

BAZI KUMTAŞLARINDA MEKANİK, İNDEKS VE PETROGRAFİK ÖZELLİKLER ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN EŞLENİK İLİŞKİ ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

A Study of Relationships Among Mechanical, Index and Petrographic Properties of Some Sandstones Using Canonical Correlation Analysis

A. Erhan TERCAN^(*)
Bahtiyar ÜNVER^(*)
Bülent TİRYAKI^(****)
Deniz ÖZBİLGİN^(****)

ÖZET

Kumtaşlarına ilişkin mekanik ve indeks özelliklerin petrografik özelliklerden önemli ölçüde etkilendiği bilinmektedir. Söz konusu kayaç özellikleri arasındaki etkileşimler ise oldukça karmaşıktır. Bu çalışmada Ankara çevresinden alınan kumtaşlarının mekanik-indeks ve mekanik-petrografik özellik çiftleri arasındaki ilişkiler eşlenik ilişki analizi kullanılarak incelenmiştir. Mekanik özellikler olarak tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ve P dalga hızı; indeks özellikler olarak Shore scleroscope sertliği, NCB koni delici sertliği, Schmidt geri sıçrama sayısı ve nokta yükleme dayanımı indeksi; petrografik özellikler olarak da doku katsayısı, çimentolaşma katsayısı, mineral tanesi /kayaç parçası oranı ve mineral tanesi ortalama boyu dikkate alınmıştır. Bu değişken kümelerinin eşlenik ilişki analizi ile incelenmesi sonucunda mekanik özellikler arasında eşlenik değişken çiftlerine en çok katkı yapan değişkenin P dalga hızı olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Eşlenik İlişki Analizi, İndeks Özellikler, Kumtaşı, Mekanik Özellikler, Petrografik Özellikler

ABSTRACT

Mechanical and index properties of sandstones are known to be largely affected by their petrographic properties. However, the interactions between these properties are quite complex. In this study, the relationship between mechanical - index properties and also mechanical - petrographic properties of sandstones collected around Ankara are investigated by using canonical correlation analysis. Mechanical properties included uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and P wave velocity; index properties, Shore scleroscope hardness, NCB cone indenter hardness, Schmidt hammer rebound number and point load strength index; petrographic properties are texture coefficient, cementation coefficient, ratio of mineral grain to rock fragments and mean size of mineral grain. It is seen from canonical correlation analysis of the sets of these variables that the most contributing variable to the pairs of the canonical variables among the mechanical properties is P wave velocity.

Keywords: Canonical Correlation Analysis, Index Properties, Sandstone, Mechanical Properties, Petrographic Properties

^(*) Prof.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, erhan@hacettepe.edu.tr

^(***) Yrd.Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara

^(****) Maden Yük.Mühendisi, MTA Genel Müdürlüğü, Eskişehir Yolu, Ankara

1.GİRİŞ

Kayaçların dolaylı çekme, tek eksenli basma ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri kaya birimleri içersinde oluşturulacak mühendislik yapılarının projelendirilmesinde büyük bir önem taşır. Bu özellikler, aynı zamanda kayaçların petrografik ve indeks özellikleri ile yakından ilişkilidir. Bu ilişkileri kullanarak literatürde mekanik özellikleri indeks ve petrografik özelliklerden kestirmek amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır (Shakoor ve Bonelli,1991; Ulusay vd, 1994; Tuğrul ve Zarif, 1999; Kahraman, 2001; Yılmaz ve Sendir, 2002; Yaşar ve Erdoğan, 2004; Tsiambaos ve Sabatakakis, 2004).

Örneğin; Shakoor ve Bonelli (1991), seçilmiş kumtaşlarında petrografik, mühendislik indeks ve mekanik özellikler arasındaki ilişkileri inceleyip mekanik özellikleri diğer özelliklerden kestiren doğrusal modeller geliştirmiştir. Benzer şekilde Ulusay vd. (1994), Kozlu-Zonguldak' tan alınan kumtaşı örneklerinde mekanik özellikleri ile petrografik ve indeks özellikleri ilişkilendirmiştir. Tuğrul ve Zarif (1999), seçilmiş granitlerin petrografik ve mühendislik özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Bununla birlikte, bütün bu çalışmalar, tek ya da çok değişkenli regresyon analizlerine dayandırılmış, ancak değişken kümelerindeki eşlenik ilişkiler araştırılmamıştır. Örneğin, mekanik özellikler (tek eksenli basınç dayanımı, P dalga hızı, elastisite modülü) kümesi ile indeks özellikler (Shore sertliği, NCB koni delici değeri, Schmidt geri sıçrama sayısı, nokta yükü dayanımı indeksi) kümesi arasındaki eşanlı ilişkiler incelenmemiş, bütün bu değişkenler birlikte dikkate alındığında, hangi değişkenlerin en önemli olduğu ve bu değişkenler kümesi çifti arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, Ankara çevresinden alınan kumtaşı örneklerinde mekanik-indeks ve mekanik-petrografik özellik kümeleri arasındaki eşlenik ilişkileri incelemektir. Bu amaçla eşlenik ilişki analizi (canonical correlation analysis) ayrıntılı bir şekilde tanıtılarak, alınan örneklerin mekanik, indeks ve petrografik özelliklerine ilişkin istatistiksel bilgiler verilmiştir. Daha sonra mekanik- indeks ve mekanik- petrografik özellik kümelerine eşlenik ilişki analizi uygulanmıştır. Sonuçlar P-dalga hızı değişkeninin kumtaşları içinde en etken değişken olduğunu göstermiştir.

2. EŞLENİK İLİŞKİ ANALİZİ

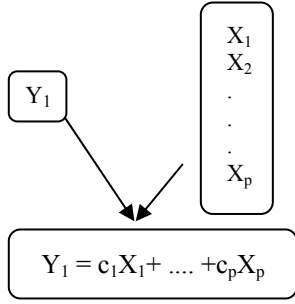
Eşlenik ilişki analizi (EİA), her biri birden çok değişken içeren iki küme arasındaki doğrusal ilişkileri inceleyen çok değişkenli istatistiksel bir yöntemdir. Hotelling (1936) tarafından geliştirilen bu teknik, iki kümedeki değişkenlerin, aralarındaki ilişki en yüksek olacak şekilde doğrusal birleşim çiftlerinin oluşturulmasına dayanır. Doğrusal birleşim çiftlerinin sayısı, en küçük kümedeki değişken sayısına eşittir. İlk doğrusal birleşim çifti en yüksek, ikinci doğrusal birleşim çifti ikinci en yüksek eşlenik ilişki katsayısına sahiptir. Doğrusal birleşim çiftlerinin bu şekilde oluşturulması küçük kümedeki değişken sayısına ulaşılan kadar devam eder. Doğrusal birleşimlerin bir özelliği üretilen bir çift ile diğer çiftler arasında hiçbir ilişkinin olmamasıdır. Eşlenik ilişki terimi kanonik korelasyonun karşılığı olarak eşlenmiş doğrusal bileşenler arasındaki ilişkiden türetilmiştir.

Eşlenik İlişki Analizi (EİA), diğer çok değişkenli istatistik tekniklerle yakından ilişkilidir. Örneğin EİA, çoklu regresyon analizinin genelleştirilmiş bir şeklidir. Çoklu regresyonda tek bir bağımlı değişkenle birden çok bağımsız değişken arasında en yüksek ilişkiyi verecek doğrusal birleşim aranırken EİA'da bağımlı değişken sayısı birden fazladır. Diğer bir ifadeyle EİA'da birden çok bağımlı değişken ile yine birden çok bağımsız değişken arasında en yüksek ilişki verecek eşlenik doğrusal birleşimler aranır (Şekil 1). Diğer bir benzerlik Temel Bileşenler Analizi (TBA) ile kurulabilir: hem EİA, hem de TBA birer boyut indirgeme tekniğidir. EİA'nde değişkenler kümesi çifti arasındaki ilişkiler birkaç eşlenik değişken çifti ile açıklanmaya çalışılırken, TBA'da ham verilerdeki değişkenlik daha az sayıdaki temel bileşen ile açıklanır.

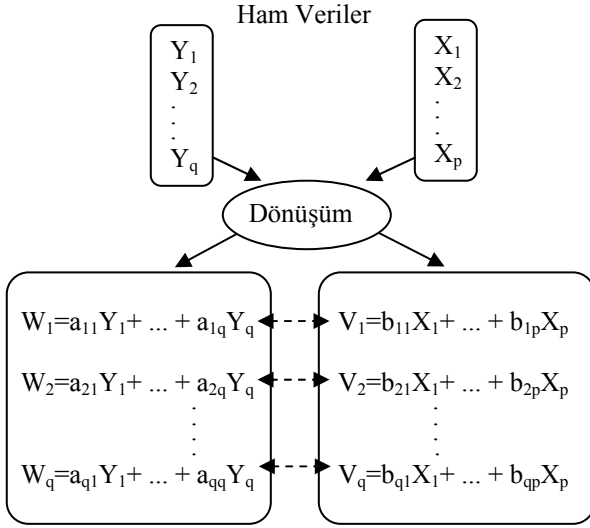
2.1. Eşlenik Değişkenler ve Eşlenik İlişkiler

Eşlenik ilişki analizinde iki değişkenler kümesi arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılır. Bunun için her bir kümedeki değişkenlerden aralarında en yüksek ilişkiyi verecek doğrusal birleşim çifti oluşturulur. Bu doğrusal birleşimler eşlenik değişken, çiftleri oluşturan eşlenik değişkenler arasındaki ilişkilerde eşlenik ilişki olarak adlandırılır. Eşlenik ilişki ve değişkenlerin nasıl hesaplandığına ilişkin öz bilgi aşağıda verilmiştir.

Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi



Eşlenik İlişki Analizi



Şekil 1. Çoklu regresyon ve eşlenik ilişki analizi arasındaki farkın şematik gösterimi.

Daha ayrıntılı bilgiye Anderson (1984)' dan ulaşılabılır. Bu amaçla $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_p)$ p adet durağan rastlantı fonksiyonundan oluşan bir kümeyi, $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_q)$ ise q adet durağan rastlantı fonksiyonundan oluşan diğer bir kümeyi gösterebilir. Ayrıca ilk kümedeki değişken sayısı ikinci kümedeki değişken sayısından küçük ($p \leq q$) olsun. Bu durumda \mathbf{X} ve \mathbf{Y} nin birleşik ilişki matrisi,

$$Kor \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{XX} & \mathbf{R}_{XY} \\ \mathbf{R}_{YX} & \mathbf{R}_{YY} \end{bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde gösterilebilir. Yukarıdaki ifadede; \mathbf{R}_{XX} , \mathbf{X} kümesine ait ilişki matrisini, \mathbf{R}_{XY} , \mathbf{X} ve \mathbf{Y} arasındaki ilişki matrisini, \mathbf{R}_{YY} ise \mathbf{Y} kümesine ait ilişki matrisini göstermektedir. \mathbf{X} 'i ve \mathbf{Y} 'yi oluşturan rastlantı fonksiyonlarının doğrusal birleşimi:

$$\mathbf{W} = \mathbf{a}^T \mathbf{X} = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p \quad (2)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{b}^T \mathbf{Y} = b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + \dots + b_q Y_q \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadelerde T, vector /matrisin evriğini (transpozunu) göstermektedir. Eşlenik ilişki analizinde \mathbf{a}^T ve \mathbf{b}^T ağırlık vektörleri \mathbf{W} ve \mathbf{V} arasındaki ilişki

$$\mathbf{a}^T \mathbf{R}_{XY} \mathbf{b} \quad (4)$$

en yüksek olacak şekilde belirlenir. Bunu yaparken \mathbf{a}^T ve \mathbf{b}^T ağırlık vektörleri, \mathbf{W} ve \mathbf{V} nin varyansı bire eşit olacak şekilde aşağıdaki gibi normlandırılır.

$$\mathbf{a}^T \mathbf{R}_{XX} \mathbf{a} = 1 \quad \text{ve} \quad \mathbf{b}^T \mathbf{R}_{YY} \mathbf{b} = 1 \quad (5)$$

Bu durumda problem, (5) kısıtları altında (4) ifadesini en yüksek yapacak \mathbf{a}^T ve \mathbf{b}^T vektörlerinin bulunmasına indirgenir. Bu problemin Lagrange optimizasyon yöntemi ile çözümü

$$\left| \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{R}_{YX} \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{R}_{XY} - \rho^2 \mathbf{I} \right| = 0 \quad (6)$$

$$\left| \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{R}_{XY} \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{R}_{YX} - \rho^2 \mathbf{I} \right| = 0 \quad (7)$$

ile verilen determinant denklemlerine yol açar.

(6) ve (7) eşitliklerinde $\mathbf{R}_Y = \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{R}_{YX} \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{R}_{XY}$ ve $\mathbf{R}_X = \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{R}_{XY} \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{R}_{YX}$ nin özdeğerleri aynı olup en büyük özdeğer λ_1 , \mathbf{W} ve \mathbf{V} arasındaki eşlenik ilişki katsayısının karesine eşittir ($\lambda_1 = \rho^2$). \mathbf{R}_Y ve \mathbf{R}_X matrislerin en büyük özdeğerine karşılık gelen özvektörler ise sırasıyla; aranan \mathbf{b} ve \mathbf{a} ağırlık vektörlerini verir. \mathbf{W} ve \mathbf{V} eşlenik değişken çifti ile ilişkisiz diğer doğrusal bileşim çiftleri ayrıca üretilebilir. Diğer eşlenik değişken çiftleri (\mathbf{W}_i ve \mathbf{V}_i) oluşturulurken küme içindeki ve kümeler arasındaki eşlenik değişkenlerin birbirinden bağımsız olmalarının sağlanması gerekir, ve matematiksel olarak,

$$\mathbf{a}_i^T \mathbf{R}_{XX} \mathbf{a}_j = 0 \quad \mathbf{b}_i^T \mathbf{R}_{YY} \mathbf{b}_j = 0 \quad \mathbf{a}_i^T \mathbf{R}_{XY} \mathbf{b}_j = 0 \quad (8)$$

şeklinde ifade edilir. Bununla birlikte, \mathbf{W}_i ve \mathbf{V}_i eşlenik değişkenlerini bulmak amacıyla (4) ifadesinin maksimum hale getirilmesi yeni eklenen kısıtlardan etkilenmez. Bu durumda diğer eşlenik ilişki katsayıları ve değişkenler, \mathbf{R}_Y

ve R_X in diğer özdeğerlerini ($\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p$) ve buna karşılık gelen özvektörlerini hesaplayarak elde edilebilir. Λ ; köşegeninde eşlenik ilişki katsayılarını ($\rho_1 > \rho_2 > \dots > \rho_p$) içeren $p \times p$ boyutunda köşegen bir matrisi, \mathbf{A}^T ; kolonlarında R_X in özvektörlerini içeren $p \times p$ boyutlu ve \mathbf{B}^T ise yine kolonlarında R_Y nin özvektörlerini içeren $q \times q$ boyutlu gerçel bir matrisi gösterdiğinde eşlenik değişkenler

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}^T \mathbf{X} \text{ ve } \mathbf{V} = \mathbf{B}^T \mathbf{Y} \quad (9)$$

matris çarpımlarından bulunur. \mathbf{W} ve \mathbf{V} eşlenik değişkenler kümesinin birleşik ilişki matrisi ise

$$\text{Kor} \begin{pmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{V} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{I}_q \end{bmatrix} \quad (10)$$

dir. (10) ifadesinde \mathbf{I}_p ve \mathbf{I}_q , sırasıyla $q \times q$ ve $p \times p$ boyutlu birim matrisleri göstermektedir. (10) nolu ifadeden aynı dereceden eşlenik değişkenlerin ilişkili diğerlerinin ilişkisiz olduğu görülmektedir.

$$\text{Kor}(W_i, W_j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}, \quad (11a)$$

$$\text{Kor}(V_i, V_j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}, \quad (11b)$$

$$\text{Kor}(W_i, V_j) = \begin{cases} \rho_i & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (11c)$$

Eşlenik ilişkiler, ham değişkenlerin (\mathbf{X} ve \mathbf{Y} lerin) ölçeklerindeki değişimden etkilenmezler. Örneğin; değişkenlerin ölçüm birimi değişse bile, eşlenik ilişkiler aynı kalır. Bununla birlikte, ağırlık vektörleri değişir. İlk eşlenik ilişki ρ_1 , \mathbf{X} ve \mathbf{Y} arasındaki basit, ya da çoklu bütün ilişkilerden daha büyüktür.

2.2. Eşlenik Değişkenlerin Yorumu

Eşlenik değişkenlerin yorumu; ya standartlaştırılmış ağırlık vektörlerine, ya da eşlenik değişkenler ile ham değişkenler arasındaki ilişkilere dayanmaktadır. Bu ilişkiler aynı zamanda yapı katsayıları, ya da yüklemeler şeklinde adlandırılmaktadır. Rencher (1995) gibi bazı araştırmacılar standartlaştırılmış ağırlıkları öne çıkarırken diğerleri (Thorndike, 2000) eşlenik ve ham değişkenler arasındaki ilişkilere önem vermektedir. Standartlaştırılmış ağırlıklar, her bir

ham değişkenin bağımsız bir şekilde eşlenik değişkene yaptığı katkısı ifade eder. Örneğin X_1 ve X_2 ham değişkenlerinin 1. eşlenik değişken üzerindeki ağırlıkları sırasıyla 0.5 ve 0.8 ise X_2 nin bu eşlenik değişkene yaptığı katkının X_1 'in katkısından daha büyük olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, X_1 'in 1. ve 2. eşlenik değişkenler üzerindeki ağırlıkları 0.5 ve 0.8 ise X_1 'in eşlenik değişkenlerden hangisine daha fazla katkısı olduğu konusunda bir şey söylenemez. Diğer bir ifadeyle ağırlıkların eşlenik değişkenler arasında karşılaştırılmaması gerekir. Değişkenler yaptıkları katkının (ağırlıkların) mutlak büyüklüğüne göre sıralanabilirler (Rencher, 1992).

Yüklemeler, standartlaştırılmış ağırlıklardan kolayca elde edilebilir:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{WX} &= \mathbf{A} \mathbf{R}_{XX} & \mathbf{R}_{VY} &= \mathbf{B} \mathbf{R}_{YY} \\ \mathbf{R}_{WY} &= \mathbf{A} \mathbf{R}_{XY} & \mathbf{R}_{VX} &= \mathbf{B} \mathbf{R}_{YX} \end{aligned} \quad (12)$$

(12) ifadesinde \mathbf{R} ilişki matrisini göstermekte ve eşlenik değişkenler ile orijinal değişkenler arasındaki ilişki katsayılarını içermektedir.

Eşlenik ilişki katsayısı ρ_k , k ' nci eşlenik değişken çifti arasındaki ilişkidir. Eşlenik ilişki katsayısının karesi, ρ_k^2 , W_k eşlenik değişkenin V_k eşlenik değişkeni ile açıklanan varyansın oranıdır. Bunun tersi de doğrudur: ρ_k^2 , aynı zamanda V_k eşlenik değişkeninin W_k ile açıklanan varyansının oranıdır. Bu nedenle ρ_k^2 , W_k ve V_k arasındaki paylaşılmış varyans olarak adlandırılmaktadır. Eşlenik ilişkinin yüksek çıkması \mathbf{X} ve \mathbf{Y} kümesi arasındaki kuvvetli bir ilişki olduğu şeklinde yorumlanmamalıdır.

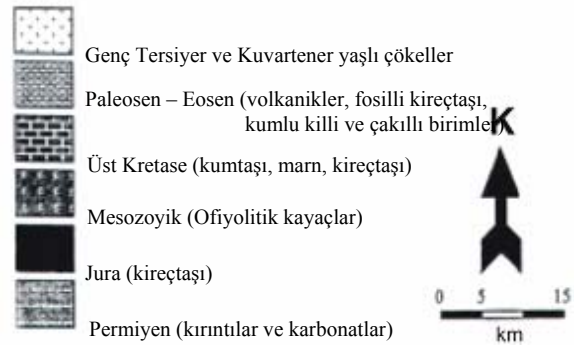
Veri matrisini oluşturan değişkenler arasında doğrusal bir bağımlılık (multi-collinearity) söz konusu olabilir. Değişkenler, doğrusal bağlantı içinde olduklarında standartlaştırılmış ağırlıklar duraysız hale gelir ve duraysız ağırlıklar da güvenilir olmayan yorumlara yol açar. Bu nedenle değişkenlerin doğrusal bağlantı içinde olup olmadığının araştırılması ve eğer varsa E1 analizine başlamadan önce bunun giderilmesi gerekir. Doğrusal bağımlılığı araştırmak için literatürde bir kaç yöntem geliştirilmiştir. Bunlar arasında yaygın bir şekilde kullanılan yaklaşım Belsley (1991) tarafından önerilen ve ayrıca Draper ve Smith (1993) tarafından ayrıntılı olarak açıklanan yaklaşımdır. Bu yaklaşıma göre:

1. Her bir Y_j , $j=1, \dots, p$ değişkenine $Y_j / \sum_{i=1}^n Y_i$ dönüşümü uygulanır,
2. Dönüştürülmüş değerlerden oluşan veri matrisi, tekil değer ayrıştırma (singular value decomposition) yöntemi ile parçalanır,
3. Her bir tekil değeri, en büyük tekil değere bölerek koşullandırma indisleri hesaplanır,
4. Son olarak varyans-ayrıştırma oranları hesaplanıp koşullandırma indisleri ile birlikte bir çizelgede gösterilir.

Yüksek (genellikle 30'dan büyük) koşullandırma indisleri, doğrusal bağımlılığın bir işareti sayılır. Yüksek ayrıştırma oranları ise birbirleri ile doğrusal bir şekilde bağımlı olan değişkenleri gösterir. Değişkenler, doğrusal bağımlılık gösterdiğinde ağırlıkların duraylılığını artırmak için birini analizden çıkarmak gerekir. Hangi değişkenin çıkarılacağına değişkenler kümesi ilişkili matrisinin özdeğerleri ve özvektörlerini hesaplayarak karar verilir. Bunun için en küçük özdeğer belirlenir ve bu özdeğere karşılık gelen özvektör içinde en yüksek katsayıya sahip olan değişken analizden çıkarılır (Mardia vd., 1979). Bu yaklaşımın arkasındaki mantık, en az öneme sahip bileşenin ve bu bileşene en çok katkı yapan değişkenin belirlenmesine dayanmaktadır.

3. ÖRNEKLERİN MEKANİK, İNDEKS VE PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİ

İncelemenin amacına yönelik olarak Ankara civarında yüzlek veren kumtaşı birimlerinden 18 adet blok örnek alınmıştır. Bu örneklerden dokusal özellikleri mezoskopik ve mikroskopik olarak rahatlıkla belirlenebilen ve ayrıca mühendislik testlerine uygun olan 8 adedi alınmıştır. Bu örneklerin yeri, Şekil 2'de verilen harita üzerinde gösterilmiştir. L1, L14 ve L18 kodlu örnekler, Memlik (Ankara) civarındaki Üst Kretase yaşlı Filiş jeolojik birimine aittir. L6, L10 ve L16 kodlu örnekler, Üst Kretase-Paleosen yaşlı Haymana biriminden alınmış olup bu birim genel olarak çakıltaşı, kumtaşı ve şeyllerden oluşmaktadır. L8a ve L8b örnekler ise fosilli, kumlu kireçtaşı - kumtaşı ve çamurtaşı seviyelerinden oluşan Üst Kretase yaşlı birimden alınmıştır. İncelenen kayaç örneklerinin mineralojik- petrografik, ve indeks özellikleri, Dikmen (2002), Tiryaki vd. (2003) ve Özbilgin (2003)'de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Aşağıda bu özelliklere ilişkin özet bilgiler verilmiştir.



L_n : Örnek lokasyonu

Şekil 2. Ankara güney-batısının jeoloji ve örnek lokasyonları haritası (Ünalın, 1981'den değiştirilerek)

3.1. Mekanik Özellikler

Tek eksenli basınç dayanımı (TEBD), dolaylı çekme dayanımı (DÇD), elastisite modülü (EM) ve P dalga hızı (PDH) bu çalışmada dikkate alınan mekanik özellikleri oluşturmaktadır. Bu özellikler, alınan her bir kayaç örneği için belirlenmiştir. Bu amaçla ISRM (1981)'de önerilen yöntemler kullanılmıştır. Örneklerin mekanik özelliklerine ilişkin değerler Çizelge 1'de, mekanik özellikler kümesine ilişkin değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri (descriptive

statistics) ve ilişki matrisi ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Örneklerin mekanik özellikleri.

Örnek no	TEBD (MPa)	DÇD (MPa)	PDH (m/s)	EM (GPa)
L1	62,48	4,37	4,27	23,72
L6	53,99	4,35	3,90	36,11
L8a	62,03	3,51	2,25	24,36
L8b	21,27	1,96	1,60	7,23
L10	48,17	2,53	3,18	46,14
L14	87,53	6,34	5,66	48,42
L16	55,75	4,32	4,84	47,67
L18	44,29	4,53	5,65	23,68

Çizelge 2. Mekanik özelliklere ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve ilişki matrisi.

	TEBD (MPa)	DÇD (MPa)	PDH (m/s)	EM (GPa)
En küçük değer	21,27	1,96	1,60	7,23
Ortalama	54,44	3,99	3,92	32,17
En büyük değer	87,53	6,34	5,66	48,42
Standard Sapma	18,75	1,34	1,50	14,84

İlişki matrisi

	TEBD	DÇD	PDH	EM
TEBD	1,00	0,84	0,57	0,64
DÇD		1,00	0,85	0,51
PDH			1,00	0,55
EM				1,00

Çizelge 2'den en yüksek doğrusal ilişkinin P dalga hızı ve dolaylı çekme dayanımı; en düşük ilişkinin ise elastisite modülü ile dolaylı çekme dayanımı arasında olduğu görülmektedir. Örnek sayısının sınırlı olmasına rağmen en yüksek ilişkinin P dalga hızı ile dolaylı çekme dayanımı arasında belirlenmesi, örneklerin içerdikleri zayıf ve mikroçatlak zonlarının doğrudan P dalga hızını düşürmesi ile açıklanabilir. Doğal olarak örnek içerisinde bulunan çatlak ve zayıf zonlar arttıkça daha düşük dolaylı çekme dayanımı beklenmelidir. Diğer taraftan, kayaçlar sıkıştırma basınçları altında çekilmeye oranla çok daha dayanımlıdır. Bu itibarla, dolaylı çekme

dayanımını kayacın dokusal özellikleri ile birlikte içerdiği yapısal bozuklukların da etkilediği bilinmektedir. Dolayısıyla, dolaylı çekme dayanımı ile elastisite modülü arasında daha düşük bir ilişkinin elde edilmesi sürpriz sayılmamalıdır.

Mekanik özellikler arasında yer alan değişkenlerin doğrusal bağımlı olup olmadıklarını belirlemek için bölüm 2.2'de açıklanan koşullandırma indisleri ve varyans-ayırıştırma oranları hesaplanıp Çizelge 3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Mekanik özelliklere ilişkin Var(b)'nin oransal ayrıştırması.

Koşullandırma İndisi	Oranlar			
	TEBD Var(b ₁)	DÇD Var(b ₂)	PDH Var(b ₃)	EM Var(b ₄)
1	0,001	0,000	0,001	0,003
7	0,000	0,011	0,024	0,465
10	0,124	0,002	0,138	0,050
37	0,975	0,987	0,537	0,482

Çizelge 3'ün son satırındaki 37'ye eşit koşullandırma indisi değeri, tek eksenli basınç dayanımı ile dolaylı çekme dayanımı arasında doğrusal bir bağımlılığın olduğunu göstermektedir. Bu nedenle bu iki değişkenden birini analizden çıkarmak gerekir. Atılacak değişkeni belirlemek amacıyla mekanik özellikler kümesi ilişki matrisinin (Çizelge 2) özdeğer ve özvektörleri hesaplanmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4'den en küçük özdeğere karşılık gelen bileşene en çok katkı yapan değişkenin dolaylı çekme dayanımı olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu değişken mekanik özellikler kümesinden çıkarılacak ve bundan sonraki analizlerde dikkate alınmayacaktır.

3.2. İndeks Özellikleri

İndeks özellikleri kümesi, Shore scleroscope sertliği (SSS), NCB koni delici sertliği (NCB), Schmidt geri sıçrama sayısı (SÇS), nokta yükleme dayanımı indeksi (NYD) Çizelge 4. Mekanik özelliklere ilişkin özdeğer ve özvektörler.

	Özdeğerler			
	3,00	0,57	0,40	0,03
	Özvektörler			
TEBD	0,51	0,14	-0,69	0,48
DÇD	0,54	-0,40	-0,18	-0,71
PDH	0,50	-0,41	0,61	0,46
EM	0,44	0,80	0,34	-0,21

değişkenlerinden oluşmaktadır. İndeks özelliklerin ölçülen değerleri Çizelge 5'de verilmiştir. İndeks özellikler kümesi değişkenlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler hesaplanmış ve değişkenler arasındaki ilişki matrisi ile birlikte Çizelge 6'da gösterilmiştir. Küme içi ilişki matrisi yanında mekanik özellikler kümesi ve indeks özellikler kümesi değişkenleri arasındaki ilişki matrisi de ayrıca verilmiştir.

Çizelge 5. Örneklerin indeks özellikleri.

Örnek kodu	SSS	NCB	SÇS	NYD (MPa)
L1	49,55	3,20	43	1,82
L6	50,00	4,38	35	1,88
L8a	41,55	4,42	41	1,69
L8b	25,70	1,88	36	1,16
L10	32,90	3,17	38	1,70
L14	53,70	3,80	52	3,02
L16	42,70	3,93	34	3,10
L18	53,35	3,44	43	2,93

SÇS ve NCB arasındaki ilişki dışında, bütün değişkenler birbirleri ile pozitif bir ilişki göstermektedir. İndeks özellikler kümesi içinde en yüksek doğrusal ilişki gösteren değişkenler, nokta yükleme dayanımı indeksi ile Shore scleroscope sertliğidir ve bunlar arasındaki doğrusal ilişki katsayısı 0.67 dir. En düşük ilişki ise, Shore scleroscope sertliği ile NCB koni delici sertliği arasında ($r = -0.05$) gözlenmektedir.

Mekanik ve indeks kümesi değişkenleri arasında en yüksek ilişki $r = 0.90$ ile P dalga hızı ve nokta yükleme dayanımı indeksi arasında elde edilmiştir. En düşük ilişki ise, elastisite modülü ve Schmidt geri sıçrama sayısı arasında gözlenmektedir.

İndeks özellikler arasında doğrusal bağımlı olan değişkenleri belirlemek amacıyla koşullandırma indisleri ve varyans-ayırıştırma oranları hesaplanmış ve Çizelge 7'de verilmiştir. Koşullandırma indislerinin tümünün kritik değer olan 30'dan düşük çıkması, indeks özellikler arasında doğrusal bağımlı olan hiç bir değişkenin bulunmadığını göstermektedir. Dolayısıyla indeks özellikleri oluşturan bütün değişkenler daha sonraki analizlerde kullanılacaktır.

Çizelge 6. İndeks özelliklere ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve ilişki matrisleri.

	SSS	NCB	SÇS	NYD (MPa)
En küçük değer	25,70	1,88	34	1,16
Ortalama	43,68	3,53	40,2	2,16
En büyük değer	53,70	4,42	52	3,10
Standard Sapma	10,01	0,78	5,90	0,74

İlişki matrisi	SSS	NCB	SÇS	NYD
	SSS	1,00	0,63	0,56
NCB		1,00	-,05	0,42
SÇS			1,00	0,46
NYD				1,00

Çapraz ilişki matrisi	SSS	NCB	SÇS	NYD
	TEBD	0,70	0,66	0,61
PDH	0,83	0,37	0,63	0,90
EM	0,34	0,55	0,22	0,60

Çizelge 7. İndeks özelliklere ilişkin Var(b)'nin oransal ayrıştırması.

Koşullandırma İndisi	Oranlar			
	SSS Var(b ₁)	NCB Var(b ₂)	SÇS Var(b ₃)	NYD Var(b ₄)
1	0,001	0,002	0,002	0,003
9	0,005	0,226	0,012	0,780
11	0,001	0,319	0,544	0,095
20	0,993	0,453	0,443	0,123

3.3. Petrografik Özellikler

Sahadan alınan sekiz adet örnek, çok sayıda petrografik özellik için analiz edilmiştir. Bunlardan, mekanik özellikler ile göreceli olarak yüksek ilişki gösteren doku katsayısı (DK), çimentolaşma katsayısı (ÇK), mineral tanesi /kayaç parçası oranı (MKO) ve mineral tanesi ortalama boyu (MOB) eşlenik ilişki analizi için alınmıştır. Kuvars %, kontak türleri gibi yaygın bir şekilde gözönüne alınan petrografik değişkenler mekanik özellikler ile oldukça düşük ilişki gösterdiğinden petrografik özellikler kümesine dahil edilmemiştir. Petrografik özelliklerin belirlenebilmesi için Hacettepe Üniversitesi İnce Kesit Laboratuvarında sekiz örnekten ince kesitler hazırlanmıştır. İnce kesitlerin modal bileşimleri Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde, doku katsayıları ise Ohio State Üniversitesi (ABD) Jeoloji Bilimleri Bölümünde belirlenmiştir. Doku katsayısı; tane şekli, tane yönelmesi, tanelerin birbiri içine girişim yapma derecesi ve paketleme yoğunluğu gibi kayaç dokusunu oluşturan parametrelerin bir fonksiyonudur. Doku katsayısının hesaplanmasında Howarth ve Rowlands (1987)'in önerdiği eşitlik temel alınmıştır. Bununla birlikte örneklerin tek eksenli basınç dayanımı değerleri yüksek olduğundan ince kesitlerdeki kayaç parçalarının içindeki mineral taneleri de bu hesaplama katılmıştır. Bu nedenle, burada verilen bazı doku katsayısı değerleri, daha önceki çalışmalarda aynı kayaç türleri için hesaplanan değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Bu konudaki ayrıntılı bilgi literatürde mevcuttur (Tiryaki vd., 2003). Çimentolaşma katsayısı, McFeat-Smith (1977) tarafından verilen çizelge kullanılarak belirlenmiştir. Petrografik özellikler kümesi değişkenlerine ilişkin değerler topluca Çizelge 8'de gösterilmiştir.

Çizelge 8. Örneklerin petrografik özellikleri.

Örnek kodu	DK	ÇK	MKO (%)	MOB (mm)
L1	2,61	8	88	0,22
L6	1,25	6	70	0,18
L8a	2,25	3	87	0,19
L8b	2,43	3	85	0,18
L10	4,77	8	92	0,29
L14	5,48	9	93	0,32
L16	2,15	9	72	0,52
L18	5,97	9	75	0,21

Petrografik özellikler kümesi değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri ve değişkenler arasındaki ilişki matrisi ise Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 9. Petrografik özelliklere ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve ilişki matrisleri.

	DK	ÇK	MKO (%)	MOB (mm)
En küçük değer	1,25	3	70	0,18
Ortalama	3,36	7	83	0,26
En büyük değer	5,97	9	93	0,52
Standard Sapma	1,77	2,59	9,10	0,1

İlişki matrisi	DK	ÇK	MKO	MOB
DK	1,00	0,56	0,39	0,05
ÇK		1,00	-0,09	0,58
MKO			1,00	-0,16
MOB				1,00

Çapraz ilişki matrisi	DK	ÇK	MKO	MOB
TEBD	0,22	0,45	0,29	0,29
PDH	0,53	0,90	-0,24	0,43
EM	0,23	0,67	0,01	0,70

Petrografik özelliklerin ilişki matrisi yanında petrografik ve mekanik özellikler arasındaki ilişki matrisi de ayrıca aynı çizelgede gösterilmiştir. Doku katsayısı, diğer bütün değişkenlerle pozitif bir ilişki sergilemektedir. Benzer bir durum mineral tanesi/kayaç parçası oranı ile olan düşük ilişki katsayısı dışında çimentolaşma katsayısı ve mineral tanesi ortalama boyu için de söylenebilir. Doku katsayısı ile en yüksek doğrusal ilişki $r=0.56$ ile çimentolaşma katsayısı arasında görülmektedir. En düşüğü ise, mineral tanesi ortalama boyu ile gözlenmektedir.

Çizelge 10, petrografik özelliklere ilişkin koşullandırma indisleri ve varyans-ayırıştırma oranlarını göstermektedir. Koşullandırma indislerinin tümü 30'dan küçük olduğundan petrografik özelliklere ilişkin hiç bir değişken diğerlerine doğrusal bir şekilde bağımlı değildir.

Dolayısıyla petrografik özellikleri oluşturan bütün değişkenlerin daha sonraki analizlere dahil edilmesinde bir sakınca yoktur.

Çizelge 10. Petrografik özelliklere ilişkin Var(b)'nin oransal ayrıştırması.

Koşullan dırma İndisi	Oranlar			
	DK Var(b ₁)	ÇK Var(b ₂)	MKO Var(b ₃)	MOB Var(b ₄)
1	0,007	0,004	0,007	0,007
5	0,000	0,000	0,339	0,373
7	0,952	0,121	0,062	0,074
10	0,041	0,875	0,592	0,546

4. DEĞİŞKEN KÜMELERİ ÇİFTİ ARASINDAKİ EŞLENİK İLİŞKİLER

4.1. Mekanik ve İndeks Özellikler Arasındaki İlişkiler

Üç değişkenden (tek eksenli basınç dayanımı, P dalga hızı ve elastisite modülü) oluşan mekanik özellikler ile dört değişkenden (Shore scleroscope sertliği, NCB koni delici sertliği, Schmidt geri sıçrama sayısı ve nokta yükü dayanım indeksi) oluşan indeks özellikler kümesine eşlenik ilişki analizi uygulanmıştır. Bu amaçla bir FORTRAN programı yazılmıştır. Analizin uygulanmasında Çizelge 2'de verilen mekanik özellikler kümesi ilişki matrisi ile Çizelge 6'da verilen indeks özellikler kümesi ilişki matrisi ve ayrıca mekanik ve indeks özellikler kümesi arasındaki ilişki matrisleri kullanılmıştır. Hesaplanan üç adet eşlenik ilişki katsayısı ve eşlenik değişken çifti aşağıda verilmiştir:

$$\rho_1 = 0.99 \quad (13)$$

$$W_1 = -0.17 \text{TEBD} - 1.07 \text{PDH} + 0.40 \text{EM}$$

$$V_1 = -0.91 \text{SSS} + 0.47 \text{NCB} + 0.04 \text{SÇS} - 0.43 \text{NYD}$$

$$\rho_2 = 0.92 \quad (14)$$

$$W_2 = +1.04 \text{TEBD} - 0.67 \text{PDH} + 0.30 \text{EM}$$

$$V_2 = -1.17 \text{SSS} + 1.57 \text{NCB} + 1.16 \text{SÇS} - 0.28 \text{NYD}$$

$$\rho_3 = 0.68 \quad (15)$$

$$W_3 = -0.91 \text{TEBD} + 0.11 \text{PDH} + 1.27 \text{EM}$$

$$V_3 = -1.08 \text{SSS} + 0.33 \text{NCB} - 0.25 \text{SÇS} + 1.25 \text{NYD}$$

İlk eşlenik değişken çifti arasında mükemmel bir ilişki vardır ($\rho = 0.99$). Bunun bir nedeni veri

sayısının azlığıdır. Çiftlerin derecesi arttıkça aralarındaki doğrusal ilişkinin seviyesi azalmaktadır. Bununla birlikte, en yüksek dereceli eşlenik değişken çifti arasında önemsiz sayılamayacak bir ilişki vardır. Üç adet eşlenik değişken çifti, mekanik ve indeks değişkenler kümesi arasında farklı modlardaki ilişki yapısını sergilemektedir. Örneğin ilk eşlenik değişken çifti temel olarak P dalga hızı ile Shore scleroscope sertliği arasındaki ilişkiyi yansıtmaktadır. Çünkü bu çifte en büyük katkı yapan değişkenler PDH ve SSS dir (Bu eşitliklerdeki koyu renkli yazılmış terimler eşlenik değişken çiftine en yüksek katkı yapan değişkenleri göstermektedir). Bununla birlikte dolaylı çekme dayanımı ve özellikle tek eksenli basınç dayanımının katkısı oldukça düşüktür. Ağırlıklara ilişkin işaretler incelendiğinde Shore scleroscope sertliği düşüp NCB değeri yükseldikçe, P dalga hızının azalıp elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Benzer sonuçlara eşlenik değişkenler ile orijinal değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiler incelenerek varılabilir (Çizelge 11). W_1 'in en yüksek ilişki gösterdiği değişken P dalga hızıdır. V_1 ile en yüksek ilişki Shore scleroscope sertliği ile elde edilmiştir. Bu ilişkilerin yönü ile ağırlıkların işaretleri uyumludur. Bununla birlikte ilişki katsayısının işareti ile ağırlıkların işaretinin aynı olmadığı durumlar ortaya çıkabilir. Örneğin böyle bir durum elastisite modülü ile W_1 arasında gözlenmektedir. Elastisite modülünün eşlenik ağırlığı +0.40 iken ilişki katsayısı -0.30 dur. Bu tür uyumsuzlukların nedeni veri sayısının azlığıdır. Bu noktada ilişki katsayısının iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin derecesi, eşlenik ağırlıkların ise diğer değişkenlerin varlığında bir değişkenin yaptığı katkının bir ölçüsü olduğunu belirtmek gerekir.

Çizelge 11. Eşlenik değişkenler ile mekanik ve indeks özellikler arasındaki ilişki matrisleri.

	W_1	W_2	W_3
TEBD	-0.53	0,84	-0.03
PDH	-0.96	0,09	0,28
EM	-0.30	0,60	0,74
	V_1	V_2	V_3
SSS	-0.88	0,29	-0.17
NCB	-0.29	0,65	0,19
SÇS	-0.70	0,30	-0.30
NYD	-0.83	0,13	0,55

İkinci eşlenik değişken çifti mekanik ve indeks değişkenler kümesi arasındaki ilişkinin diğer bir boyutunu sergilemektedir. Mekanik özellikler arasında bu çifte en büyük katkısı olan değişken tek eksenli basınç dayanımı, indeks özellikler arasında ise NCB koni delici değeridir. Bu değişkenler aynı zamanda eşlenik değişkenle en yüksek ilişki gösteren değişkenlerdir. Çizelge 11'de en yüksek ilişki katsayıları koyu renkte gösterilmiştir. Eşlenik ağırlıkların işaretleri incelendiğinde NCB artıp Shore scleroscope sertliği azaldığında basınç dayanımının arttığı buna karşılık P dalga hızının azaldığı görülmektedir. Eşlenik ağırlıklara dayanan bu yorumlar ayrıca W_2 eşlenik değişkeni ile mekanik değişkenler ve ayrıca V_2 eşlenik değişkeni ile indeks değişkenler arasındaki ilişki katsayıları ile de desteklenmektedir. Örneğin W_2 ile en yüksek ilişki basınç dayanımı değişkeni ($r=0.84$), V_2 ile en yüksek ilişki NCB koni delici sertliği ($r=0.65$) arasında gözlenmektedir. Mekanik ve indeks değişken kümeleri arasındaki ilişkiler, üçüncü eşlenik değişken çifti ile daha farklı boyutlara taşınabilir. Bununla birlikte üçüncü çifte ilişkin eşlenik ilişki katsayısı önemli ölçüde düştüğünden yapılacak yorumların önemi de azalmaktadır.

4.2. Mekanik ve Petrografik Özellikler Arasındaki İlişkiler

Mekanik özellikler olarak TEBD, PDH ve EM ve petrografik özellikler olarak da DK, ÇK, MKO ve MOB değişkenleri dikkate alarak iki küme arasındaki eşlenik ilişkiler incelenmiştir. Mekanik ve petrografik değişkenlere ilişkin küme içi ve kümeler arası ilişki matrislerinin (Çizelge 2 ve Çizelge 9) analizi sonucunda üç adet eşlenik ilişki katsayısı ve eşlenik değişken çifti elde edilmiş ve bunlar aşağıda verilmiştir.

$$\rho_1 = 0.99 \quad (16)$$

$$W_1 = -0.57 \text{TEBD} + 1.06 \text{PDH} + 0.33 \text{EM}$$

$$V_1 = +0.36 \text{DK} + 0.72 \text{ÇK} - 0.52 \text{MKO} - 0.08 \text{MOB}$$

$$\rho_2 = 0.66 \quad (17)$$

$$W_2 = +0.88 \text{TEBD} - 0.52 \text{PDH} + 0.46 \text{EM}$$

$$V_2 = -0.40 \text{DK} + 1.08 \text{ÇK} + 0.57 \text{MKO} - 0.66 \text{MOB}$$

$$\rho_3 = 0.20 \quad (18)$$

$$W_3 = +0.91 \text{TEBD} + 0.49 \text{PDH} - 1.24 \text{EM}$$

$$V_3 = +0.42 \text{DK} - 0.49 \text{ÇK} + 0.75 \text{MKO} + 0.66 \text{MOB}$$

Mekanik ve indeks değişkenler kümelerinin incelenmesinde olduğu gibi ilk eşlenik değişken

çifti arasında mükemmel bir ilişki vardır ($\rho = 0.99$). İlk eşlenik değişken çifti temel olarak P dalga hızı ile çimentolaşma katsayısı arasındaki ilişkiyi yansıtmaktadır. Çünkü bu çifte en büyük katkısı olan değişkenler PDH ve ÇK'dir. Ağırlıklara ilişkin işaretler incelendiğinde yüksek P dalga hızı ve düşük dolaylı çekme dayanımının yüksek çimentolaşma katsayısı ve düşük mineral tanesi/kayaç parçası oranına yol açtığı görülmektedir. Benzer sonuçlara eşlenik değişkenler ile ham değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiler incelenerek varılabilir (Çizelge 12). W_1 'in en yüksek ilişki gösterdiği değişken P dalga hızıdır. V_1 ile en yüksek ilişki çimentolaşma katsayısı ile elde edilmiştir. Bu ilişkilerin yönü ile ağırlıkların işaretleri uyumludur.

İkinci eşlenik değişken çifti mekanik ve petrografik değişkenler kümesi arasındaki ilişkinin diğer bir boyutunu sergilemektedir. Bu çifte en büyük katkısı olan değişkenler tek eksenli basınç dayanımı ve çimentolaşma katsayısıdır. Ağırlıkların işaretleri incelendiğinde çimentolaşma katsayısı ve mineral tanesi kayık parçası oranı arttığında, tek eksenli basınç dayanımı artıp P dalga hızı azalmaktadır. Bununla birlikte eşlenik ağırlıklara dayanan bu yorumlar, V_2 eşlenik değişkeni ve petrografik değişkenler arasındaki ilişki katsayıları ile tutarlılık göstermemektedir. Örneğin V_2 ile en yüksek ilişki çimentolaşma katsayısı ile beklenirken mineral tanesi kayık parçası oranı ($r=-0.59$) arasında gözlenmektedir. Daha öncede işaret edildiği gibi ağırlık ve ilişki katsayıları arasındaki uyumsuzluklar veri sayısının

Çizelge 12. Eşlenik değişkenler ile mekanik ve petrografik özellikler arasındaki ilişki matrisleri.

	W_1	W_2	W_3
TEBD	0,25	0,88	0,39
PDH	0,92	0,24	0,33
EM	0,54	0,75	-,38
	V_1	V_2	V_3
DK	0,52	0,04	0,83
ÇK	0,92	0,36	0,11
MKO	-,41	0,59	0,69
MOB	0,82	-,43	0,28

azlığından kaynaklanmaktadır. Mekanik ve indeks değişken kümeleri arasındaki ilişkiler, üçüncü eşlenik değişken çifti ile daha farklı bir boyut kazanabilir. Bununla birlikte, üçüncü eşlenik değişken çifti düşen eşlenik ilişki katsayısından dolayı önemini yitirmektedir. Bu nedenle, bu eşlenik değişkene ilişkin yorumlar yapılmamıştır.

5. SONUÇLAR

Kumtaşları üzerinde yapılan deneylerin eşlenik ilişki analizi ile değerlendirmesi mekanik-indeks ve mekanik-petrografik değişken kümeleri arasında oldukça önemli ilişkilerin varlığını ortaya koymuştur. Özellikle ilk eşlenik değişken çiftleri arasında mükemmel bir ilişki gözlenmiştir. Mekanik özellikler arasında bu çiftlere en büyük katkı yapan değişken P dalga hızı olmuştur. Bu nedenle, kısıtlı sayıda örnek üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre, kumtaşlarında oluşturulacak mühendislik yapılarının projelendirilmesinde P dalga hızına özel bir önem verilmesi gerekir. P dalga hızı ve ilk eşlenik değişkenler arasındaki ilişki katsayıları da bu sonucu desteklemektedir. İndeks özelliklere ilişkin ilk eşlenik değişkende Shore scleroscope sertliği öne çıkarken petrografik özellikler arasında çimentolaşma katsayısı egemen olmaktadır. Bununla birlikte daha yüksek dereceli eşlenik değişkenler farklı boyutlarda farklı değişkenleri öne çıkarmaktadır. Örneğin mekanik ve indeks değişkenler kümesi arasında mekanik özelliklere ilişkin ikinci eşlenik değişken, tek eksenli basınç dayanımını öne çıkarırken, indeks özelliklerde ise NCB koni delici değeri etken olmaktadır. Benzer şekilde mekanik ve petrografik değişkenler kümesi arasında petrografik özelliklere ilişkin ikinci eşlenik değişken mineral tanesi /kayaç parçası oranı ile önemli ölçüde etkilenmektedir.

Kumtaşlarının mühendislik özellikleri ile petrografik ve indeks özellikleri arasında çok yakın ilişkiler vardır. Bununla birlikte, bu özellikler arasındaki etkileşimler oldukça karmaşıktır. Eşlenik ilişki analizi, bu özellikler arasında egemen olan ilişkileri ortaya çıkarmada ümit verici bir yaklaşım olarak gözükmektedir. Örnek sayısının azlığı, bazı eşlenik katsayılar ile yüklemeler arasında uyumsuzluğa yol açmış ayrıca ilk eşlenik ilişki katsayısının oldukça yüksek çıkmasına neden olmuştur. Gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek için örnek sayısının artırılması gerekir. Dolayısıyla bu

çalışmada elde edilen sonuçların El analizinin kullanılabilirliğine yönelik ön değerlendirmeleri kapsadığını belirtmek gerekir. Eşlenik ilişki analizi eşlenik çiftlerin doğrusal bir şekilde oluşturulmasına dayanır. Çiftlerin doğrusal olmayan birleşimler şeklinde oluşturulması ayrıca dikkate alınmalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, 0102602013 nolu Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi ve ayrıca 104Y007 nolu TÜBİTAK Projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, NCB koni delici test aparatının kullanılması nedeniyle Prof. Dr. Naci Bölükbaşı'ya (ODTÜ) ve Nazife Tiryaki'ye (The University of Queensland, Avustralya), mineralojik-petrografik analizlerdeki yardımları nedeniyle Doç. Dr. Yusuf K. Kadioğlu'na (Ankara Üniversitesi) ve bu yazının iyileştirilmesi yönünde yaptığı olumlu katkılardan dolayı Prof.Dr. Reşat Ulusay'a (H.Ü.) teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Anderson, T.W., 1984; "An Introduction To Multivariate Statistical Analysis", John Wiley & Sons, New York, 675.

Belsley, D.A., 1991, "Conditioning Diagnostics: Collinearity and Weak Data in Regression", John Wiley & Sons, New York, 396

Dikmen, A.Ç., 2002, "Kayaçların Dokusal, Bileşimsel ve Mühendislik Özelliklerinin Özgül Kesme Enerjisine Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 112.

Draper, N.R., 1998, "Applied Regression Analysis", John Wiley & Sons, New York, 706.

Hotelling, H., 1936; "Relations Between Two Sets of Variates", *Biometrika*, **28**, 139-142.

Howarth, D.F. ve Rowlands, J.C., 1987; "Quantitative Assesment of Rock Texture and Correlation with Drillability and Strength Properties", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **20**, 57-85.

ISRM, 1981; "Rock Characterization, Testing and Monitoring-Suggested Methods", Pergamon Press, Oxford, 211.

Kahraman, S., 2001; "Evaluation of Simple Methods For Assessing The Uniaxial Compressive Strength of Rock", *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **38**, 981-994

McFeat-Smith, I., 1977; "Rock Property Testing for the Assessment of Tunnelling Machine Performance", *Tunnels and Tunelling*, March, 29-33.

Özbilgin, D., 2003; "Kanonik Korelasyon Analizi ile Bazı Kumtaşlarına Ait Mekanik Özelliklerin Kestirimi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 114.

Rencher, A.C., 1992; "Interpretation of Canonical Discriminant Functions, Canonical Variates, and Principal Components", *The American Statistician*, **46**, 3, 217-225.

Rencher, A.C., 1995; "Methods of Multivariate Analysis", Wiley-Interscience Publication, New York, 627.

Shakoor, A. ve Bonelli, R.E., 1991; "Relationship Between Petrographic Characteristics, Engineering Index Properties and Mechanical Properties of Selected Sandstones", *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, **28**, 55-71.

Thorndike, R.M., 2000; "Canonical Correlation Analysis", in Tinsley, H.E.A. ve Brown, S.D., (Eds.), *Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modelling*, Academic Press, New York, 237-263.

Tiryaki, B., Dikmen, A.Ç., Kadioğlu, Y.K., Özbilgin, D., Tiryaki, N., Bölükbaşı, N., 2003, "Kayaç Kesmede Keski Performansının Tahminin için Doku Katsayısı Yaklaşımının Kullanılabilirliği", *Madencilik*, **42**, 2, 27-43.

Tsiambaos, G. ve Sabatakakis, N., 2004; "Considerations on Strength of Intact Sedimentary Rocks", *Engineering Geology*, **72**, 261-273.

Tuğrul, A. ve Zarif, I.H., 1999; "Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Selected Granitic Rocks from Turkey", *Engineering Geology*, **51**, 303-317.

Ulusay, R., Türeli, K. ve Ider, M.H., 1994; "Prediction of Engineering Properties of a Selected Litharenite Sandstone from its

Petrographic Characteristics Using Correlation and Multivariate Statistical Techniques", *Engineering Geology*, **37**, 135-157.

Ünalın, A.,1981; "Ankara Güneybatısındaki Ankara Melanj'ının Stratigrafisi", M.T.A. Genel Müdürlüğü Derleme Raporu, Rapor No:6990, 37.

Yaşar, E. ve Erdoğan, Y., 2004; "Estimation of Rock Physicomechanical Properties Using Hardness Methods", *Engineering Geology*, **71**, 281-288.

Yılmaz, I. ve Sendir, H., 2002; "Correlation of Schmidt Hardness with Unconfined Compressive Strength and Young's Modulus in Gypsum from Sivas (Turkey)", *Engineering Geology*, **66**, 211-219.