

## GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE TÜNELCİLİK ve TAHKİMAT MALZEMELERİ

### *Tunnelling and Support Materials From Past to Present*

Eren KÖMÜRLÜ\*  
Ayhan KESİMAL\*\*

#### ÖZET

Tarih boyunca tahkimat malzemeleri tünelciliğin yönelimlerini etkilemiş ve yönelimler doğrultusunda geliştirilmiştir. Beton ve çeliğin tünelciliğe girişi, zaman içerisinde amaca bağlı olarak yeni katkı malzemeleri ve üretim yöntemleri ile gelişimi sonucu, kaya mühendisliği uzun yıllardır kazı yapılması zor alanlara yönlenebilmiştir. Yeni tahkimat malzemeleri yeni tahkimat anlayışlarının oluşmasına olanak sağlamıştır. Gelişen malzeme bilimi neticesinde üretilen yeni mühendislik polimerlerinin var olan tahkimat malzemelerinin alternatifi olarak veya birlikte kullanımı yoluyla günümüz tünellerine girdiği görülmekte ve gelecek uygulamalarda kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Günümüzde artmakta olan yeraltı alanlarının kullanımına yönelik yeni ihtiyaçlara cevap verilmesi adına gelişen malzeme bilimi yakından takip edilmelidir. Bu çalışmada, tahkimat malzemesi seçiminin tünelciliğin tarihsel gelişimi üzerindeki rolü ve önemine değinilmek amacıyla eski çağ tünellerinden günümüz tünellerine kadar olanların bazı önemli örneklerinden kısaca bahsedilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Tahkimat, Tahkimat malzemeleri, Tünelcilik Tarihi, Püskürtme Beton, Kaya Saplamları, Çelik Bağ, Polimer Tahkimat

#### ABSTRACT

Support materials have effected directions of tunnelling, and they have been improved with new directions through history. As a result of concrete and steel entering to tunnelling, improving production methods of them and derivation of new additive materials, rock engineering could find new application areas which were difficult to be excavated in previous times. New support materials have caused to occur new support strategies. It is being seen that new engineering polymers are taking place in the new application areas, as alternative and simultaneous material of actual support materials in today's tunnels. And, it can be estimated that these new engineering polymer support materials will be used more widely. Due to increasing needs for new underground areas, new frontiers of material science should be followed. In this study, some important tunnel examples from past to present are dealt to refer about the importance of support material selection on the tunnelling development through history.

**Key words:** Support, Support Materials, History Of Tunnelling, Shotcrete, Rock Bolts, Steel Sets, Polymer Support

\* Araş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Böl., TRABZON, ekomurlu@ktu.edu.tr

\*\* Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Böl., TRABZON

## 1 GİRİŞ

İnsanların henüz metal eşyalar ile tanışmadığı eski çağlarda kemik, boynuz, taş, ahşap gibi malzemeler ile kazı yaptıklarına dair bulgular mevcuttur. Metallerin kullanılmaya başlaması ile kazı alanında önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Metal alaşımların tarih boyunca gelişmesi neticesinde daha sert kayalarda kazı yapılmasına olanak sağlanmıştır. Dünyada ilk metal cevherleri üzerine kazı yapıldığına yönelik bulgular M.Ö. 3500 yılına aittir ve Kafkasya bölgesinde görülmüştür (Wahlstrom, 1973). İlk maden kazısına yönelik bulgular ise M.Ö. 40000 yılına dayanmakta olup, uygulamanın Svaziland'da gerçekleştirildiğine yöneliktir. Aztek, İnka, Babil, Mısır, Roma, Pers gibi tarihteki önemli uygarlıkların tüneller kazdıkları bilinmektedir. Tarihte bilinen ilk tünel, aç kapa yöntemi ile kazılmış olan ve M.Ö. 2200'lü yılında üretimi tamamlandığı düşünülen Babil uygarlığına ait saray ve tapınağı birbirine bağlayan bir tüneldir (ITA, 2013).

Mısırlıların ve Romalıların madencilik faaliyetleri için yaklaşık 200 metre derinliklere kadar yeraltı kazıları gerçekleştirdiği görülmüştür. M.Ö. 6. yüzyıla ait veriler sert kayalarda da kazılar yapıldığı ancak ilerleme hızlarının yılda 9 – 10 metre gibi çok düşük seviyelerde olduğuna yöneliktir (Fukushima, 2012). Sonraları, Roma tünellerindeki kazı hızının ne denli arttığını, antik çağların en büyük tüneli olarak bilinen Pausilippo tüneli göstermektedir. M.Ö. 36 yılında kazısı biten tünel 1,4 km uzunluğundaydı. Bu tünelin kazısında binlerce işçinin çalıştığı ve kazının 11 yıl sürdüğü söylenmektedir. Tünel, Fucine gölü suyunun drenajı için kazılmıştır. Roma imparatorluğu, tünel kazılarında esirlerini çalıştırmış ve bu sayede büyük iş gücüne sahip olmuştur (Esdaile, 1839).

Eski çağlarda manuel olarak yapılan kazılarda ateşin kullanıldığına yönelik bulgular mevcuttur. Bulgulara göre, ayna önünde ateş yakılarak kayanın ısınması ve ardından ateşin suyla söndürülmesi neticesinde oluşan sıcaklık değişimi ile kayaların kırılması, çatlatılması ve kazılabilirlik direncinin azaltılması sağlanmaktaydı (Wahlstrom, 1973)

Geçmişte tünellerin su sağlamak, kanalizasyon, drenaj, askeri, malzeme depolama, ulaşım, tapınma gibi amaçlar için kazılmış olmalarının yanı sıra saklanmak, korunmak için de yeraltı kazıları yapılmıştır. Anadolu'da hristiyanların Roma imparatorluğu askerlerinden saklanmak için barındıkları Derinkuyu yeraltı şehri bu konu-

da dünyaca yaygın bilinen bir örnektir (Kömürlü, 2011).

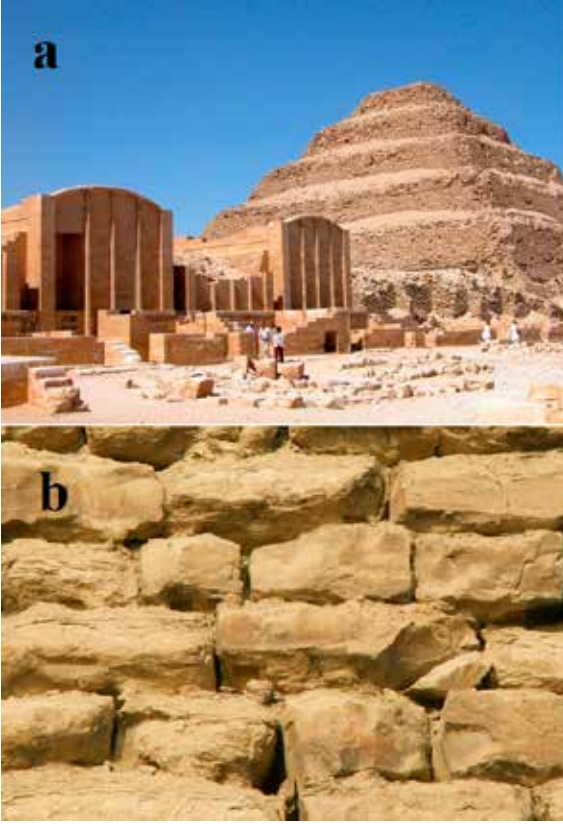
Su taşımak amaçlı gerçekleştirilen tünel kazılarının Mısır uygarlığında birçok örneği mevcuttur. Bunların en eskisi M.Ö. 10. yüzyıla dayanmaktadır. Tarihte su taşıma amaçlı gerçekleştiren kazıların en çok bilinenlerinden biri ise Samos adasında M.Ö. 530 yılında üretimi tamamlanan 1 km uzunluğundaki tüneldir. Tarihte mühendis ünvanı ile anılan bir kişi tarafından üretilen ilk tünel özelliğini göstermekte olan ve helenistik dünyanın 3 harikasından biri arasında gösterilen bu tünel mühendis Eupalinos öncülüğünde kazılmıştır. Şekil 1'de Samos tüneline bir görüntü mevcuttur.



Şekil 1. Samos Tüneli (Apostol, 2004)

O zamanlar günümüzdeki anlamıyla mühendis yetiştiren fakülteler olmasa da, bilim tarihinde mühendis sıfatı ile anılan insanlar vardır. İnşaat mühendisliği alanında mühendis ünvanıyla anılan en eski kişi Mısırlı İmhotep olarak kabul edilebilir. İmhotep'in M.Ö. 27. yüzyılda yapımı 29 yıl süren 62 metre yüksekliğindeki Djoser piramidinin inşasını yönettiği söylenmektedir (Kemp, 2005).

İnsanların metali işlemeye başlamaları M.Ö. 6000 yılına dayandığı ifade edilse de taş devrinin son bulması için geçiş döneminin tamamlanması M.Ö. 2500 lü yıllara kadar sürmüştür. Döneminin önemli uygarlıklarından olan Mısır, Djoser piramidi inşasında cilalanmış ve bloklar halinde kesilmiş kireçtaşları kullanmıştır (Ades, 2007). Şekil 2'de Djoser piramidi ve kullanılan bloklar gösterilmektedir.



Şekil 2. a) Djoser piramidi, b) Piramit duvarının örüldüğü şekillendirilmiş kireçtaşı

Tarihsel ilerleyişte insanların yeni metalleri işlemeleri, yeni alaşımlar geliştirmeleri ile kaya kazma ve kesme işlemlerinde önemli devrimler yaşanmıştır. Şu ana kadar bahsedilen tarihlere nazaran günümüze yakın olan 1922 yılında ilk kez üretilen tungsten karpit alaşımı yüzey sertliği nedeni ile kaya mühendisliğinde önemli bir kilometre taşıdır. Ardından, 1955 yılında ilk kez üretilen sentetik elmasın 1970'li yıllarda kaya mühendisliğine girmesi ile verim artırılarak daha büyük uygulamaların gerçekleştirilmesine olanak sağlanmıştır (Kömürlü, 2011)

Tam cepheli tünel açma makinesi (TBM) ilk kez 1856 yılında üretilmiş, ancak aşınma problemi nedeni ile sadece 3 metre kazı yapabildiği belirtilmiştir. 50 yıl ardından aşınma direnci daha yüksek olan bir malzeme ile bir TBM daha üretilmiştir. Bu makine, sert kayalarda verimli olamamış, yumuşak zeminler ve kömür damarlarında kazı yapmıştır. Ancak, kullanımı ekonomik olmamıştır. Yeni nesil makineler ile ekonomik olarak kazıların yapılması gelişen malzeme bilimi sayesinde gerçekleşmiştir (Kömürlü ve Kesimal, 2012a). Aşınma direnci yüksek olan yeni malzeme seçimleri ile gelişmekte olan mekanik kazının yanı

sıra patlayıcı malzemelerin kullanımı da kaya mühendisliği adına önemli bir devrim olmuştur. Geçmişten günümüze yaygın uygulama alanlarına sahip olan patlatmalı kazı yöntemi ilk kez 17. yüzyılda Fransa'nın güneyinde yer alan 156 metre uzunluğundaki Malpas tüneli inşaatında uygulanmıştır (Roland ve Claudine, 1997). Kaya Mühendisliği uygulamalarında geçmişten günümüze yeni malzeme seçimleri ile devrim yaşanmış olduğu ve gelecekteki yönelimlerin de büyük ölçüde yeni malzemelerin uygulama alanlarına girmesi ile yaşanacağı düşüncesi ile hazırlanan bu çalışmada, ağırlıklı olarak tahkimat malzemeleri üzerine tarihsel süreçteki yaşanan yenilikler ve etkilerine yer verilmiştir. Çeşitli tünel tahkimat elemanlarına alt başlıkları altında değinilecektir.

Öncelikle, günümüzde tahkimat malzemesi olarak yaygın kullanılmakta olan metal malzemelerin silah, çeşitli eşyaların yapımı ve kazı dışında mühendislik malzemesi olarak kullanımı adına yaşanan yeniliklerden kısaca bahsederek tünel tahkimatı elemanları hakkında detayların verilmesi doğru olacaktır. Metaller beş bin yılı aşkın süredir insanlar tarafından kullanılıyor olsa da silah ve eşya dışında kullanımı ilk kez 1778 yılında Coalbrookdale köprüsünün inşasıyla gerçekleşmiştir (Baugh ve Elrington, 1985). Bu köprüye ait bir görünüm Şekil 3 ile verilmektedir. Daha önceleri de yapı malzemesi olarak kullanımının düşünüldüğü tahmin edilen demirin, Abraham Darby'nin taş kömürden kok kömürünü üretmesi ile ekonomik olarak kullanımı mümkün olmuştur. Henry Cort'un 1784 yılında pudralama yöntemini geliştirmesi ile yapı sektörü için daha sağlam çelik üretimine olanak sağlanmıştır.



Şekil 3. Coalbrookdale köprüsü

19. yüzyılın ilk yarısında hızla gelişen çelik teknolojisi çelik yapıların yönelimlerini belirledi. 1930 yılına kadar Dünya'nın en yüksek yapısı olan 320 metre yüksekliğindeki çelik Eiffel kulesi 1887-1889 yıllarında inşa edildi (Brown, 2006).

Tarihteki ilk çelik askılı köprü olan Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Brooklyn köprüsünün yapımı John Roebling tarafından 1855 yılında önerilmiştir. Yükün kalın çelik halatlarla taşınacağı bu ilk uygulamanın gerçekleştirilmesi için kabul alması kolay olmamıştır (Snyder, 1996).

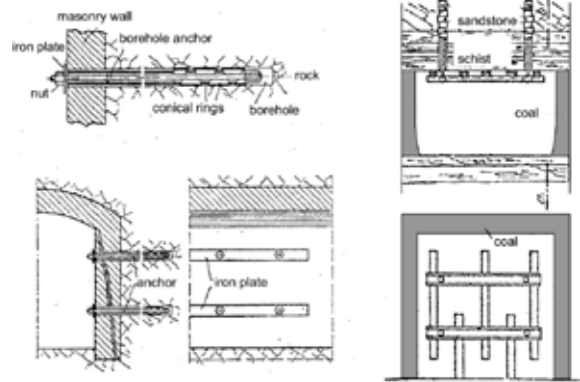
Yüksek gökdelen inşaatlarının yapılması da çelik teknolojisinin gelişmesi ve çelik konstrüksiyon uygulanması ile gerçekleşmiştir. Mimar William Le Baron Jenney tarafından dizayn edilen ve Chicago'da bulunan Dünya'nın ilk gökdeleninde yük, duvarlar yerine çelik yapı tarafından taşınmaktaydı (Helsey ve Strange, 2008). Çelik konstrüksiyon uygulaması ile 1890 yılında tamamlanan bu ilk gökdelen, günümüzde 1 kilometre yüksekliğe yaklaşan yapılara öncülük etmiştir.

Antik dönemlerden son yüz elli yıla kadar olan süreçte major olarak kullanılan ahşap tahkimat malzemelerinin ardından çeliğin de tünel tahkimat malzemesi olarak kullanılmaya başlaması, Kaya mühendisliği alanında önemli devrimlere yol açmıştır. Yeni Avusturya tünel açma metodunun bulunmasında önemli role sahip, geleneksel tahkimat anlayışından çıkılıp çağdaş tahkimat anlayışının oluşmasına olanak sağlayan, tahkimat tasarımı alanında önemli yeniliklere sebep olan Kaya saplamalarının bulunuşu ve tarihsel gelişimine sıradaki başlık altında değinilecektir.

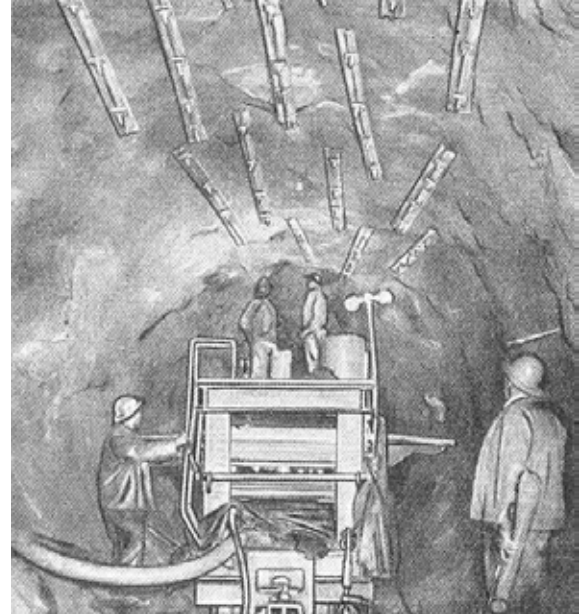
## 2 Kaya Saplamaları

İlk kaya saplamalarına yönelik patent 1918 yılında Stephan, Fröhlich ve Klüpfel tarafından alınmıştır. Stephan ve arkadaşlarının bu patent için 1913 yılında başvurdukları bilinmektedir. Patent başvurusunun sonuçlanması için sürenin uzun olmasında 1. Dünya Savaşı'nın yaşanıyor olmasının etken olduğu söylenmektedir (Kovari, 2003b). Stephan ve arkadaşları (1918) bu yeni uygulamayı yeraltında kaya içinde konumu farklı ve farklı deformasyona uğrayan noktaları birbirine bağlamak amaçlı kullandıklarını, bunun gerçekleşmesi için önce yeteri uzunlukta delik delinip sonra çelik ribarların deliğe montajı yapıldığını ve ribar ile zemin arasında aderansın sağlanması için delik içerisini çimentoladıklarını söylemektedirler. Patent başvurusu üzerinden tam 100 yıl geçen bu uygulama, günümüzde uygulanan tipik bir ribar tanımına paraleldir. Alman literatüründe, kaya saplamalarından bahsedilen, 1919 yılında yayınlanan bir çalışmada Königs-hütte kömür madeninde kaya saplamalarının kullanıldığı yazılmaktadır (Kovari, 2003b).

Püskürtme betonun henüz kullanılmadığı, eski uygulamalarda kaya saplamaları arasında bağlantı kuran uzun plakaların yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Buna yönelik 1919 ve 1952 yılına ait iki resim sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmektedir. Bu uygulama, kaya saplamalarının birbirine yük aktarmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 4. 1919 yılına ait Königs-hütte kömür madeni için kaya saplama kullanımını gösteren bir çizim (Kovari, 2003b)



Şekil 5. Doğu Delaware Tüneli (Perez, 1952)

Kaya saplamaları, 1920'li yıllarda yaygınlaşmamış, 1930'lu, 40'li ve 50'li yıllarda hızla yeni uygulamalarda kendine yer bulmaya başlamış, 1960'lı yıllarda ise popüler bir tahkimat elemanı haline gelmiştir. Aşağıda kaya saplama uygulamalarının tarihsel gelişimi adına bazı önemli örnekler sıralanmıştır (Kovari, 2003b; Schubert, 2013):

- Amerika Birleşik Devletleri'nde 250 metre

uzunluğundaki, Keyhole barajına ait tünelde 1930 yılında kullanılmıştır.

- Kanada'da bulunan Melntyre altın madeninde 1934 yılından itibaren kullanılmıştır.
- 1942 ve 1943 yılında İngiltere'de gerçekleştirilen ve Avrupa için ilk kez kaya saplama kullanılan kazılar yapılmıştır.
- 1948 ile 1950 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nin kömür madenlerinde toplam 1400 km uzunluğundaki kazılarda kaya saplama kullanılmıştır.
- 1950 yılında İngiltere'de Manchester yakınında kazılan bir su tüneline kaya saplama kullanılmıştır.
- 1950'li yıllarda Kanada'da, Norveç'te, İsveç'te, Fransa'da birçok baraj tünellerinde kaya saplama kullanılmıştır.
- 1956 yılında Venezüella'da kaya saplama püskürtme beton ile birlikte ilk kez sistematik olarak uygulanmıştır.
- 1958 – 1962 yıllarında, Fransa ve İtalya arasında 2200 metre derinliğe kadar ulaşan, 11,6 km uzunluğundaki otoyol tüneli inşasında kaya saplama kullanılmıştır.

1960'lı yılların devamında, kaya saplama tahkimat prensiplerine yönelik genel detaylar anlaşılmış ve birçok standartlaştırma yapılmıştır. Yeraltı suyu tahkimat verimi üzerinde önemli olumsuz etkilere sahiptir. Kaya saplama paslanma ve zamana bağlı olarak taşıma kapasitelerinin azalması nedeni ile çelik yerine alternatif, korozyon problemi olmayan malzeme arayışlarına gidilmiştir. Kaya saplama zamanla paslanmasını önlemek adına, lifli polimer (FRP) kompozit malzemeler kaya mühendisliği uygulamalarına girmiştir. FRP kompozit kaya saplama ilk kez 1985 yılında İsviçre'li Weidmann tarafından uygulanmıştır (Firep, 2013). Çeliğe nazaran daha yüksek dayanıma sahip, paslanma problemi olmayan, hafif, kolay uygulanabilir, yüksek çekme ve tork testi sonuçları veren bu ürünler fiyatları dolayısı ile henüz çelik kadar yaygın kullanılmamaktadırlar (Kömürlü ve Kesimal, 2012a).

Lif ve polimer matriks malzemeleri, karışım oranları, ekstra katkıları, üretim şekilleri gibi etkenlere bağlı olarak geniş aralıkta değişebilen mekanik parametre değerlerine sahip kompozit malzeme üretilebilmektedir. Karbon fiber lifli polimer (CFRP) kaya saplama çeliğe göre daha rijit

taahkimat özelliği gösterebildiğinden, özellikle tasmanın minimum seviyelerde olması istenen şehirsel bölgelerdeki yeraltı kazılarında daha çok tercih edilebilirler. Çeşitli üreticilerin teknik verilerine dayanarak kaya saplama malzemesi olarak kullanılmakta olan CFRP için tipik çekme dayanımı değerinin 1,5 GPa dolaylarında olduğu, cam lifli polimerler (GFRP) için ise bu değerinin 700 – 800 MPa dolaylarında olduğu söylenebilir. Bu değerler çoğu çelik malzemesinin çekme dayanımının çok üstünde değerlerdir. Çelik belli bir gerilmeden itibaren akma göstermekte olup, 250-300 MPa dolaylarında akmaya başlayan malzemeler uygulamalarda yaygın kullanılmaktadır. CFRP ve GFRP malzemeleri için akma ve tamamen yenilme gerilmeleri arasındaki fark oldukça düşüktür. GFRP kaya saplama malzemesinin elastisite modülü aralığı 50 – 70 GPa gibi çeliğe nazaran düşük değerlerde olması nedeni ile, yüklenmesi sonucu daha çok uzama gösterecek ve konverjansın artmasına sebebiyet verecektir. Katı tahkimat gereksinimi olan zeminler için CFRP daha iyi bir tercih olacaktır (Kömürlü, 2011)

Kaya saplama malzemesinin montajının yapıldığı delik ve enjeksiyon malzemesi ile etkileşimi de taşıma kapasitesi ve gerekli tahkimat basıncının sağlanacağı deformasyon miktarını etkiler (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000). Kaya saplama olarak kullanılan lifli polimer malzemelerde epoksi, poliester ve vinilester türü polimerlerin daha çok kullanıldığı görülmektedir. CFRP ve GFRP, genelde enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmakta olan çimento su karışım harcı ile oldukça yüksek aderans sağlayabilmektedir. Bir yeraltı madeninde kullanılan nervürlü çelik ribarların çekme testinde elde edilen yük değerinden daha yüksek değerler, düz, nervürsüz ve daha kısa boya sahip GFRP saplama ile elde edilmiştir (Kömürlü ve Çolak, 2013). Paslanma problemi olmamasına ve yüksek taşıma kapasitesine sahip olmasına rağmen, fiyatı nedeni ile polimer kompozit kaya saplama için incelenen madende sistematik uygulamaya gidilmediği ve çelik saplama kullanımına devam edilmiştir. (Çolak, 2013).

Yeraltı sularının kaya saplama zamanında çok hızlı korozyona neden olduğu, bahsedilen sülfürik madende korozyonu ekonomik bir şekilde önlemek ve pahalı kaya saplama malzemeleri kullanmamak adına yeni bir uygulama olarak çelik saplama üzeri sıvı halde püskürtülebilen poliüre türü malzeme ile kaplanmıştır.

Püskürtme işlemi sonucu birkaç saniye içinde katılaşmaya başlayan bu malzeme yeraltı yapılarının su yalıtımında kullanılmaya başlamıştır. Poliürenin su yalıtımı malzemesi olarak kullanımına yönelik bir çalışma Şekil 6'da gösterilmiştir. Membran uygulamalarındaki süreksizlik riskine karşılık bu malzeme, önemli avantaj sağlamakta, pratik olarak kesintisiz su yalıtım katmanı oluşturabilmekte, betona ve çeliğe çok iyi yapışma özelliği göstermektedir (Komurlu ve Kesimal, 2012b). Poliüre kaplanan çelik ribar ve "split set" türü kaya saplamalarına yeraltında çekme testleri uygulanmış, kaplamasız hallerinden iki kat ve daha fazla çekme testi değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Kaplamalı ribarlar için çekme aletinin maksimum yükleme kapasitesine ulaşılarak sıyrılmadan testler tamamlanmıştır. Çimentolu enjeksiyon uygulaması yapılmayan split set türü saplamalar için ise elde edilen veriler poliürenin çeliğe nazaran zeminle daha iyi aderansa sahip olduğunu göstermektedir. Çeliğin kırıldığı yüklerde dahi saplamanın sıyrılmadığı görülmüştür. Uzun vadede kaplamalı ve kaplamasız kaya saplamalarının taşıma kapasiteleri arasındaki fark korozyon nedeni ile artmaktadır. Sonuçlara göre uzun ve kısa vadede poliüre türü polimer malzemenin enjeksiyon ve çelik saplama yüzeylerine çok iyi yapışma özelliği gösterdiği, poliüre kaplama ile kaya saplamalarının ekonomik olarak su yalıtımının sağlanabildiği ve taşıma kapasitelerinin önemli oranlarda artırıldığı görülmüştür. (Kömürlü ve Çolak, 2013). Şekil 7'de poliürenin kaya saplamaları üzerine uygulanışı gösterilmektedir.



Şekil 6. Poliüre püskürtülerek yapılan su yalıtımı (Kömürlü ve Kesimal, 2012b)



Şekil 7. Poliürea püskürtülerek kaya saplamalarının kaplanması ve kaplanmış saplama yüzeyi

Öngermeli, sürtünmeli, enjeksiyon dolgulu veya doğrudan zemine temas eden birçok saplama türü geliştirilmiştir. Dalgulu uygulamalarda kaya saplama malzemelerinin yanı sıra enjeksiyon dolgu malzemeleri de tahkimat performansı ve reaksiyonları üzerinde anlamlı ölçüde etkiye sahiptir. Günümüzde sulu zemine iyi yapışabilen, polimerleşme tepkimeleri sulu ortamda hızla gerçekleşebilen ve kimyasal katkıları ile rijitliği değiştirilebilen akrilat bazlı dolgu malzemeleri üretilmektedir. Patlatmadan kaynaklı aynaya yakın yeni uygulanmış kaya saplamalarının gevşemesi konusunda olduğu gibi delik yüzeyinden aktarılan dinamik yüklere karşı enerji absorpsiyonu yüksek olan ve hızla dayanım kazanan bu tip malzemeler avantaj sağlamaktadır (BASF, 2009). Bu konuda, hızla yüksek taşıma kapasitesi sağlayan reçine dolgularının da geleneksel çimento dolgusuna nazaran önemli avantajları vardır (Hoek, 2006). 1956 yılında kaya saplama uygulamaları için ilk reçine dolgunun geliştirildiği ve ilk kartuşlu reçine dolgu uygulamasının da 1959 yılında Almanya'da gerçekleştirildiği bilinmektedir (Hoa, 2008). İlerleyen süreç içerisinde reçine dolgu malzemeleri de gelişim göstermiştir. Tipik bir reçine dolgu uygulamasında iki bir-

leşen kartuşlar halinde deliğe itirilip delik içinde kartuşların delinerek birleşenlerin karışması sağlanır.

Malzeme seçiminin tünelciliğin gelişimi üzerindeki etkilerine en iyi örneklerden biri püskürtme betonun yeraltı yapılarına girmesi ve kaya sapsalamaları ile birlikte kullanımı neticesinde Yeni Avusturya tünel açma metodunun bulunmasıdır (Schubert, 2013). Sıradaki kısımda püskürtme betonun bulunuşu ve geçmişten günümüze gelişimine değinilecektir.

### 3 Püskürtme Beton

Püskürtme betonun tarihsel gelişimine değinmek için öncelikle çimentonun bulunuşu konusunda kısa bir bilgi vermek gerekirse, ilk çimentonun 1824 yılında İngiliz kimyager Joseph Aspdin tarafından elde edildiği ve renk olarak İngiltere'deki portlant adasında bulunan kireçtaşlarına benzediği için portlant çimentosu olarak isimlendirildiği, piyasada satışının başlamasının ise 1845 yılında gerçekleştiği söylenebilir. (Bicik, 2012).

Çimento inşaat ve madencilik sektörünün temel malzemelerinden betonun bir bileşeni olarak kullanılmaktadır. Çimento bulunmadan önce de çeşitli harçlar kullanılmıştır. Beton, eski çağlardan beri agrega gibi granüler malzemeler ile çeşitli bağlayıcıların birlikte kullanıldığı malzemelerdir. Modern betonun ortaya çıkışı portlant çimentosunun elde edilmesi ile başlamıştır (Li, 2011).

İlk donatılı beton, Fransız bahçıvan Joseph Monier tarafından üretilmiştir. Bitki köklerinin saksıları, potları kırmasından dolayı sağlam bir malzeme üretilmesi için demir donatı kullanmıştır. Demir donatılı betona yönelik ilk patent Joseph Monier tarafından 1876 yılında alınmıştır (Bellis, 2011).

Püskürtme betonun bulunuşuna dair elde edilen bilgiler de oldukça ilginçtir. "Gunit" adı ile bilinen ilk püskürtme beton, 20. yüzyılın başlarında Amerikalı tahnitçi Carl Akeley tarafından hayvan modellerini doldurmak için kullanılmıştır. Hava ile katı malzemeyi taşıyan bir sistemin çıkışında su ile karışım sağlanarak uygulama gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir mikserde su ve katı karışımı gerçekleştirilmeyen, doğrudan tabanca ağzında karışım sağlanan bu uygulama günümüzde uygulanan yaş karışım ve kuru karışımından farklıdır. Carl Akeley 1911 yılında çimento tabancası "Cement gun" adındaki bu buluşu için patent almıştır. Karışımın bir mikserde oluşturul-

duktan sonra püskürtülmemesi buluşun yapıldığı tarih düşünüldüğü zaman normal karşılanabilir. Çünkü, mikser Carl Akeley'in patent almasından sadece bir yıl önce 1910 yılında Chester A. Beach tarafından icat edilmiştir (Bicik, 2012). Bu bilgi ışığında, 19. yüzyıldaki beton karışımların manuel olarak hazırlandığı sonucuna varılabilir.

"Gunit" kavramından farklı olarak 1930'lu yılların başlarında Amerikan Demiryolu Mühendisleri Birliği (AREA) "Shotcrete" yani püskürtme beton terimini tanımlamıştır. Çünkü, püskürtme beton uygulamasında Akeley'in uygulamasından farklı olarak katı ve sıvı karıştırıldıktan sonra sistem içinde taşınmakta ve hava ile püskürtülmekteydi. 1950'li yılların başına kadar kuru karışım yöntemini içeren püskürtme beton uygulamasının yaş karışım şeklinde de uygulanmaya başlaması ile farklı iki terimin oluşmasına yönelik tartışmalar yaşanmıştır. AREA tarafından yaş ve kuru karışım olarak ayrılmasızın uygulamaların püskürtme beton başlığı altında toplanması gerektiği önerilmiştir (ACI, 2005). Püskürtme beton, isminin konmasından önce uygulanmaya başlamıştır. İlk püskürtme betonun 1914 yılında uygulandığı bilinmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Bureau madeninde 1914 yılındaki uygulamanın olumlu sonuçları neticesinde, uygulama hızla yaygınlaşmış ve geliştirilmiştir. Çelik hasır üzerine püskürtme beton uygulanması ilk kez 1918 yılında önerilmiştir. 1920 yılı içerisinde ABD'de başka bir madende toplam 2,7 kilometre uzunluğundaki nakliyat galerilerinde püskürtme beton uygulanmıştır. Alman kaynaklarında 1920'li yıllarda püskürtme beton kaplama yöntemi için "spritzbetonmethode" tanımına denk gelinmiştir. Almanya'daki ilk püskürtme beton uygulaması 1922 yılında 6 kilometre uzunluğunda Heimbach tüneline gerçekleştirilmiştir. 1927 yılında Zürih'teki Ulmberg demiryolu tüneline püskürtme beton uygulanmıştır. Püskürtme betonun çelik hasır donatı ile birlikte uygulandığı bu tünele ait bir fotoğraf Şekil 8'de verilmiştir. Çelik bağ ve ahşap tahkimatın birlikte kullanıldığı Kanada Ontario'daki McIntyre madeninde püskürtme betonun ahşapın yarı maliyeti ile alternatifi olarak kullanılabilirdiği belirtilmiştir. ABD Kaliforniya'daki 1930'lu yıllarda tamamlanan 45,8 kilometre uzunluğundaki Hetch Hetchy su tüneline gerçekleştirilen uygulama, püskürtme beton tarihi için önemlidir ve uygulamanın Dünya'da yaygınlaşmasına büyük katkı sağlamıştır (Kovari, 2003a).



Şekil 8. Ulmberg demiryolu tüneline 1927 yılındaki püskürtme beton uygulaması (Kovari, 2013a)

Püskürtme beton uygulamaları çeşitli katkıların kullanımı ile günümüze kadar hızla gelişmiştir. Aşağıda çeşitli katkılara, kullanım amaçları ve beton içerisinde ilk kullanıldığı tarihlere yönelik bilgiler verilmiştir (Fidjestol ve Dastol, 2004; Kömürlü vd., 2013; Arıoğlu vd., 2008):

- Uçucu kül, ilk kez 1929 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Hoover Barajı inşasında kullanılmıştır. Püskürtme beton içerisinde yaygın kullanılmayan katkı, puzolanik malzeme özelliği göstermekte, çimento ikamesi olarak kullanılarak beton maliyetini azaltmakta, agrega ikamesi olarak kullanıldığında ise dayanım değerlerini olumlu yönde etkilemektedir.
- 1944 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde silis dumanının beton katkısı olarak kullanımına yönelik ilk patent alınmıştır. Silis dumanı puzolanik bir katkı olup ince yapısından dolayı mikro boşlukları doldurur ve betonun boşluk oranını azaltır. Su geliri olan yeraltı püskürtme beton uygulamalarında yapışma özelliğini artırır, geri sekme problemini azaltır. Çelik lif katkının beton içerisindeki adekansını ve kullanım verimini artırır.
- İlk, beton katkısı olarak ne zaman kullanıldığına dair bir bilgiye ulaşılamasa da, 1909 yılında Almanya'da fırın cürufunun puzolanik beton katkısı olarak kullanıldığına yönelik bilgi mevcuttur.

Püskürtme beton içerisindeki agrega tane boyu arttıkça geri sekme problemi artacağından, ince agrega kullanılmaktadır, ve bu durum püskürtülebilirlik açısından karışım içinde daha çok su kullanımı ihtiyacına yol açmaktadır. Su/çimento oranı kütlice belli bir değeri geçtiği zaman dayanım düşmeye başlar. Aşırı su/çimento oranına

sahip olmadan istenen akışkanlık değerine ulaşmak için kullanılan akışkanlaştırıcı katkı, püskürtme betonun hidrasyon hızını artırarak erken tahkimat basıncı sağlanması için kullanılan priz hızlandırıcı, püskürtülecek betonun transmikserde donmasını önlemek için kullanılan priz geciktiriciler sık rastlanılan ve ihtiyaca yönelik beton eksikliklerini gidererek püskürtme beton uygulamalarının gelişiminde önemli role sahip olan kimyasal katkılardır (Arıoğlu vd, 2008). Priz geciktirici ve hızlandırıcı katkıların ilk ne zaman kullanıldıklarına yönelik net bir bilgiye ulaşılamamış, akışkanlaştırıcı katkının 1960'lı yılların ortalarından bu yana kullanılmakta olduğu öğrenilmiştir (Mielenz, 1984).

Demir donatı olarak püskürtme beton uygulamalarında hasır halen kullanılmakta olsa da kurulum zamanı, işçilik maliyetleri ve geri sekme problemini artırmasından dolayı hasıra 1970'li yıllarda alternatif olarak çelik lif uygulaması başlatılmıştır. Lif katkı çok eski çağlarda da kullanılmıştır. Örneğin, Romalılar betonlarındaki bağlayıcı malzemelerin kurumasıyla oluşan çatlakların önüne geçmek için at kuyruğu ve saçından elde ettikleri lifleri kullanmışlardır. Çelik lif, betonun çatlak direncini, sünekliliğini ve darbe direncini arttırmaktadır. Uzunluk çap oranı, fiber malzemesinin çekme dayanımı ve geometrik biçimi çelik fiberlerin sınıflamasında kullanılan temel özelliklerdendir. Çelik lif, püskürtme beton için basma ve özellikle çekme dayanımı değerlerinde artışlar sağlamaktadır. Potensiyel çatlak yüzeyinde köprüleme etkisi ile çatlama ve çatlak ilerleme direncini arttırmaktadır. Çelik lif, betonun gevrekliğini azalttığı, darbe dayanımını artırdığı için dinamik yüklemelere karşı betona avantaj sağlamaktadır (Kömürlü, 2012).

Hem hasır hem lif için çelik malzemesi alternatifi olarak günümüzde çeşitli mühendislik polimerlerinin kullanıldığı görülmektedir. Çeliğin paslanma problemi, yeni üretilen mühendislik polimerlerinin yüksek mekanik parametre ve betonla yüksek adezyon değerleri yeni malzemelerin kaya mühendisliğine girmesine yol açmaktadır. Çeliğin alternatifi olarak en yaygın kullanılan polimer lif malzemeleri polipropilen ve poliamid türleridir (Kömürlü ve Kesimal, 2011).

CFRP ve GFRP türü malzemelerin, hasır ve yapı sektöründe donatı olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır. Özellikle yapı sektöründe FRP malzemelerin çeliğin yerini hızla aldığı görülmektedir. Lifsiz, kompozit olmayan polimer hasırlar da üretilmektedir. Dayanımları çok yük-



sek olsa da polimer malzemelerin beton içinde kullanımı için tahkimat deformasyon özellikleri üzerindeki etkileri incelenmelidir. Çünkü, tünel içi deformasyonlar ile tahkimata gelen yükler değişmektedir. Aşırı deformasyona müsaade edilmesiyle gevşemeler oluşacak ve tahkimat ölü yüklerle maruz kalabilecektir. Püskürtülerek uygulanan polimer kaplamaların tünel tahkimat performansları hakkında çalışmalar yeni milenyumda hız kazanmıştır (Kömürlü ve Kesimal, 2012b).

Uluslararası literatürde TSL (Thin spray-on liner), ulusal literatürde PİK (Püskürtülmüş ince kaplamalar) adı ile geçen kaya yüzeyine iyi yapışma özelliği gösteren püskürtülmüş ince kaplama malzemelerin yeraltı açıklıkları için tahkimat özellikleri 1980'li yılların sonundan itibaren incelenmektedir (Öztürk, 2011). Betona nazaran çok kısa süre içerisinde dayanım kazanan ve pratik olarak uygulanabilen PİK ilk olarak Kanada madenlerinde incelenmeye başlamıştır. Başlangıçta poliüretan türü polimer malzeme denenmiştir. 1990'lı yılların sonunda poliüre ve poliüretan birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Güney Afrika'da 1996 yılında PİK malzemesi olarak latex kullanılmıştır. Avusturalya madenlerinde de PİK üzerine araştırmalar yapılmıştır. Tekflex adı altında su bazlı, polimer ve çimento katkılı, Superskin adı altında metakrilat bazlı, RockWeb adlı altında poliüre bazlı diğer PİK malzemeleri de üretilmiş ve 2000 yılına gelindiğinde altı adet PİK malzemesi üreticisi mevcut olmuştur (Tannant, 2001). PİK malzemelerinin verimi üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. PİK, uygulananın pratik olması, zaman kazancı, hızlı kürlenmesi ve püskürtüldükten sonra kısa süre içinde dayanım değerlerinin artması, kaya ve beton yüzeyine yüksek yapışma özelliği göstermesi gibi nedenlerden dolayı avantaj sağlamaktadır. PİK uygulamalarında yenilme, yapışma ile ilgili adesif olarak veya PİK'in makaslama ve çekme gerilmeleri neticesinde yenilmesi ile gerçekleşebilir (Öztürk ve Tannant, 2010). Bu durumu gösteren bir resim Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Hareket etmiş blok ve PİK

PİK'in dezavantajlarına değinilecek olunursa,

kaya kütlelerinin kendisini taşımasına yardımcı olacak bir tahkimat sisteminin, poliüre veya poliüretan gibi %200 - %300 birim deformasyona müsaade edebilen malzemelerle sağlanması, zemin reaksiyonuna bağlı olarak aşırı gevşemenin engellenmesi, katı tahkimat gereksinimine cevap verilmesi için kaplama kalınlığının artırılma ihtiyacı ve maliyetlerin istenmeyen seviyelere ulaşması gerekebileceği söylenebilir. Yüksek dayanım değerlerine sahip olsa da, PİK fazla deformasyona uğraması sonucu süreksizlikler arasında yaşanacak gevşemeleri engelleyemeyecektir, Bunun yanı sıra, püskürtme betona göre çok kısa süre içinde dayanım kazanması, hızlı kaplama oluşturulması kazı sonrası ani gevşeyen malzemenin düşmesini engelleyebilecek ve önemli avantaj sağlayacaktır. Tahkimat mekanizması olarak çelik hasır ve püskürtme beton arasında bir özelliğe sahip olan PİK'in doğrudan püskürtme beton alternatifi olması için kalın malzeme uygulama ihtiyacı maliyetleri artırmaktadır. Diğer taraftan, şişme problemlili killi zeminlerde püskürtme beton tahkimatının kırılmaması için kalın beton malzemeler yerine PİK uygulaması ekonomik olacak, avantaj sağlayacaktır.

Şu ana kadar bahsedilen malzemelerin yanı sıra ABS, akrilik, poliamid, polietilen, polipropilen gibi çeşitli termoplastik malzemelerin püskürtme betona nazaran daha yüksek dayanım değerlerine daha az malzeme maliyeti ile ulaşabileceği, ancak aşırı deformasyona müsaade edebilir tahkimat malzemesi özelliği gösterecekleri belirtilmiştir (Kömürlü ve Kesimal, 2012b) Bahsedilen polimer malzemeler betonla kıyaslanmayacak yüksek enerji emme kapasitelerine, dinamik yüklerle karşı dirence ve darbe dayanımlarına sahiptirler. Dinamik yüklere karşı tahkimatın yüksek dirençli olması, yeraltı yapılarının depreme karşı duraylılığının korunması ve madencilik açısından düşüldüğünde gelecekte artacak olan derin yeraltı madenciliği uygulamalarındaki kaya patlaması problemlerine karşı avantaj sağlamaktadır (Kömürlü, 2011).

Püskürtme beton uygulamasının tünelcilik alanına girmesi ve kaya saplamaları ile birlikte kullanımı tünelcilik adına önemli bir devrim olan Yeni Avusturya metodunun bulunmasına olanak sağlamıştır. Aşırı gevşemeye müsaade etmeden kontrollü deformasyonlar ile kayacı kendine taşıtırmayı amaçlayan çağdaş tahkimat anlayışına yönelik uygulamalar mümkün kılınmıştır. Ancak, püskürtme betonun gevrek malzeme özelliği ve deformasyonlara kırılmadan çok kısıtlı müsaade

etmesi gibi çeşitli etkenlerden dolayı püskürtme beton için katkı ve alternatif püskürtme malzemeleri incelenmektedir. Tahkimat sisteminin zemin için çok katı, çok rijit özellik göstermesi neticesinde erken ve gereksiz tahkimat basınçları sağlanabilecektir. Bu durum sağlam kaya içerisinde açılan tünellerde görülebilmektedir. Zemine bağlı olarak ideal tahkimat reaksiyonu değişeceği için tünelticilik maliyetleri açısından malzeme tercihi son derece kritiktir.

Sıradaki kısımda, günümüzde kullanımına devam edilen, yeni Avusturya metodu bulunmadan önce geleneksel tahkimat anlayışı ile yeraltı yapıları inşa edilirken en önemli yük taşıma elemanı olarak kullanılan çelik bağ tahkimatlarına değinilecektir.

#### 4 Çelik Bağlar

Henüz çelik tahkimatın yaygınlaşmadığı ve ahşapın ana tahkimat malzemesi olarak kullanıldığı dönemlerde, günümüzde kazı yapılabilen pek çok zemin şartlarında kazı yapılamamaktaydı. Çelik bağların kullanımı ile daha bozuk zemin şartlarında kazı yapılması mümkün kılınmıştır. Püskürtme beton yaygınlaşana kadar çelik bağlar ahşap tahkimat ile birlikte kullanılmıştır. Çelik bağların ilk ne zaman kullanıldığına yönelik kesin bir tarihe ulaşılamamış olsa da 1880'li yıllarda İngiliz kömür madenlerinde yaygın kullanılan bir tahkimat malzemesi olduğu görülmektedir (Merivale, 1888). Alman madenlerine ise ilk kez çelik bağların 1862 yılında girdiği biliniyor. Şekil 10'da 1894 yılına ait, bozuk zemin koşulları nedeni ile çelik bağların bitişik olarak uygulandığı New York'taki Hudson tüneline bir resim paylaşılmaktadır. Sıkışma ve şişme problemi olan zeminlerde yapılan kazılar sonucu ortaya çıkan konverjansa müsaade ederken sağlanan tahkimat basıncında azalma yaşanmaması yönündeki gereksinimler neticesinde 1932 yılında eklem yerlerinden birbiri içinde kayabilen çelik bağlar üretilmiştir (Kovari, 2003a). Ayrıca, daha az malzeme kullanarak, düğüm noktalarına yükleri dağıtan ve taşıma kapasitesinde verim sağlayan kafes gövdeli kemerlerin kullanımı çelik bağ tahkimatları adına önemli bir gelişim sağlamıştır.

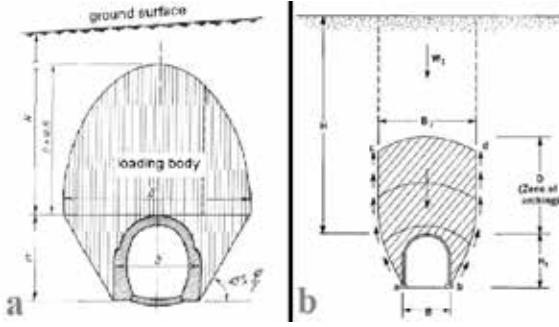


Şekil 10. 1894 yılında Hudson tüneli, New York, Terry Kennedy arşivinden (Brennan, 2004)

Çelik bağ tahkimat tasarımına yönelik yaklaşımların günümüzde en yaygın bilinenleri uygulamadaki gözlemlerine dayanarak çelik bağların taşıdığı yük kemerini tanımlayan Terzaghi tarafından önerilmiştir. Karl von Terzaghi, 1908 yılında henüz 25 yaşındayken Hırvatistan'daki bir hidroelektrik santrali için çelik bağ tahkimat tasarımı yapmıştır. Uzun yıllar içerisindeki tecrübeleri ışığında 1946 yılında Proctor ve White ile birlikte yazdığı "Tunnel with Steel Supports" adlı kitabını yayınlamıştır (Fukushima, 2012). Terzaghi, çelik bağlara gelen yükleri ve oluşan yük kemerinin şeklini, boyutlarını tanımlarken ağırlıklı olarak ahşap ve çelik bağların kullanıldığı patlatmalı kazı yapılan alanlarda yaptığı çalışmalardaki tecrübelerinden yararlanmıştır.

Yük kemerinin tanımlanması, çelik bağlar ile ilgili olarak literatüre önemli katkı sağlamıştır. Yük kemerinin boyutlarına bağlı olarak çelik bağların taşıyacağı yük değişmektedir. Terzaghi'den önce, Bierbaumer'in geleneksel tahkimatların maruz kaldığı yüklerle ilgili önemli pek çok bilgiyi 1913 yılında yayınladığı, yük kemeri kavramından bahsettiği ve Alp dağlarındaki tecrübeleri ışığında boyutlarını tanımladığı bilinmektedir (Bierbaumer, 1913).

Bierbaumer ve Terzaghi'nin tanımladığı yük kemerlerinin geometrileri arasında bazı farklılıklar vardır. Bierbaumer'e göre kemerlenme sınırı tünel tavanı hizasından başlamakta, yan duvarlar hizasında doğrusal bir yenilme sınırı oluşmaktaydı. Terzaghi'ye göre ise kemerlenme sınırı tünel tavanı ve dikleşmiş dairesel bir kayma düzlemi üzerinde başlıyordu. Bierbaumer'e ve Terzaghi'ye göre oluşan yük kemerleri Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. a) Bierbaumer'e göre yük kemeri (Bierbaumer, 1913), b) Terzaghi'ye göre yük kemeri (Terzaghi vd., 1946)

Resimler, kaynaklarından kopyalanmış ve üzerlerindeki bazı açıklamaların dili Türkçe'ye çevirilmemiştir. Resimlerdeki "load body", "ground surface" ve "zone of arching" açıklamaları Türkçeye sırasıyla yük hacmi, yer yüzeyi, kemerlenme bölgesi olarak çevrilebilir.

20. yüzyılın ilk yarısında çoğu geleneksel tahkimat uygulamalarında ana yük taşıma elmanı olarak kullanılmıştır. Çelik bağlar, yük altına girip, gevşeyen kayayı taşıma prensibine dayalı olarak tasarlanmaktaydı. Çelik bağlar ile zemin arasında boşluklar kalması ciddi konverjanslara müsaade etmektedir. Özellikle patlatmalı kazılarda kesit şeklinin düzgün olmaması, zemin ve tahkimat arasındaki boşlukların artması süreksizlikler arasındaki gevşemeye neden olur.

Kaya saplamalarının kullanımı ile deformasyonlar kontrol altına alınıp zeminin gevşemesi neticesinde yük kemeri oluşturması engellenmiştir, kayanın kendisini taşıyan bir tahkimat malzemesi gibi çalışması ve çağdaş tahkimat anlayışının gelişmesi sağlanmıştır.

Yeni tahkimat malzemelerine olan ihtiyaçlar, yeni malzeme seçimlerine olan yönelimler, tünelcilik tarihi boyunca zemin reaksiyonlarının daha iyi anlaşılması ile etkilenmiştir. 19. yüzyılın ikinci çeyreği sayıları hızla artan demiryolu tünelleri çalışmaları tünelciliğin günümüzdeki hızlı ilerleyişi üzerinde etkilere sahiptir. Tünelciliğe yönelik pek çok tanım bu yıllarda ortaya çıkmıştır. Örneğin, zemin reaksiyonları gevşeme, sıkışma, şişme gibi alt başlıklar altında toplanmış, yenilme türlerine yönelik sınıflamalar yapılmıştır. Tünel ismi dahi bu yıllarda konulmuştur. Tünel ismi ilk kez 19. yüzyılın ikinci çeyreğinde İngiltere'deki bir demir yolu tünelleri inşaatında kullanılmıştır. Fransızca çardak anlamına gelen "tonnelle" kelimesinden türetilerek İngilizceye "tunnel" şeklinde girmiştir. Zemin özelliklerinin daha iyi tanınması

ve çelik malzemelerin gelişimi ile 19. yüzyılın bir sonraki çeyreği çelik tahkimat malzemesi olarak tünelciliğe girmiştir. Eski demiryolu tünellerinde halen görülebileceği üzere, çelik bağ, püskürtme beton ve kaya saplamaları bulunmadan önce kalıcı kaplama duvarlar örülmekteymiş (Kovari, 2013a). Bu durumun oldukça büyük zaman kaybına neden olduğu rahatlıkla tahmin edilebilir. Ayrıca bu uygulamada, kesit ile arada kalan boşluklar neticesinde gevşemeye müsaade edilmesi, taş veya tuğlalar arasındaki bağlayıcının kendi veya yapışma özelliklerine bağlı sınırlı tahkimat basıncı sağlaması gibi dezavantajlar vardır.

Çelik bağların kullanılmaya başlaması pratik olarak yüksek tahkimat basınçlarının sağlanmasına olanak tanımıştır. Bu yüzden, tünelcilik tarihinde önemli bir yeniliktir. Ancak, çeliğin paslanma problemi zamanla dayanımında düşüşe sebebiyet vermektedir. Günümüzde çelik bağların yerine mühendislik polimerlerinin kullanımına yönelik bir çalışmaya denk gelinmemiştir. Bundaki en büyük neden çeliğe deformasyon modülü olarak eşdeğer olan polimer malzemelerin çok pahalı olmalarıdır. Örneğin, çelik yerine CFRP, hem dayanım anlamında, hem korozyona uğramama hem de hafifliği nedeni ile uygulanışındaki kolaylığı anlamında avantaj sağlasa da, çeliğe nazaran çok pahalı bir malzeme olmasından dolayı tünelcilikte çelik bağ alternatifi olarak kullanılmamaktadır. Çok deformasyona uğrayan bir malzemenin bağ olarak kullanımı uygun değildir. O yüzden çoğu polimer bu anlamda değerlendirilemez. Diğer taraftan, şişme problemi olan zeminlerde olduğu gibi tahkimat basıncı değerlerinde düşüş olmadan deformasyona müsaade edebilen bir iksa uygulaması için eklem yerlerinden kayabilen çelik bağlar yerine sabit eklemli cam lifli polimer kompozitler avantaj sağlayacaktır. Çeliğin ekonomik olarak su yalıtımını sağlamak adına poliüre kaplı çelik bağ tahkimatları uygulanabilir.

## 5 Enjeksiyon Malzemeleri

Kazı yapılacak yada yapılmış zemini iyileştirmek, su gelirini kesmek, tahkimat elemanları ile zemin arasındaki boşlukları doldurmak gibi çeşitli amaçlarla kullanılmakta olan zemin enjeksiyonları için uzun yıllardır en yaygın kullanılan enjeksiyon malzemesi olarak geleneksel çimento ve su karışımı görülse de, günümüz malzeme biliminin geldiği noktada çok daha avantajlı enjeksiyon malzemelerinin olduğunu söylemek mümkündür. Enjeksiyon malzemesininin çatlak-

lara iyi nüfuz etmesi için düşük viskozite değerlerine sahip olması, kolay uygulanabilir olması, hızlı reaksiyon göstermesi ve erken tahkimat basıncı sağlaması, ıslak zeminlere yapışabilmesi ve sulu ortamda katılaşma tepkimelerinin etkilenmemesi malzeme seçiminde önem arz eden avantajlardandır (BASF, 2009).

Günümüzde üretilen akrilat bazlı enjeksiyon malzemeler bu sayılan özellikler açısından tercih edilebilir malzemelerdir. Kimyasal katkılarla dolgu malzemesinin sıvı fazda kalma süresi etkilenmemekte olup, bu süre akrilatlar için tipik olarak bir ile kırk dakika arasında değişmektedir. Bu enjeksiyon malzemeleri için sulu ortamlarda polimerleşme reaksiyonları gerçekleşebildiği için ıslak zeminleri iyi bağlama özelliğine sahiptir. Ayrıca, sıvı fazda kalma süresi (jel zamanı) en kısa enjeksiyon türü olmasa da polimerleşme tepkimelerinin başlaması ile dayanım değerleri hızlı artış göstermekte olan akrilatlar, bu çalışmada ismi geçmekte olan tüm enjeksiyon malzemeleri arasında en kısa sürede en yüksek dayanım değerlerine ulaşan türdür. Akrilat bazlı zemin enjeksiyon malzemeleri yeni milenyumda tünelliliğe girmiş ve hızla popülerleşmekte olan malzemelerdir.

Poliüre ve poliüretan bazlı dolguların birkaç saniyeye kadar düşebilen sıvı fazda kalma süreleri vardır. Kimyasal tepkimeler devam ederken ortamdaki su özellikle poliüretan bazlı bazı ürünlerin dayanım değerlerini olumsuz yönde etkilebilmektedir (Kömürlü ve Kesimal, 2012c). Ancak, ortamda su bulursa dahi polimerleşme tepkimeleri verimli gerçekleşebilen, su geliri kesmek için kullanılmakta olan poliüretan ürünler de mevcuttur. Özellikle poliüretan türü enjeksiyon malzemeler kendi içerisinde önemli farklılıklar göstermektedir, bu yüzden poliüretan bazlı enjeksiyon malzemeler temin edilirken ürün özellikleri detaylı sorgulanmalıdır.

Poliüretan, kauçuk yerine kullanılmak üzere, ünlü bilim adamı Prof. Dr. Otto Bayer tarafından 2. Dünya Savaşı'nın ilk yıllarında bulunmuştur. O yıllardan bu yana bilim adamlarınca sürekli geliştirilen poliüretan formülasyonları sayesinde artık günlük yaşantımızın her evresinde poliüretan içeren bir ürün yer almaktadır. Poliüretan köpük ise 1954 yılında bulunmuştur (Bilir, 2009). Poliüretan köpüğü oluşturan sıvı fazdaki iki birleşen poliöl ve izosiyanat birlikte ekzotermik olarak kimyasal tepkimeye girerler (Usta vd., 2009). Reaksiyon ile üç boyutta köpürerek ilerleme gösterildiğinden dolayı, malzeme içinde bulunduğu

hacmin boşluklarını doldurarak onun şeklini alır. Poliüretan köpüklerin yayılma özelliği yüksektir (Li vd., 2000). Jel zamanı geçtikten sonra yüksek oranlarda şişme özelliği gösterebilen poliüretan köpük malzemelerin zeminde yaşanan düşmeler nedeni ile oluşabilecek boşlukları doldurmak için madencilik uygulamalarında kullanımı artmaktadır. Bu kapsamda, poliüretanın 1968 yılında İskoçya'da kömür madenciliğinde kullanıldığı ve Dünya'da hızla yayıldığı görülmektedir (DEEDI, 2010).

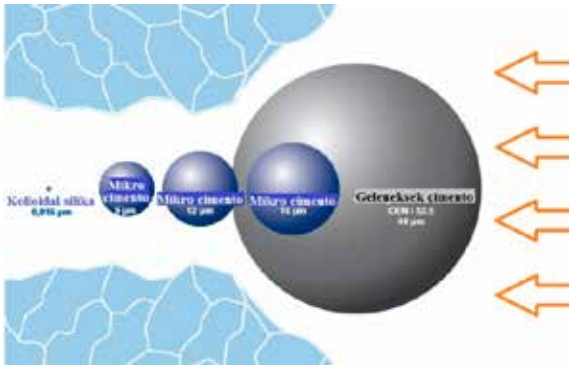
Poliüre de poliüretan gibi izosiyanat bazlı bir kopolimerlerdir. İlk kez 1959 yılında geliştirilmiş ve 1960'lı yıllar boyunca sadece spandeks malzemesi olarak kullanılmışlardır. Mekanik özellikleri zamanla anlaşılan ve iyileştirilen poliüreler, 1990'lı yıllardan itibaren yalıtım amaçlı yüzey kaplama malzemesi olarak püskürtme yöntemi ile uygulanmaktadırlar. Poliürenin PIK malzemesi ve su yalıtım malzemesi olarak kullanımının yanı sıra, yeni milenyumda zemin enjeksiyon malzemesi olarak ta kaya mühendisliğine girdiği görülmektedir.

Zemini güçlendirmek amacı ile uygulanmakta olan enjeksiyonlar bazı termoset polimer malzemeler gibi sıvı fazda uygulanabileceği gibi koloidal silica, mikro çimento veya geleneksel çimento gibi katı içerikli sulu süspansiyon enjeksiyon malzemeleri şeklinde de uygulanabilir. Termoset polimerler katı partikül içermedikleri için difüzyon verimini jel süresi ve viskoziteleri belirler (Kömürlü ve Kesimal, 2012a). Bu anlamda, bahsedilen akrilat türü yeni nesil enjeksiyon malzemeleri kimyasal katkılar ile çok düşük viskozite değerlerine sahip olabilmekte ve avantaj sağlamaktadır. Katı içerikli enjeksiyonlarda ise partikül boyutları çatlaklara nüfuz etme açısından belirleyici etkiye sahiptir.

Mikro çimento, kullanımı yukarıda bahsedilen polimer malzemelere nazaran daha düşük maliyetlere sahip ve günümüz tünellerinde kullanımı yaygınlaşan bir enjeksiyon malzemesidir. Ancak, yeraltı sularından hidratasyon tepkimeleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Tipik olarak %90-95 dolaylarında tane boyutu 15 mikronun altında olan bu tür çimentolar zemine nüfuz etme anlamında geleneksel çimentolara nazaran önemli avantaja sahiptirler.

Silikon dioksit bazlı koloidal nanometrik silika jeller düşük viskozite değerleri nedeni ile uygulama kolaylığı sağlamakta olan ve hızlandırıcı katkı ile jel zamanı 10 dakika gibi sürelerle kadar düşürü-

lebilen ekonomik ve yeni enjeksiyon malzemeleridir. Yeraltı suları koloidal silikalar için verimi düşürür. Sulu olarak enjekte edilmekte olan koloidal silikalar için, beton oluşumunda olduğu gibi ortamda aşırı su bulunmamalıdır. Su, katalizör katkı ve silikon dioksit yüzeyi arasındaki kimyasal etkileşim ile taneler birbirlerine yapışırlar (Holter ve Hognestad, 2012). Koloidal silikon dioksit enjeksiyonlar ince tane boyutları nedeni ile mikro çimentoya nazaran çok daha dar çatlaklara nüfuz edebilir. Şekil 12’de geleneksel, mikro çimento ve koloidal silika boyutları ve çatlaklara nüfuz etkileri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 12. Geleneksel, mikro çimentolar ve koloidal silikaların çatlaklara girmesi (BASF, 2009 kaynağından düzenlenmiştir)

Mikro çimento ve koloidal silika kimyasal enjeksiyonlara nazaran daha ucuz olsa da dayanım değerleri ve sulu ortamlardaki performansları düşünüldüğünde uygulamaya bağlı olarak daha pahalı, akrilat veya epoksi bazlı kimyasal enjeksiyon malzemeleri yüksek fiyatlarına rağmen tercih edilebilirdir. Günümüz uygulamalarında yerini hızla almakta olan polimer bazlı yeni enjeksiyon malzemeleri tünelticilik uygulamalarında son dönemlerde yaşanan önemli gelişmeler arasındadır.

## 6 Sonuç

Yeni malzemelerin uygulama alanlarına girmesi ile tarih boyunca kaya mühendisliği adına devrimler yaşanmış ve geliştirilen yeni yöntemlerin çeşitli eksiklikleri yeni malzeme seçimleri ile giderilebilmiştir. Kaya mühendisliğinin gelecekteki yönelimleri doğrultusunda yeni malzemelerin uygulama alanlarına gireceği, bazen de yeni malzemelerin kaya mühendisliği uygulamalarını yönlendireceği tahmin edilebilmektedir. Örneğin, betonun püskürtülerek uygulanmaya başlaması ve yeraltı yapıları için tahkimat malzemesi olarak kullanılmaya başlaması, çelikten kaya saplama-

larının üretilmesi ve püskürtme beton ile birlikte kullanımı geleneksel tahkimat anlayışını değiştiren yeni Avusturya tünel açma metodunun bulunduğu önemli etkenlerdir.

İnsanlar tarihin eski dönemlerinden itibaren çeşitli nedenlerden dolayı yeraltını kullanma gereksinimi duymuşlardır, günümüzdeki artmış şehir nüfusları ve yüzeydeki kısıtlı kullanım alanlarından dolayı yeraltı kullanımına ihtiyaç geçmişe nazaran daha çoktur. Günümüz şartlarında kazı yapılan pek çok zemin şartlarında tahkimat malzemelerinin yetersizliği nedeni ile geçmişte yeraltı açıklıkları oluşturulamamıştır.

Bundan sonraki süreçte sayıları artacak olan yeraltı yapılarına olan ihtiyaç, uygulama alanlarındaki verim ve maliyetler açısından gelişen malzeme bilimi yakından takip edilmelidir. Günümüzde yüksek dayanımlı yeni mühendislik polimerleri üretilmektedir. Mekanik özellikleri çok geniş aralıkta değişen, dinamik yüklere karşı yüksek direnç gösteren, korozyon problemi olmayan, kolay uygulanabilir, hafif mühendislik polimerleri üretilmekte ve türetilmektedir. Yeni mühendislik polimerlerinin yeraltı yapılarında gelecek süreçte daha yaygın olarak kullanılabilirliği görülmektedir.

Çalışmayı toparlamak adına, geçmişten günümüze kaya mühendisliğinin yeni kilometre taşlarına, kayaya yeni sürprizler yapılarak ulaşılabildiği ve bu sürprizlerin önemli oranda yeni malzeme seçimleri ile ilgili olduğu söylenebilir.

## Teşekkür

Yazarlar, katkılarından dolayı Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER’e teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- ACI 506R-05, 2005, Amerika Beton Enstitüsü Raporu, Michigan, 40 p.
- Adès, H., 2007, A Traveller’s History of Egypt, Chastleton Travel, 48 p.
- Apostol, T., 2004, The tunnel of Samos. Engineering and Science, 1: 30-40.
- Arıoğlu, E., Yüksel A., Yılmaz A.O., 2008, Püskürtme beton bilgi föyleri-Çözümlü problemler, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İstanbul, 296 p.

- BASF, 2009. Solutions for tunnelling and mining injections (Brochure of injection products), Zurich, 12 p.
- Baugh, G.C., Elrington, C.R., 1985. A history of the country of shropshire, Victoria country history, 11: 21-23.
- Bellis, M., 2011. The history of concrete and cement, <http://inventors.about.com/library/inventors/blconcrete.htm>
- Bicik, M., 2012, Dünyada ilkler, Tutku, Ankara, 366 p.
- Bilir, M.H. 2009, "Yer Fıstığı Kabuğundan Üretilen Poliüretan Tipi Köpük ile Safranin ve Remazol Brillan Blue R'nin Adsorpsiyonunun İncelenmesi" Kilis Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Bierbaumer, A., 1913, Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerkes, W.Engelmann, Leipzig, 101 p.
- Brennan, J., 2004, Beach Pneumatic (Part 22: The beach shield has been introduced), .... <http://www.columbia.edu/~brennan/beach/chapter22.html>
- Brown, L., 2006, A brief history of Eiffel Tower, [www.suite101.com](http://www.suite101.com)
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000, Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, Tunnelling and Underground Space Technology, 15: 187-213.
- Çolak, Ü., 2013, Kişisel Görüşmeler, Çayeli Bakır İşletmeleri, Rize.
- DEEDI (Department of employment, economic development and innovation, Queensland Government), 2010. "The Use of Polymeric Chemicals in Queensland Coal Mines", Technical Report, 22 p.
- Esdale, J., 1839, Letters from Red Sea, Egypt and the Continent, SL Hyder, Calcutta, 212 p.
- Firep, 2013, <http://en.firepworld.com/company/profile>
- Fukushima, H., 2012, History of tunneling, [http://homepage2.nifty.com/Lithosphere\\_Tec/Preface2.pdf](http://homepage2.nifty.com/Lithosphere_Tec/Preface2.pdf)
- Helsey, R.W., Strange, W.C., 2008, A game-theoretical analysis of skyscrapers, Journal of Urban Economics, 64: 49-64.
- Hoek, E., 2006. Kaya Mühendisliği (Türkçeye tercüme: Karakuş ve Başarır). Türkiye Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 319 p.
- Holter, K.G., Hognestad, H.O., 2012. Modern pre-injection in underground construction with rapid-setting microcements and colloidal silica – applications in conventional and TBM-tunnelling, Geomechanics and Tunnelling, 5, 1: 49-56.
- ITA, 2013, Ancient periods of tunnelling, [www.ita-aites.org/en/cases-histories/history/ancient-period](http://www.ita-aites.org/en/cases-histories/history/ancient-period)
- Kemp, J.B., 2005, Ancient Egypt, Routledge, 159 p.
- Kovari, K., 2003a, History of the sprayed concrete lining method-part I: milestones up to the 1960s, Tunnelling and Underground Space Technology, 18: 57-69.
- Kovari, K., 2003b, History of the sprayed concrete lining method-part II: milestones up to the 1960s, Tunnelling and Underground Space Technology, 18: 71-83.
- Kömürlü, E., 2011. "The future directions of engineering rock mechanics", Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği 50. yıl kutlamaları yarışma raporu.
- Kömürlü, E., 2012. Kaya ve Taneli Malzemelerde Yanal Gerilmelerin Tahkimat Tasarımı Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi FBE, Trabzon, Türkiye, 181 s.
- Kömürlü, E., Çolak, Ü., 2013. Poliürea kaplamalı kaya saplamalarının tahkimat performanslarının incelenmesine yönelik Çayeli Bakır İşletmelerindeki yayınlanmamış ölçümler
- Kömürlü, E., Kesimal, A., 2011, Polimer fiber katkının tünelcilikte kullanılan püskürtme beton tahkimatı üzerindeki etkileri, 10. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu (KAYAMEK'2011) Bildiriler kitabı, pp. 47-55, Ankara, Türkiye
- Kömürlü, E., Kesimal, A., 2012a, New engineering materials for underground constructions, 16. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi (IMMC 2012) bildiriler kitabı, pp. 307-319, İstanbul, Türkiye
- Kömürlü, E., Kesimal, A., 2012b, Using sprayed polymer as tunnel support, Proc. 7th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 7), pp. 1486-1499, Seoul, South Korea
- Kömürlü, E., Kesimal, A., 2012c. Poliüretan malzeme ile güçlendirilmiş zemin dayanımının incelenmesi, 14. ulusal zemin mekaniği ve temel mühendisliği kongresi bildiriler kitabı, 631-642, Isparta.
- Kömürlü, E., Kesimal A., Bekar, H., 2013, Uçucu kül katkının çelik lifli betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkileri. Türkiye Uluslararası 23. Madencilik Kongresi ve Sergisi (IMCET 2013) bildiriler kitabı, s. 1017-1024, Antalya, Türkiye
- Li, Z., 2011, Advanced Concrete Technology, John Wiley & Sons, New Jersey, 624 p.
- Li, S., Vatanparast, R., Lemmetyinen, H., 2000. Cross-linking kinetics and swelling behaviour of aliphatic polyurethane, Polymer, 41: 5571-5576.
- Merivale, J.H., 1888, Notes and Formulas for Mining Students, Crosby Lockwood & Son, London, 157 p.
- Mielenz, R.C., 1984, History of chemical admixtures

- of concrete, *Concrete International*, 6: 40-53
- Öztürk, H., 2011, Püskürtülen ince kaplamaların elastik malzeme özellikleri, *Madencilik*, 50: 41-45
- Öztürk, H., Tannant, D.D., 2010, Thin spray-on liner adhesive strength test method and effect of liner thickness on adhesion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 47: 808-815.
- Perez, H.T., 1952, Tunneling costs drop way down when bolts hold up tunnel roof, *Constr. Methods Equipment*, 48.
- Roland, G., Claudine, B., 1997, *The Canal du Midi* (İngilizce tercümesi), MSM, Houston, 113 p.
- Snyder, E., 1996, *Brooklyn: An illustrated history*, The Brooklyn Historical Society, New York, 255 p.
- Stephan, A., Frohlich, A., Klupfel, A., 1918, Verfahren zum abfangen und sichern des hangenden und der stosse im bergbau ohne stutzung von unten. Patentschrift Nr. 302909, Klasse 5c. Gruppe 4, Pat 25. Juli 1913y Ausgegeben 7. Januar 1918, Kaiserliches Patentamt Berlin.
- Tannant, D.D., 2001, Thin Spray-on Liners for Underground Rock Support, 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey(IMCET 2001), pp. 57-73, Ankara, Türkiye
- Terzaghi, K., Proctor, R.V. ve White, T.L., 1946, *Rock Tunneling with Steel Supports*, CSS Co.
- Usta, N., Tuzcu, H., Atlıhan A.B. 2009. Poliüretan Esaslı Malzemelerde Alevsiz Yanma, *Putech Poliüretan Sanayi Dergisi*, 2: 56-60.
- Van, C.L., 2008. Numerical analysis of the interaction between rockbolts and rock mass for coal mine drifts in Vietnam, PhD Thesis, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany, 182 p.
- Wahlstorm, E., 1973, *Tunneling in Rock*, Elsevier, Amsterdam, 250 p.