde L-tip mikrofon kullanılması gerekli ve zorunlu olduğunu ifade etmektedir.

Hoek ve Bray (1981) daha önce Ladegaard-Pedersen ve Dally (1975) tarafından hazırlanmış olan, değişik gürültü seviyelerini ve bunların yaratabileceği etkileri bir cetvel halinde sunan çalışmayı "Rock Slope Engineering" isimli kitaplarında sunmuşlardır. Buna göre patlatma hava şoku-gürültüsü L cetvelinde 95 dB'e ulaştığında insanların dikkatini çekmeye başlamaktadır. Kişisel şikayetler 117 dB seviyesinde başlayabilmekte olup, bu seviyede raflardaki tabaklar ve pencere camları titreşmeye başlamaktadır. İnsanların rahatsızlık ve öfke duymaya başladıkları seviye ise 120 dB'dir. Binalarda hasarsızlık sınırı 140 dB olarak verilmiştir. Hasarsızlık sınır değeri ABD Tüzük'ünde izin verilen 133 dB değerinden yüksektir. Cetvele göre 150 dB değerinde bazı pencere camları kırılmaya başlamaktadır.

Tünel üzerinde yer alan Celepçioğu Mahallesinde ölçülüp Çizelge 2'de sunulan hava şoku-gürültü değerleri incelendiğinde en düşük 118 dB ile en yüksek 128 dB aralığında oluştuğu, bu hava basınç dalgalarının frekanslarının ise 3,1 Hz ile 3,8 Hz arasında değiştiği görülmüştür. İnsanların kulak yapısı 20 Hz-20000 Hz aralığındaki hava basınç dalgalarına hassas olduğundan bu dalgaların işitilebilir ses değil, hava şoku olduğu anlaşılmıştır. Bu bakımdan kişileri rahatsız edecek bir durum bulunmadığı, ayrıca ABD Tüzük'ünde aşılmaması istenilen 133 dB değerini aşmadığı için kişisel rahatsızlık oluşturmadığı ve binalarda hasar yaratacak seviyeden çok daha düşük olduğu değerlendirilmektedir.

Öte yandan tünel giriş ağzının (portalın) 100 m kadar ilerisinde ve portalın tam karşısında değil, 35-40 m kadar kuzeyinde TTK'da madenci olan Ahmet Yılmaz-Halil Yılmaz kardeşlerin oturduğu bir konut binası bulunmaktadır. Bu binanın pencere camlarının kırılmaması için 01 Şubat 2013 tarihli raporumuzda müteahhide patlatma anında tünel ağzına eski konveyör bantlarından yapılmış bir örtünün asılması önerilmişti. Ancak herhangi bir önlem alınmadığı görüldüğünden 12 Şubat 2013 günü saat 21,25'te yapılan patlatma esnasında bir cihaz yerleştirilerek patlatılan aynadan 176 m mesafede ölçüm yapılmış olup, 9,7 Hz frekans ve 141 dB hava basıncı ölçülmüştür. Bu nedenle cam kırılması riskinin bulunduğu, patlatma esnasında

tünel ağzına örtü asılması sözlü olarak tekrar hatırlatılmıştır. Ne var ki, kontrol amacı ile sahada bulunup ölçüm yapmadığımız bir gün bu binanın bazı pencere camlarının kırıldığı, zararın tazmin edildiği, bundan sonra müteahhidin perde astığı öğrenilmiştir.

Önerilen patlatma tasarımı kullanılarak 12 ve 13 Şubat 2013 günlerinde gerçekleştirilen ilk üç patlatma esnasında yapılan titreşim ve hava şoku ölçüm sonuçları yapılara hasar, kişilere rahatsızlık verme riski bulunmadığını göstermiş ve önerilen tasarımın güvenilir ve emniyetli olduğu anlaşılmıştır. Patlatmalara üst yarıda orta kesme (orta çekme) patlatmasında gecikme başına 4 kg, ayna tarama, tavan ve duvar deliklerinde ise gecikme başına 10 Kg'ı aşmamak üzere aynen devam edilmesi önerilmiştir. Daha sonra 23 ve 24 Şubat 2013 ve 22 ve 23 Mart 2013 tarihlerinde doğrulama ve kontrol amaçlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde saptanan hakim frekans değerlerinin portal kesiminde yapılmış patlatmalara nazaran göreceli olarak yükseldiği, 64 Hz ile 116 Hz arasında değiştiği, ülkemiz yönetmeliğinde dalga frekansı 30 Hz ile 100 Hz arasında oluştuğunda 50 mm/s değerine kadar zemin titreşim hızına izin verildiği bilindiğinden ve ölçülen en yüksek titreşim hızının 9,83 mm/s olması nedeniyle bu durumun binalarda hasar riskini en aza indirdiği veya yok dereceye indirdiği kanaatine varılmıştır. Bu durum zayıf portal kesiminin geçilmesi, tünel ana güzergahına girilmesi ve kaya malzeme ve kütle kalitesinde artış olduğundan oluşmuştur. Bu ölçüm sonuçlarının analizi neticesinde hala bir emniyet payının bulunduğu ve gecikme başına patlatılabilecek patlayıcı madde miktarının artırılabileceği anlaşılmıştır. Buna göre gecikme başına ateşlenen patlayıcı madde miktarlarının 16 Kg'a kadar artırılabileceği hesaplanmıştır.

11, 12 ve 13 Nisan 2013 günlerinde gecikme başına ateşlenen patlayıcı madde miktarı artırılarak 12 Kg, 14 Kg ve 16 Kg ile yapılan patlatmalara ilişkin kayıtlarda sismik dalga hakim frekansının 20 Hz ile 144 Hz arasında oluştuğu, bir kez yanal bileşende 19,81 Hz değerini aldığı, Buna göre zemin titreşim hızının 35 mm/s değerinden düşük olması halinde binalarda hasar riski oluşturmayacağı anlaşılmıştır. Nitekim belirtilen tarihlerde artırılmış miktarlarla yapılan patlatmalarda ölçülen en yüksek zemin titreşim hızları 10,40 mm/s ve 10,29 mm/s, en düşük hızlar ise 1,02 mm/s ve 1,27 mm/s olmuştur. Elbette 6,35 mm/s üzerinde olan titreşim hızları bina içinde bulunan kişilerce belirgin biçimde algılanmıştır. Sapça-2 Tüneli patlatmalarına bu şekilde, gecikme başına 16 Kg miktarı aşılmadan devam edilmiş ve hiç bir hasar oluşmamıştır.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmadan çıkarılan başlıca sonuçlar ile öneriler aşağıda sunulmuştur.

Yerleşim birimleri altında veya şehiriçinde NATM yöntemi ile yapılan sığ tünel patlatma tasarımlarında kaya malzeme ve kaya kütle özellikleri dikkate alınmalıdır.

Benzer şekilde çevredeki tüm yapılar incelenmeli, yapı kalitesi dikkate alınarak binaların hasara uğramadan tahammül edebileceği titreşim seviyeleri belirlenmeli ve buna göre tasarım yapılmalıdır. İnsani rahatsızlık durumu da göz önüne alınmalıdır.

Şehiriçi tünel patlatma tasarımları yetkin ve deneyimli kişiler tarafından belirli bir emniyet payı ile yapılmalı, gerçekleştirilecek ilk 5-6 patlatma sırasında titreşim ve gürültü ölçümü yapılarak tasarımın uygunluğu doğrulanmalıdır.

Tasarımın uygunluğu sınandıktan ve kanıtlandıktan sonra hala emniyet payı varsa gecikme başına ateşlenebilecek patlayıcı miktarları artırılabilir, dolayısı ile adım (ilerleme) boyu artırılarak tünelin daha kısa zamanda açılması ve maliyetin düşürülmesi mümkün olabilir.

Patlatmalara açıklanan biçimde devam edilerek Celepçioğlu Mahallesinde binalara hasar, kişilere rahatsızlık verilmeden Sapça Sol Tüp Tüneli açılmış ve hizmete alınmıştır.

Celepçioğlu Mahallesinde oluşan ve ölçülmüş bulunan zemin titreşimleri bina hasarlarını önlemek bakımından ülkemiz yönetmeliği'ne, kişisel rahatsızlık açısından ise ABD Ulusal Standardına uygun olmuştur.

Celepçioğlu Mahallesinde oluşan ve ölçülmüş bulunan hava basıncı-gürültü değerleri ABD Federal Tüzük'üne (ABD Açık Ocak Maden Dairesi, OSMRE, 1983) uygun olmuştur.

Patlatmalı şehir içi tünelciliği veya yerleşim yeri altı karayolu tünelleri patlatmalı olarak yapılacak ise mutlaka tünel tavanı üzerindeki örtü kaya kalınlığı ve niteliği dikkate alınmalı, hava şoku-gürültü konusuna özel önem verilmeli, kuyu(şaft) ve tünel ağızları patlama sırasında uygun örtü ile örtülmeli ve kişisel rahatsızlık ve pencere camı kırılması ve benzeri hasarlara meydan verilmemelidir.

KAYNAKLAR

American National Standards Institute(ANSI), 1983, *Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings,* ANSI S3.29-1983, 10 pages.

Bilgin, H. A., 2013, *Zonguldak-Ankara Bölünmüş Devlet Karayolu Sapça Tüneli Sol Tüp ve Üzülmez Sol ve Sağ Tüp Tünellerinde Yapılacak Patlatmaların Yaratacağı Yer Titreşimlerinin Çevredeki Yapılar Üzerinde Yapısal Hasar Riskinin Araştırılması ve Titreşim Ölçümüne Dayalı Patlatma Tasarım ve Patlayıcı Madde İhtiyaç Raporu*, ODTÜ, Ankara, 75 s. (Yayınlanmamış rapor).

Bilgin, H. A., Kılıç, M., İnal, H. S., Büyükyıldırım, K., 2004, *Keçiören Metrosu Patlatma Risk Etüdü*, Proje Kod No: 04-03-05-2-00-03, ODTÜ, Ankara, 87 s. (Yayınlanmamış rapor).

Bilgin, H. A., Çakmak, B. B., 2009, *Zonguldak İli Merkez İlçe Dahilindeki 20064766 Ruhsat Numaralı II. Grup Doğaltaş Madeni Patlatmalarının Çevredeki Ilıksu Mağarası Binalar ve İnsanlar Üzerinde Çevresel Etki Etüdü,* Sonuç Raporu, ODTÜ-OK Dış Tic. Madencilik Ltd. Şti., Ankara, 116 s. (Yayınlanmamış rapor).

Bilgin, H. A., 2010a, *Kuzey Ankara Girişi Kentsel Dönüşüm Projesi Kapsamında Olan Hasköy Tünellerinde Yapılacak Patlatmaların Binalar ve Kişiler Üzerinde Çevresel Etkisinin Araştırılması ve Titreşim Analizine Dayalı Patlatma Tasarımı,* ODTÜ-OK Dış Tic. Madencilik Ltd. Şti., Ankara, 36 s. (Yayınlanmamış rapor).

Bilgin, H. A., 2010b, *Zonguldak Kozlu Fatih Mahallesi 11 Pafta 125 Ada 315 Nolu Arsada Yapılacak Patlatmalar için Binalar Üzerinde Hasar Riski Araştırması, Titreşim Analizine Dayalı Patlatma Tasarımı ve Patlayıcı Madde İhtiyaç Raporu,* ODTÜ, Ankara, 12 s. (Yayınlanmamış rapor).

Bilgin, H. A., Çakmak, B. B., 2012, *Zonguldak Kdz.Ereğli Bölünmüş Devlet Karayolu Sol Tünel-1 ve Sol Tünel-2'de Yapılacak Patlatmaların Yaratacağı Yer Titreşimlerinin Çevredeki Yapılar Üzerinde Yapısal Hasar Riskinin Araştırılması ve Titreşim Ölçümüne Dayalı Patlatma Tasarım ve Patlayıcı Madde İhtiyaç Raporu,* ODTÜ ve ANFO Madencilik Ltd. Şti., Ankara, 51 s. (Yayınlanmamış rapor).

Dowding, C.H., Rosen, A., 1978, Damage to Rock Tunnels from Earthquake Shaking, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 104 (GT2).

Dowding, C. H., 1985, *Blast Vibration Monitoring and Control,* Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 297 pages.

Hoek, E., Bray, J. W., 1981, *Rock Slope Engineering,* The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 pages.

Kaslik, M., Birch, W.J. ve Cobb, A., 2001, The Effects of Quarry Blasting on the Structural Integrity of a Disused Railway Tunnel, *Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques*, 27, pp.199-211.

MEGA Mühendislik Müşavirlik Tic. Ltd. Şti., 2011. *Sapça Tüneli Tünel Kesin Proje Jeolojik ve Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu*, Ankara, 173 s. (Yayınlanmamış rapor).

Sakurai, S., Kitamura, Y., 1977, Vibration of Tunnel due to Adjacent Blasting Operation, Int. Symposium on field measurements in rock mechanics, Zurich, Switzerland, April 4-6, pp.61-74.

Siskind, D.E., 2000, Vibrations from blasting, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, OH., USA, 120 pages.

The Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (OSMRE), 1983, *Federal Register, 30 CFR Parts, 715, 780, 816, and 817,* Vol. 48, No. 46, Rules and Regulations (governing the blasts associated with surface and underground mines), pp. 9788-9811.

Türkiye Cumhuriyeti Resmi Gazete, (04 June 2010, No.27601), Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği.