

Kayaç dokusal özelliklerinin sınıflandırılması ve kaya mühendisliği uygulamaları

Cüneyt Atilla ÖZTÜRK*, Erkin NASUF

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yeraltı yapılarının tasarımı aşamasında, inşaatın yapılacağı kaya kütle ortamlarının karakterizasyonu, yapının servis süreci boyunca üzerine gelecek olan yüklere karşı emniyetli olarak hizmet vermesi açısından önemlidir. Kaya kütleleri, kayaç malzemeleri ve süreksizliklerden oluşan sistemlerdir. Kaya kütle karakterizasyonları, kayaç malzemesinin dayanımının ve süreksizlik özelliklerinin değerlendirilmesi ile gerçekleştirilir. Kayaç malzemeleri, homojen ve izotrop olarak kabul edilen ve dayanımları üzerinde malzemeyi oluşturan mineral, minerallerin bulunduğu doku ve tanelerin birbirlerine bağlanmasını sağlayan çimento malzemesinin kompozisyonunun etkin olduğu doğal yapı malzemeleridir. Kayaç malzemelerinin dinamik ve statik yükler altındaki davranış modellerini kestirmek ve yeraltında inşaa edilecek olan yapının amacına en uygun tasarımı gerçekleştirebilmek için, kayaç malzemelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tayin edilmesi gerekmektedir. Bunun yanında, dayanım özelliklerine göre gerçekleştirilecek sınıflamalar ile kayaç malzemesinin ve kaya kütlelerinin sınıfları tayin edilebilir. Kayaç malzemelerin dokusal özellikleri ile mekanik ve fiziksel özellikleri arasındaki ilişkilerin varlığı bilinmektedir. Bu çalışmada, kayaç dokularının sayısallaştırılması için Howarth ve Rowlands (1987) tarafından geliştirilen doku katsayısından (TC) faydalanılmıştır. Mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri belirlenen kayaç malzemelerinin TC değerleri tayin edilmiş ve malzemelerin dokusal özellikleri ile arasındaki ilişkiler istatistiksel ve bulanık yöntemler ile modellenmiştir. Elde edilen sonuçlardan hareket ederek, kayaç malzemelerinin dokusal özellikleri TC'den hareket ederek sınıflandırılmış ve her bir sınıfın dayanım özellikleri tayin edilmiştir. Bu aşamadan sonra ise, TC ile dayanım sınıfı tespit edilmiş kayaç malzemesinin kullanılacağı kaya mühendisliği projelerinde ihtiyaç duyulan tasarım problemlerinin çözümüne yönelik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık modelleme, doku katsayısı, kaya mekaniği.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Cüneyt Atilla ÖZTÜRK. ozturkc1@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 63 61.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Kayaç dokusal özelliklerinin sınıflandırılması ve kaya mühendisliği uygulamaları" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale, metni 19.10.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 12.12.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2008 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Classification of rock texture properties and rock engineering applications

Extended abstract

During the design phases of an underground opening, the characterization of rock mass that is consisted of rock material and discontinuities is important for understanding the stability of underground construction against the loads. Rock mass characterization is determined by combining the strength of rock material, which is assumed to be as homogeneous and isotropic, and the properties of discontinuity. Uniaxial compressive strength (σ_c), point load strength (I_s), and Schmidt hammer hardness (R) can be used for understanding the strength of the rock material. Additionally, the cuttability properties of rocks must be defined in order to understand the machine performance of the cutting machine, the cost of the excavation process, and the cuttability behavior of the rock zones for rock engineering projects. This reality increases the importance of researching the relation between physical, mechanical, and cuttability properties of rocks. On the other hand, rock materials are classified on their strength properties, and the design procedures of the underground openings show similarities for same classes of rock materials.

The textural properties of rocks are evaluated by the composition of the grains that form the rock. To evaluate the texture, geometrical properties of the grains which are named as area, perimeter, length, breadth, and orientation must be determined. These properties can be determined by image analysis of the pictures taken by thin sections of the rock material. After determination of these properties, quantification of the rock texture can be possible by using texture coefficient (TC) proposed by Howarth ve Rowlands (1987). They show that there is a relation between TC and rock material strength. In this study, TC is used for classifying rock materials based on textural properties, and the relations among TC and mechanical, physical and cuttability properties of rocks are investigated. To classify the rock material strength based on rock texture properties, the relations among physical, mechanical, cuttability, and textural properties of rocks are investigated. 23 different rock mechanical properties of 5 different study areas are studied for this purpose. Thin sections are gathered from these study areas. After all of these researches, approximately 1000

images taken from 90 different thin sections are analyzed by image processing technique based on using image analysis software. Hence, it is possible to correlate the TC values of rock materials with 23 different mechanical, physical, and cuttability properties of rocks and 43 different relations are investigated.

In order to understand the relations between TC and other mechanical properties of rocks, modelling studies are carried out. 43 regression models are constructed for this purpose between TC and mechanical properties of rock material, and 17 of them are selected based on their success and importance and fuzzified. All of these studies are important in order to understand the relation between textural and strength properties of rock materials.

The study of appointing TC as an input parameter for rock engineering projects is carried out using on the relation between textural and strength properties suggested here. Firstly, estimation of TC is determined based on the rock material litology, and the expected values of TC are estimated for 14 different litology. After quantifying the rock texture by using TC and classification of TC based on strength behavior, it is possible to use TC for rock engineering discipline. Rock material texture is classified into 5 groups that show the strength properties, and the expected uniaxial compressive and point load strength are determined. Classification studies are also made by fuzzy domain and strength behavior of rock material is estimated by fuzzy the classification model which uses TC as input and uniaxial compressive and point load strength as outputs.

After achieving the classification of TC for understanding the strength behavior of rock material, TC is applied for the different rock engineering disciplines. As a result of these, TC is applied for rock mass classification systems such as rock mass rating (RMR). Regionalization of TC and investigation the distribution of mechanical properties based on geostatistical methods, aggregate material degradation estimation and determination of expected TC value of aggregate materials, and lastly estimation of mechanical and cuttability properties of rock material by fuzzy models with expected errors and limitations.

Keywords: Fuzzy modelling, rock texture, rock mechanics.

Giriş

Kayaç malzemelerin dayanım özelliklerinin tayin edilmesi, yapı malzemesi olarak kullanılacak olan kaya kütlelerinin sınıflandırılması ve yapı elemanı olarak kullanılacak olan kayaç malzemesinin uygunluğunun tespiti için son derece önemlidir. Kayaç malzemelerinin dayanım özelliklerinin tayin edilmesi ve yeraltında gerçekleştirilecek olan inşaatın stabilitesinin sağlanması amacıyla yapılacak olan tasarım projelerinde, kayaç malzemelerinin mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri tayin edilmelidir. Bu durum, kayaç malzeme özellikleri arasındaki ilişkilerin araştırılmasının önemini de artırmaktadır. Kayaç malzemelerinin dayanım özelliklerini göstermede en çok kullanılan mekanik parametreler olarak tek eksenli basınç dayanımı (σ_c), nokta yük dayanımı (I_s) ve Schmidt çekiç sertliği (R) söylenebilir. Kayaçların mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri laboratuvar ve arazide gerçekleştirilen deneyler ile elde edilmektedir.

Kayaç malzemelerin dokusal özellikleri ise, kayaç dokusunu oluşturan tanelerin geometrik özellikleri ve tane ile matriks arasındaki ilişkilere dayanmaktadır. Kayaç malzemelerin dokusal özellikleri ile mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri arasındaki ilişkilerin araştırılması, ince kesit analizlerinden elde edilecek olan sonuçların kaya mühendisliği projelerinde kullanılabilir hale gelmesini sağlaması açısından önemlidir. Kayaçların dokusal özelliklerinin sayısallaştırılmasına yönelik gerçekleştirilen en dikkat çekici çalışma Howarth ve Rowlands'a (1987) aittir. Bu çalışmaları ile yazarlar doku katsayısı (TC) fikrini ortaya sürmüşler ve bu katsayı ile kayaç dokularının sayısallaştırılması mümkün hale gelmiştir. Bu tarihten sonra yapılan araştırmalarda, TC ile kayaç malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri arasındaki ilişkilerin incelendiği görülmektedir.

Howarth ve Rowlands (1987), TC konseptini öne sürmenin yanında, kayaçların tek eksenli basınç dayanımları, çekme dayanımları, elastik modülleri, ve sondaj ilerleme hızları ile dokusal özellikler arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, özellikle sondaj

ilerleme hızı ile TC arasında son derece yüksek bir korelasyon bulunmuştur. Bunun yanında, tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı ile TC arasında da önemli korelasyona sahip ilişkiler bulunmuştur. Test edilen kayaçların en düşük TC değerlerinin 0,7'den fazla olduğu ve genellikle orta sert ve sert kayaçlar için deneylerin gerçekleştiriliği görülmektedir. Özellikle sert kayaç grubuna ait kayaçlar üzerinde yapılan araştırmalar TC ile çekme ve basınç dayanımları arasında son derece önemli ilişkilerin olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, elastik modül ile TC arasında gerçekleştirilen araştırmada ortaya çıkan sonuç ise diğerlerinde elde edilen sonuçlardan daha zayıf gözükmektedir.

Ersoy ve Waller (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, kayaçların mekanik özellikleri ile dokusal özellikleri arasındaki ilişkiler TC'den hareket edilerek araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar, bir evvelki çalışmadan bazı farklılıkları içermektedir. Howarth ve Rowlands (1987), tek eksenli basınç dayanımı ile TC arasında 0,92 korelasyon katsayısına (r^2) sahip bir ilişki bulmuşken, Ersoy ve Waller (1995) bu değeri 0,641 olarak tespit etmiştir. Benzer durum çekme dayanımı içinde geçerlidir. Ersoy ve Waller (1995) tarafından yapılan bu çalışmada kayaçların aşınabilirlikleri ile TC arasında yüksek korelasyonda bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir.

Azzoni vd. (1996) tarafından yapılan çalışmada ise kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ve aşınma dayanımları ile TC arasındaki ilişkiler, farklı kayaç türleri için incelenmiş ve dokusal özellikler ile adı geçen mekanik parametreler arasındaki ilişkilerin değişimi hakkında yorumlar yapılmıştır. Ancak, Howarth ve Rowlands (1987) ve Ersoy ve Waller (1995) çalışmalarında olduğu gibi bu parametreler arasındaki lineer bir ilişkinin varlığı hakkında yorum yapılmamıştır. Bu çalışmanın sonucu olarak, çok farklı dayanıma sahip iki farklı kayacın TC değerinin litolojisine bağlı olarak farklı çıkabileceği yorumu getirilmiştir. Ancak, gerek Howarth ve Rowland (1987) ve gerekse Ersoy ve Waller (1995) tarafından gerçekleştirilen analizlerde Azzoni ve diğerleri (1996) tarafından verilen

sonuçların aksi çıkmıştır. Bu çalışmaların yanında, Öztürk ve diğerleri (2004a) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları TC ile kayaç kesilebilirlik parametreleri arasındaki ilişkiyi göstermesi açısından dikkat çekicidir. Ayrıca, Öztürk ve diğerleri (2004b) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, boyut ile TC arasındaki ilişkiler yükleme koşullarına göre araştırılmış ve dayanım-boyut etkisi gibi bir etkinin benzerinin TC-boyut arasında olduğu da tayin edilmiştir.

Sonuç olarak, TC, kayaç dokusu ile dayanım özellikleri arasındaki ilişkileri göstermesi açısından son derece önemlidir. Araştırmaların sonuçları incelendiğinde, özellikle orta sert ve sert kayaçlarda TC ve dayanım özellikleri arasında ciddi ilişkilerin bulunduğu gözlenmiştir. Ancak, tüm bu çalışmalar, laboratuvarında gerçekleştirilen mekanik deneyler ve dokusal analiz sonuçlarından elde edilen veri kümesinin istatistiksel değerlendirilmesi sonucu oluşturulmuştur. Kayaçların dokusal özelliklerinin kaya mühendisliği uygulamalarında direk kullanılmasını sağlayacak modeller veya yaklaşımlar geliştirilmemiştir. Bunun sonucu olarak da, dokusal ve dayanım özellikleri arasında bulunmuş olan bu ilişkilerden yola çıkarak kaya yapılarının tasarımlarına yönelik araştırmalar veya çözümler getirilmemiştir. Bu çalışmada, öncelikle çok daha geniş bir veri kümesi oluşturulduktan sonra ilişkiler araştırılmış ve nihai olarak TC değerinin kaya mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir olmasının sağlanması amaçlanmıştır.

Kayaç dokularının sayısallaştırılması ve TC' nin tayini

Kayaç dokusal özelliklerinin sayısallaştırılması, kayaç dokusunu oluşturan tanelerin geometrik özelliklerinin ve tane ile matriks arasındaki ilişkilerin ortaya çıkartılması ile gerçekleştirilir. Tanelerin geometrik özelliklerini ortaya koymak için her bir tanenin alanı, çevresi, uzunluğu, genişliği ve açısı belirlenmektedir. Tane ile matriks malzemesi arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılması için ise toplam tane alanı ile matriks alanlarının oranlarına bakılmaktadır. Howarth ve Rowlands (1987) tarafından ortaya sürülen TC aşağıda verilen eşitlik yardımı ile tayin edilmektedir.

$$TC = AW \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_1}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right) \right] \quad (1)$$

Bu ifadede kullanılan parametreler ile tane yuvarlaklığının (FF), tane sapmasının (AR), tane açısının (AF) ve tane bağlanma derecesinin (AW) analizleri TC ifadesinde kullanılarak, dokunun geometriksel özellikleri bütünüyle harmanlanmıştır. Bu ifadede kullanılan N_0 sapmamış tane sayısını, N_1 sapmış tane sayısını, FF_0 şekil faktörünü, AR_1 , görünüm oranını, AF_1 açı faktörünü ve AW tane paketlenme yoğunluğunu temsil etmektedir. Bir tanenin sapmışlığı ise AR değerinden elde edilmekte ve bu değer 2,0' ın altında olması tanenin sapmamış, üstünde olması ise tanenin sapmış olduğuna işaret etmektedir. AR, FF ve AW değerlerinin tayini içinse 2, 3 ve 4 no'lu eşitliklerden faydalanılmaktadır.

$$AR = \frac{Uzunluk}{Genislik} \quad (2)$$

$$FF = 4 \times \Pi \times \frac{Alan}{(Çevre)^2} \quad (3)$$

$$AW = \frac{Toplam\ tane\ alanı}{Referans\ alanı} \quad (4)$$

Kayacı oluşturan tanelerin uzunluk ve genişlikleri en büyük ve en küçük feret çapları olarak tanımlanmaktadır. Bunun yanında, bir tanenin açısı ise yatay eksen ile en büyük feret çapı arasındaki açıdır. Kayaç dokusal özelliklerinin sayısallaştırılması için bu eşitliklerin çalıştırılması, bu eşitliklerin çalıştırılabilmesi içinse, kayaç dokusunu oluşturan tanelerin geometrik özelliklerinin tayini gereklidir. Bu geometrik özelliklerin eldesi içinse, kayaç malzemesinden alınan ince kesitler kullanılmaktadır. Bu ince kesitler, mikroskop altında incelendikten sonra, kesitten resimler çekilmekte ve resimlerde bulunan tanelerin analizleri Leica Qwin görüntü işleme yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Bu sayede her bir resmin TC değeri elde edilmektedir. Hata paylarını azaltmak amacıyla bir ince kesitten kesitin homojenliğine bağlı olarak 5 – 10 arasında resimler çekilmektedir. Kayaç malzemesinin nihai TC değeri ise her resme ait TC değerinin arit-

metik ortalamasından elde edilmektedir. Şekil 1’de kayaç malzemelerinin TC değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla laboratuvarda gerçekleştirilecek olan çalışmaların bir özeti verilmiştir.

Kayaç malzemelerin mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri

Kayaç malzemelerinin dokusal özelliklerinin sınıflandırılabilmesi ve sınıfların dayanım özelliklerinin belirlenerek, TC’nin kaya mekaniği uygulamalarında kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla yönelik olarak, bu çalışmada kayaç malzemelerinin mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri ile TC arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu amaca yönelik olarak incelenilen mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Deneysel çalışmalar

TC ile kayaç malzemelerinin diğer özellikleri arasındaki ilişkilerin araştırılabilmesi için içerisinde kayaçların mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri ile TC değerleri olan geniş bir kümesi hazırlanmıştır. Bu çalışmalar sırasında TC değerlerinin tayini için Nasuf ve Öztürk (2005) ’ün çalışmaları ile oluşturulan görüntü işleme laboratuvarından faydalanılmıştır. Kullanılan deney numuneleri, daha önce gerçekleştirilen araştırmalarda mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri belirlenmiş olan kayaç malzemelerine ait ince kesitlerden seçilmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği kayaç numunelerine ait bölgeler hakkındaki bilgiler aşağıda verilmiştir.

Farklı çalışma sahalarından alınan kayaç malzemelerinin yukarıda verilen bu özellikleri ile TC arasındaki ilişkiler araştırılmış ve çıkan sonuçlardan hareket ederek TC’nin kaya mühendisliğinde uygulanabilir bir parametre olmasının sağlanması hedef güdülmüştür.

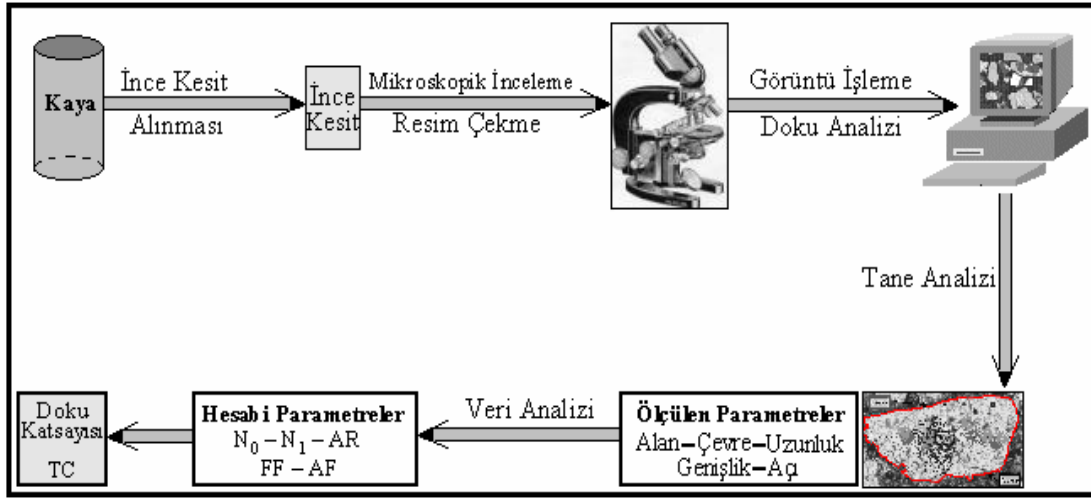
Türkiye Taş Kömürü (TTK) Amasra kömür havzasında daha önce Bilgin ve Shahriar (1987) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile bölgede Maden Tetkik Arama (MTA) tarafından yapılan P1 no’lu sondaja ait karot numuneleri üzerinde kayaç malzemelerin fiziksel, mekanik ve kesile-

bilirlik özellikleri tayin edilmiştir. Bu çalışma ile bu karot numunelerinden alınan ince kesitlere dokusal analizler gerçekleştirilmiş ve bu karotlara ait kayaç malzemelerinin TC değerleri tayin edilmiştir. Bir sonraki aşamada, İstanbul Su ve Kanalizasyon İşleri (İSKİ) Eyüp atıksu tüneline daha önce Bilgin vd. (1988) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan faydalanılmış ve tünel formasyonuna ait kayaçlardan alınan ince kesitlerin TC değerleri tayin edilmiştir. Agrega malzemelerin dokusal özellikleri ile mekanik ve

Tablo 1. Kayaç malzemelerin incelenilen özellikleri

| Fiziksel Özellikler | Mekanik Özellikler | Kesilebilirlik Özellikleri |
|----------------------|------------------------------|---|
| Birim hacim ağırlığı | Tek eksenli basınç dayanımı | Spesifik enerji |
| Porozite | Nokta yük dayanımı | Ortalama kesme kuvvetleri |
| Sonik hız | Schmidt çekiç sertliği | Pik kesme kuvvetleri |
| Doğal nem içeriği | Brazilian çekme dayanımı | Ortalama dikey kuvvetler |
| Su emme | Darbe dayanımı | Pik dikey kuvvetler |
| Tane şekli | LA aşınma kaybı | Birim kazı mesafesinde çıkan pasa hacmi |
| Doluluk oranı | Koni delici sertliği | Keski sarfiyatı |
| | Elastik modül Shore sertliği | Net kazı hızı |

fiziksel özellikleri arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılması için Türkiye’ nin 10 farklı ocağına ait 21 farklı agrega numunesi üzerinde çalışılmıştır. Bunun yanında, daha önce Kahraman (2001) ve Kahraman vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen deneylerde kullanılan kayaç malzemelerinin ince kesitleri üzerinde dokusal analizler gerçekleştirilerek A ve B grubu olarak ikiye ayrılan bu kayaç malzemelerinin dokusal özellikleri ile mekanik ve fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. A grubu olarak adlandırılan ve daha ziyade yeraltı yapılarının açılması sırasında karşılaşılabilecek kaya formasyonlarından oluşan kayaç malzemelerinden 26, B grubu olarak anılan ve doğal yapı taşları olarak sınıflandırılan kayaç malzemelerinden ise 16 farklı kayaç malzemesine analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak, Bilecik bölgesi granit malzemesi üzerinde gerçekleştirilen



Şekil 1. Kayaç malzemelerin TC değerlerinin tayini için gerekli aşamalar

Tablo 2. TTK Amasra kömür havzası ve Eyüp atıksu tüneline ait kayaç malzemelerinin TC değerleri

| TTK Amasra Bölgesi | | Eyüp Atıksu Tüneli | |
|--------------------|------|--------------------|------|
| Derinlik (m) | TC | Tünel (m) | TC |
| 40 | 0.53 | 475.9 | 0.86 |
| 71 | 0.41 | 898.7 | 0.50 |
| 221 | 2.54 | 1334.4 | 0.94 |
| 240 | 1.34 | 1336.6 | 1.07 |
| 259 | 1.06 | 1452.2 | 1.37 |
| 278 | 0.91 | 1694.5 | 1.41 |
| 315 | 0.26 | 1752.2 | 1.20 |
| 336 | 1.02 | 1801.7 | 0.53 |
| 355 | 0.67 | | |
| 367 | 0.24 | | |
| 397 | 0.21 | | |
| 399 | 0.38 | | |

Tablo 3. Agrega malzemelerinin TC değerleri

| Derinlik (m) | TC | Tünel (m) | TC |
|-----------------|------|---------------------|------|
| Kale Maden (1) | 1.98 | Soyak Maden (1) | 2.33 |
| Kale Maden (2) | 2.20 | Soyak Maden (2) | 2.24 |
| Gebze Maden (1) | 2.50 | Gümüştaş Maden (1) | 2.36 |
| Gebze Maden (2) | 2.56 | Gümüştaş Maden (2) | 2.90 |
| Haska Maden (2) | 2.07 | Gümüştaş Maden (3) | 3.03 |
| Haska Maden (3) | 2.15 | Sivas Maden (1) | 2.66 |
| Yapı Maden (2) | 3.09 | Sivas Maden (2) | 2.44 |
| Cebeci (1) | 2.65 | Sivas Maden (3) | 2.27 |
| Cebeci (2) | 1.92 | İslamoğlu Maden (2) | 2.30 |
| Simpaş (1) | 2.61 | İslamoğlu Maden (3) | 2.51 |
| Simpaş (2) | 2.31 | | |

Tablo 4. Kayaç malzemelerinin TC değerleri

| A Grubu | TC | B Grubu | TC |
|-----------------|------|-------------------------|------|
| Serpantin | 1.13 | Mermer (Bursa bej) | - |
| Kireçtaşı | 1.13 | Traverten | 0.85 |
| Kumtaşı-2 | 1.13 | Traverten | 0.90 |
| Diyabaz | 1.94 | Traverten | 0.75 |
| Marn | 0.46 | Kireçtaşı | - |
| Dolomit | - | Traverten (Demre taş) | 0.56 |
| Altere Kumtaşı | 0.66 | Mermer (Korkuteli bej) | 1.22 |
| Killi Kireçtaşı | - | Traverten (Limra) | 1.01 |
| Kireçtaşı | 0.88 | Traverten (Limra) | 0.62 |
| Kumtaşı-1 | - | Traverten (Limra) | 1.03 |
| Marn | - | Traverten | 0.80 |
| Metakumtaşı | - | Dolomitik Kireçtaşı | 1.98 |
| Serpantin | 0.40 | Kireçtaşı (Bunyan Roza) | 1.84 |
| Dolomit | 1.22 | Granit (Anadolu Gri) | 1.89 |
| Kireçtaşı | - | Granit (Kır Çiçeği) | 2.52 |
| Hematit | 0.39 | | |
| Kireçtaşı | 0.37 | | |
| Kireçtaşı | 1.00 | | |
| Marn | - | | |
| Marn | 0.16 | | |
| Marn | - | | |
| Kumtaşı | 0.63 | | |
| Kireçtaşı | 0.34 | | |
| Tüf | 0.46 | | |

deneyler ile granit malzemesinin dokusal özellikleri ve mekanik özellikleri tayin edilmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda, 90 farklı ince kesitten alınan 1000'e yakın resim, görüntü işleme tekniği ile analiz edilmiştir. Tablo 2'de Amasra bölgesi, Tablo 3'te Eyüp atıksu tüneline ve Tablo 4'te kayaç numunelerine ait ince kesitlerin, gerçekleştirilen deneylerden sonra elde edilen ortalama TC değerleri verilmiştir. Bu aşamadan sonra TC ile mekanik parametreler arasındaki ilişkilerin araştırılması mümkün olmuştur.

Modelleme

Modelleme çalışmaları girdisi TC, çıktısı mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik parametreleri olan modellerin oluşturulması ile gerçekleştirilmiş ve regresyon ve bulanık modelleme teknikleri ile elde edilmiştir. Elde edilen modellerin güvenilirliğini test etmek amacıyla, korelasyon katsayısı (r^2), ortalama rölatif hata ($m[E_{(R)}]$) ve hatanın karelerinin ortalamasının karekökü (RMSE) parametrelerinin değerleri kullanılmıştır. 5 farklı çalışma sahasından alınan veriler ile toplam 43 farklı regresyon modeli elde edilmiştir. Bu modellerden de 17 tanesi önem ve başarısına göre bulanık modelleme ile tekrar değerlendirilmiş ve elde edilen modellerin sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

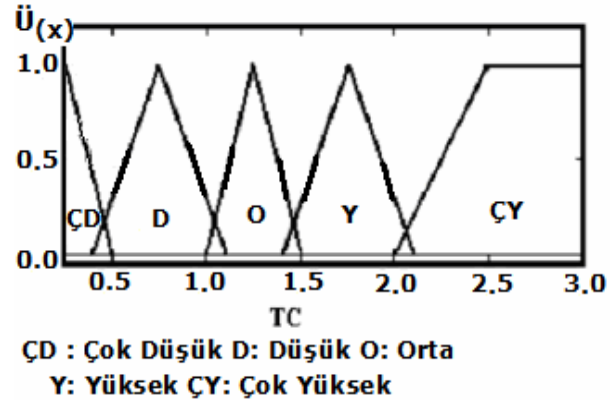
Tablo 5 dikkatle incelendiğinde görülmektedir ki, bulanık yöntem kullanılarak geliştirilen modeller regresyon modellerine göre her durumda çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durum, bulanık modellerin TC değerinin bilindiği durumlarda, mekanik, fiziksel veya kesilebilirlik parametrelerinin kestirimlerinin güvenilirliğini artırmaktadır.

Sınıflandırma

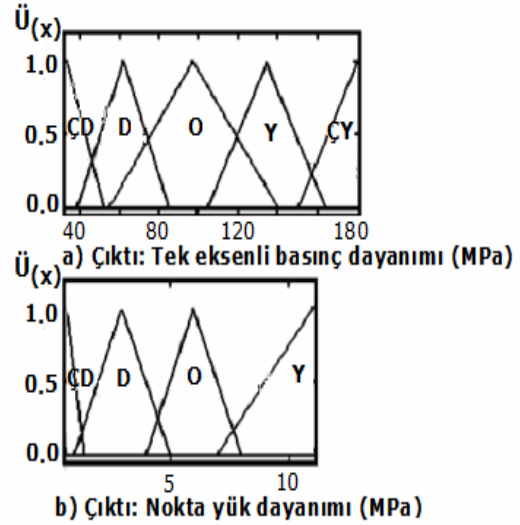
Kayaçların dokusal özellikleri ile mekanik özellikleri arasında yapılan tüm bu araştırmalar, kayaç malzemelerin dokularının sayısallaştırılmasında kullanılan TC değeri ile kayaç malzemelerin dayanım değerleri arasındaki ilişkilerin ciddiyetini göstermektedir. Bu durum, kayaçların TC değerlerinin sınıflandırılabilmesini mümkün kılmaktadır. Sınıflandırma gerek ikili gerek bulanık mantık ilkelerine göre tesis edilmiştir. Bulanık mantık ilkelerine göre TC değerleri sınıflandırıldıktan sonra girdisi TC sınıfı, çıktıları tek eksenli basınç ve nokta yük dayanımları olan bulanık modeller geliştirilmiş ve TC'den hareket edilerek sınıfı belirlenen kayaç malzemelerinin beklenen dayanım değerlerinin kestirimleride gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de kayaç malzemelerin TC değerlerinin bulanık sınıflandırılması verilmiştir.

Bu aşamadan sonra ise yukarıda sözü geçen model oluşturulmuş ve TC değerinden hareket ederek kayaç malzemelerin sınıfı ve sınıfların

beklenen nokta yük ve tek eksenli basınç dayanımları Şekil 3'te verildiği şekliyle belirlenmiştir. Modelin çalışmasını test etmek amacıyla, 14 farklı litolojinin beklenen TC değerleri modele girdi olarak verilmiş ve her bir litolojinin deneylerle tespit edilmiş dayanım değerlerinin ortalamalarının TC'den kestirilen aralıklarda olup olmadıklarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.



Şekil 2. TC'nin bulanık sınıflandırılması



| Bulanık Kural Tabanı | |
|----------------------|--|
| Eğer TC çok düşük | İse α çok düşük I_s çok düşük |
| Eğer TC düşük | İse α düşük I_s düşük |
| Eğer TC orta | İse α orta I_s orta |
| Eğer TC yüksek | İse α yüksek I_s yüksek |
| Eğer TC çok yüksek | İse α çok yüksek I_s yüksek |
| Durulaştırma | Sentroid |

CD : Çok Düşük D: Düşük O: Orta Y: Yüksek ÇY: Çok Yüksek

Şekil 3. Bulanık model çıktı kümeleri, a) Tek eksenli basınç dayanımı, b) nokta yük dayanımı

Tablo 5. Bulanık ve regresyon modellerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

| Bölge | Model | Regresyon Modeli | | | Bulanık Model | | |
|-------------------------|-----------------------|------------------|--------------|-------|---------------|--------------|-------|
| | | r^2 | $m[E_{(R)}]$ | RMSE | r^2 | $m[E_{(R)}]$ | RMSE |
| Amasra Kömür Havzası | Basınç Dayanımı | 0.01 | 15.54 | 73.15 | 0.73 | 8.52 | 45.78 |
| | Nokta Yük Dayanımı | 0.00 | 34.88 | 10.46 | 0.95 | 8.71 | 2.14 |
| | Spesifik Enerji | 0.77 | 10.82 | 1.75 | 0.85 | 9.49 | 1.43 |
| | Ortalama Kesme Kuvvet | 0.51 | 7.95 | 0.14 | 0.71 | 7.88 | 0.14 |
| | Ortalama Dikey Kuvvet | 0.01 | 11.86 | 0.13 | 0.85 | 8.27 | 0.09 |
| Eyüp Atıksu Tüneli | Basınç Dayanımı | 0.89 | 7.59 | 73.18 | 0.90 | 7.19 | 72.38 |
| | Shore Sertliği | 0.83 | 8.87 | 4.60 | 0.89 | 6.25 | 3.03 |
| | Net Kazı Hızı | 0.41 | 39.47 | 2.55 | 0.83 | 18.66 | 1.25 |
| Agrega | LA Aşınma a2 | 0.65 | 13.99 | 3.57 | 0.81 | 11.80 | 2.93 |
| Kayaç Malzemesi A Grubu | Basınç Dayanımı | 0.00 | 36.02 | 36.08 | 0.33 | 28.62 | 26.93 |
| | Sismik Hız | 0.00 | 23.85 | 0.99 | 0.00 | 21.42 | 0.90 |
| Kayaç Malzemesi B Grubu | Basınç Dayanımı | 0.15 | 20.52 | 21.83 | 0.71 | 13.67 | 14.67 |
| | Çekme Dayanımı | 0.29 | 19.91 | 1.21 | 0.69 | 16.20 | 0.95 |
| | Schmidt Sertliği | 0.00 | 10.57 | 5.46 | 0.00 | 8.18 | 4.23 |
| | Darbe Dayanımı | 0.24 | 3.70 | 2.99 | 0.00 | 3.22 | 2.69 |
| Genel | Basınç Dayanımı | 0.33 | 24.74 | 21.94 | 0.43 | 19.81 | 17.80 |
| | Nokta Yük Dayanımı | 0.27 | 31.10 | 1.42 | 0.37 | 28.61 | 1.33 |

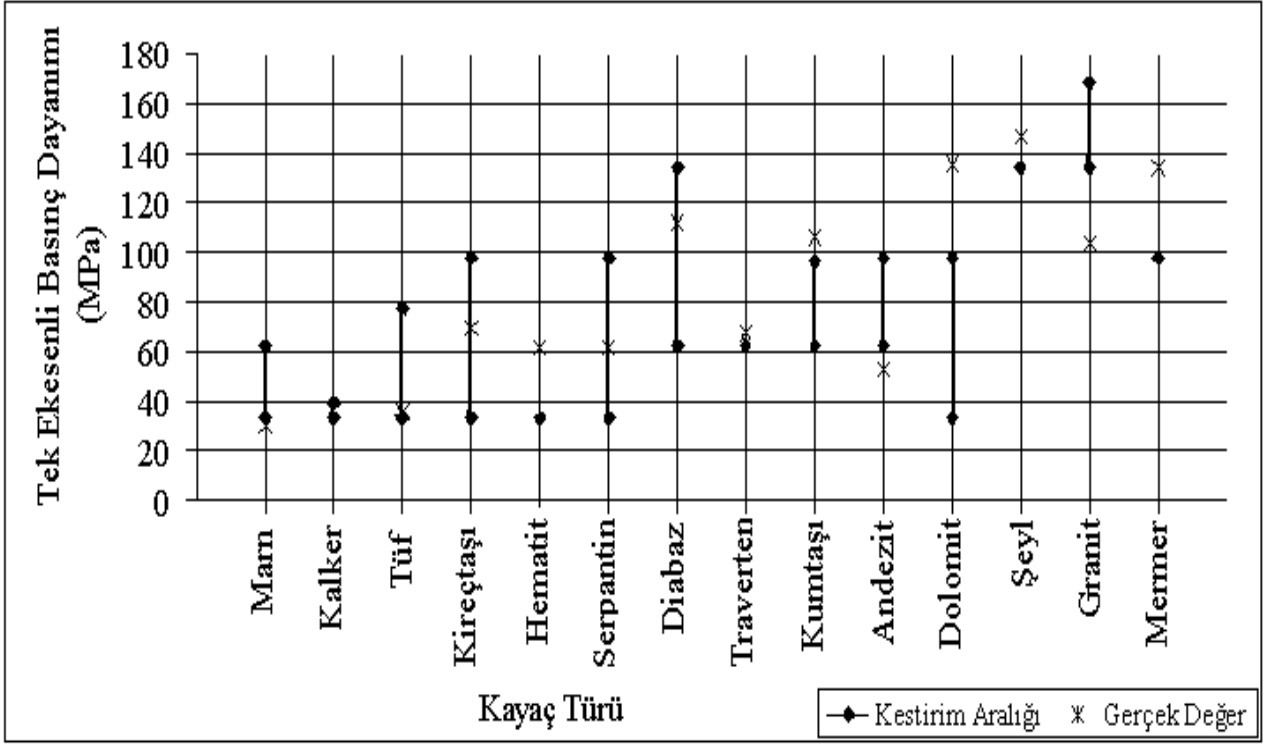
Şekil 4'ten de görüleceği üzere, elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlar ile son derece uyumludur. Standart sapmanın sıfır olduğu hematit, şeyl ve mermer malzemelerinde sadece tek bir nokta kestirilebilmişken, diğer tüm kayaç malzemelerinde basınç dayanımının hangi aralıkta olacağını kestirimi yapılabilmektedir. Dolomit ve granit örnekleri dışındaki tüm örneklerde deneysel basınç dayanımı, kestirim basınç dayanımı değerlerinin belirlenen aralıklarında çıkmıştır ki, bu da ortaya sunulan modelin güvenilirliğini artırıcı yöndedir. Özellikle granitte deneysel sonucun beklenenden düşük çıkmış olması, kestirim basınç dayanımı değeri ile deneysel basınç dayanımı değeri arasında bir fark ortaya çıkarmıştır. Bu durumsa, kestirim değerinin güvenilirliğini destekleyici niteliktedir. Şekil 5 incelendiğinde görülmektedir ki, TC'nin bulanık modelleme ile sınıflandırılmasından elde edilen nokta yük dayanımları kestirim aralıkları, deneysel nokta yük dayanımları sonuçları ile son derece uyumludur. Serpantin ve dolomit malzemelerinde elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile farklılık göstermektedir. Onun dışındaki tüm kayaç malzemelerinde kestirim değer aralıkları gerçek değerleri kapsayacak şekilde elde edilebilmiştir.

TC değeri tayin edilen kayaç malzemesinin, litolojisinin de belli olduğu durumlarda TC sını-

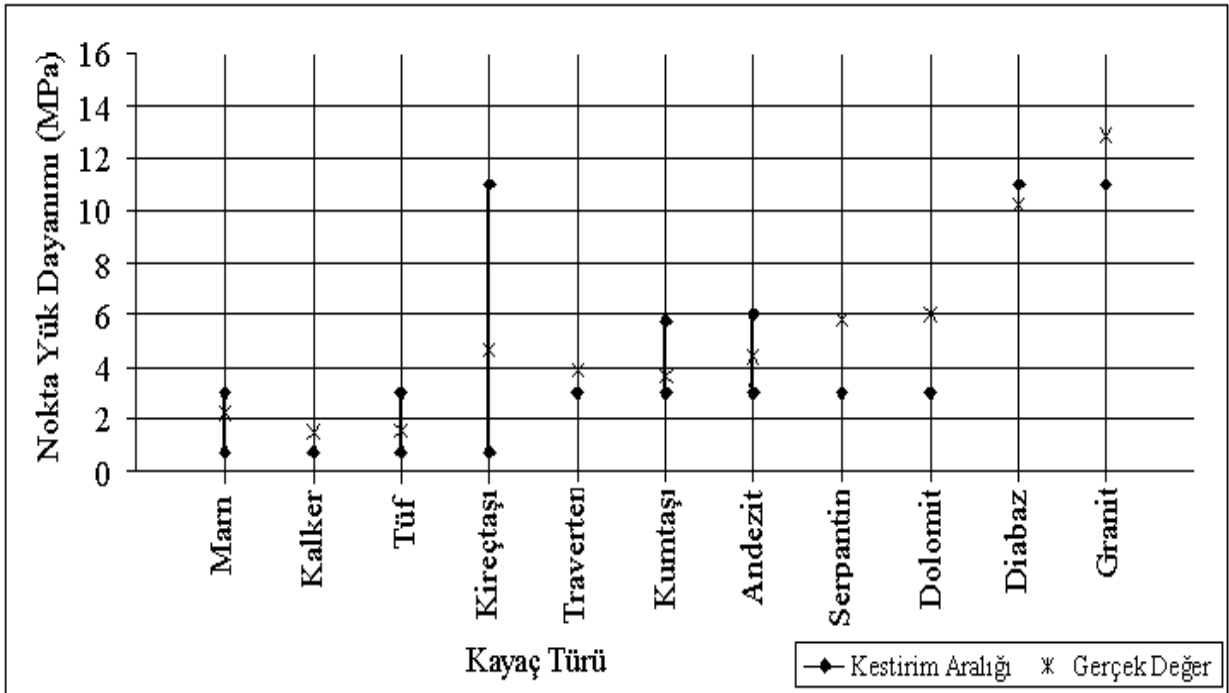
fının ve dayanım değerlerinin karakterizasyonu ise Tablo 6'da verilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile kayaçların dokusal özellikleri sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma ile kayaç malzemelerinin doku katsayılarının belirlenmesinin ardından, incelenen kayaç malzemelerinin hangi sınıfa ait olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmadan sonra ise sınıflama bulanıklaştırılmıştır. Bu sayede, doku katsayıları bulanık olarak sınıflandırılmış ve ileri model uygulamalarında kullanılabilir hale gelmiştir. Tüm bunlara ek olarak, sınıfı belirlenen kayaçların mekanik özelliklerinin kestirilebilmesi amacıyla bulanık model esaslarına dayandırılarak bir model geliştirilmiştir. Bu sayede, TC değerinin tespitinden sonra, kayaç malzemesinin sınıfı ve o sınıfa ait kayaç malzemelerin mekanik özelliklerinin kestirimi gerçekleştirilebilir hale gelmiştir.

Modellerin güvenilirliğini test etmek amacıyla, elde edilen veri setinden faydalanılmıştır. ve elde edilen sonuçlar Şekil 4 ve Şekil 5'te grafikler halinde sunulmuştur. Sonuçların uyumluluğu yapılan modellerin güvenilirliğini artırıcı yönde olmuştur. Son olarak, kayaç malzemelerinin litolojilerine bağlı olarak beklenen TC değerleri ve TC değerinden olan sapmalar dikkate alınarak litolojilerine göre TC değerlerinin sınıfları tayin edilmiş ve her sınıfın beklenen tek



Şekil 4. TC sınıflamasından hareket edilerek kestirilen tek eksenli basınç dayanımlarının gerçek tek eksenli basınç dayanımları ile karşılaştırılması



Şekil 5. TC sınıflamasından hareket edilerek kestirilen nokta yük dayanımlarının gerçek nokta yük dayanımları ile karşılaştırılması

Tablo 6. Kayaçların TC sınıfları ve dayanım kestirimleri

| TC Sınıfı | Kayaç Türü | Beklenen σ_c (MPa) | Beklenen I_s (MPa) |
|------------|---|---------------------------|----------------------|
| Çok Düşük | Marn, Kalker, Hematit | 33.5 | 0.7 |
| Düşük | Tüf, Kireçtaşı Serpantin, Traverten, Kumtaşı, Dolomit | 62.3 | 3 |
| Orta | Diabaz, Andezit, Şeyl, Mermer | 97.5 | 6 |
| Yüksek | Granit | 134 | 11 |
| Çok Yüksek | Granit | 170 | 11 |

eksenli basınç ve nokta yük dayanımlarının karakterizasyonu elde edilmiştir.

TC' nin uygulama alanları

Kayaç malzemelerinin TC değerlerinin tayin edilmesi, kayaçların mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri ile aralarındaki ilişkilerin tayin edilmesi ve TC' nin sınıflandırılması ile birlikte TC değerinin kaya mekaniği uygulamalarında kullanılabilir bir parametre şeklini alması mümkün hale gelmiştir. Bu amaca yönelik olarak, TC nin kaya mühendisliği projelerinde nasıl uygulanabileceğine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Şekil 6'da TC' nin uygulama alanları olarak gerçekleştirilen çalışmaların bir özeti verilmiştir.

TC değerinin sınıflandırılması, sınıfların dayanım özelliklerinin belirlenmesi ve kayaç litolojilerine göre TC değerlerinin tespiti yukarıda verilmiştir.

Şekil 6'dan görüleceği üzere TC' nin uygulanmasına yönelik, 4 farklı alanda araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, TC' nin kaya kütle sınıflama sistemlerine girdi parametresi olarak atanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaca yönelik olarak, TC, RMR sınıflama sistemlerinde girdi olarak kullanılmıştır. RMR sisteminde TC sınıflarına ait olan puanlar bulanık yöntemler ile tayin edilmiştir.

Bu durum, kaya kütle karakterizasyonu çalışmalarında, süreksizlik özelliklerinin ölçülmesinde

sonra ince kesit analizleri kayaç malzemesinin dayanım özelliğinin elde edilmesini sağlaması açısından son derece önemlidir.

Bir sonraki aşamada ise, TC bölgesel değişken olarak atanmış ve TC' nin bir tünel güzergahı boyunca dağılımı jeostatistiksel olarak araştırılmıştır. Öztürk ve Nasuf (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada tünel güzergahında bulunan jeoteknik parametrelerin jeostatistiksel dağılımı daha önce araştırılmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, TC' nin bölgeselleştirilebildiğini göstermesi açısından önemli olmuştur. Bunun yanında çapraz variogramlar ve kokriging teknikleri ile çalışılarak, TC'den hareket ederek çalışma sahasındaki mekanik parametrelerin dağılımları yine jeostatistiksel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, TC' nin bölgesel değişken olarak kullanılması ve yer araştırmalarında jeoteknik parametrelerin dağılımlarını tayin etmede kullanılabilirliğini göstermesi açısından son derece faydalı olmuştur.

Agrega malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, öncelikle agrega malzemelerinin beklenen TC değerlerinin tayini yapılmış ve agregaların TC değerlerinin 2,0 – 3,0 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu aşamadan sonra agrega malzemelerinin kullanılabilirliğinin tayini için son derece büyük önem arz eden Los Angelas (LA) aşınma kaybının kestirimi için girdisi TC çıktısı LA aşınma kaybı olan bulanık model geliştirilmiştir. Bu modelin % 11 hata ile beklenen değeri kestirmesi ise son derece önemli bir sonuçtur.

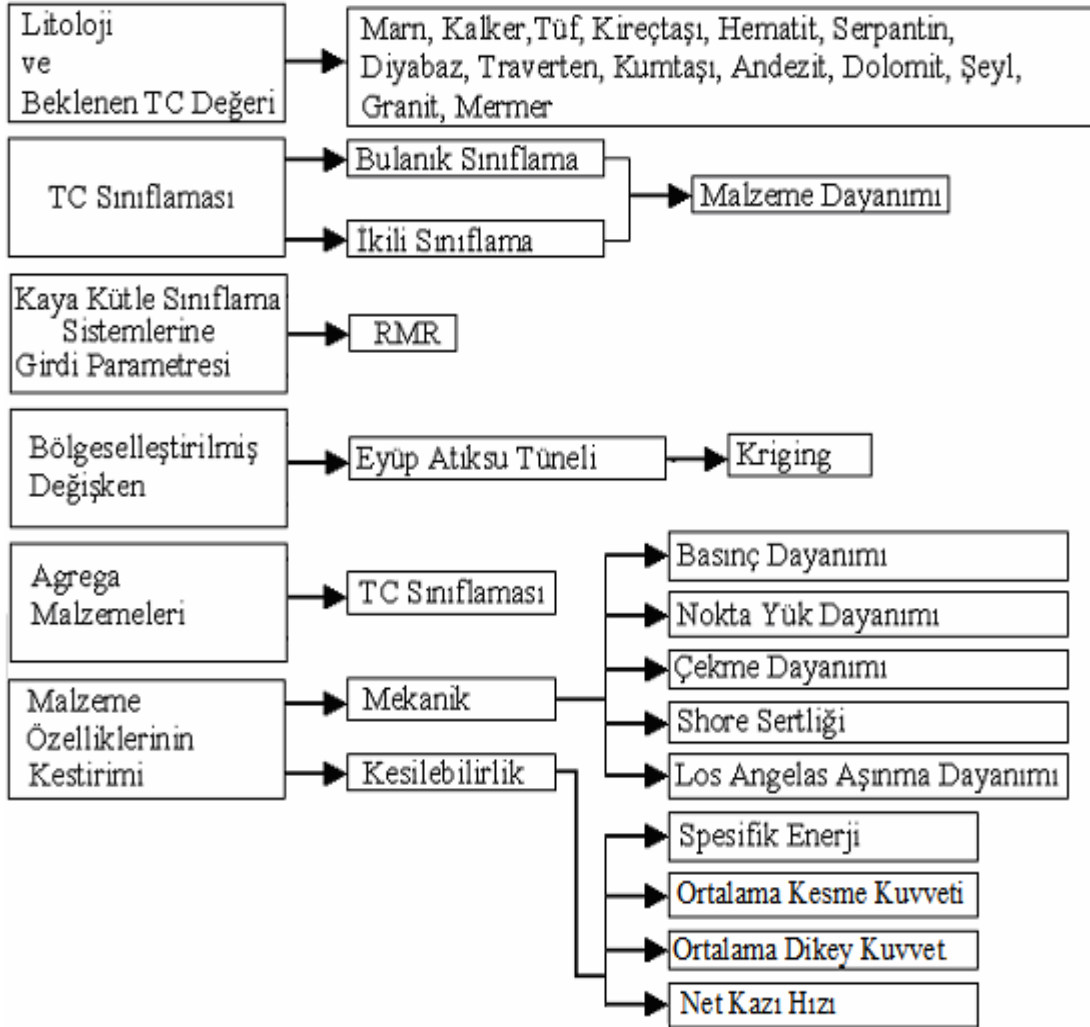
Son olarak ise, kayaç malzemelerin mekanik ve kesilebilirlik özelliklerinin TC'den kestirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilen bulanık modelin uygulanabilirliklerine ilişkin sınırlamalar ve sonuçlarının güvenilirlikleri tayin edilmiştir. Bu modellerin kullanılacağı durumlarda, model kullanıcılarının, kayaç litolojisine, dayanım değerlerine ve güvenilirlik değerlerine göre elde ettikleri sonuçları değerlendirmeleri amacıyla ilgili sınıflandırmalar yapılmıştır.

Sonuçlar

Kayaç malzemelerinin dokusal özelliklerinin sayısallaştırılması ve doku katsayısı (TC) de-

ğerin sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, öncelikle farklı çalışma saha- larından alınan kayaç malzemelerine ait ince kesitlerin TC değerlerinin tayini gerçekleştirilmiştir. Daha sonra TC ile kayaçların mekanik, fiziksel ve kesilebilirlik özellikleri arasındaki ilişkiler regresyon ve bulanık modelleme teknikleri ile araştırılmış ve çalışma sahasına ve kayaç litolojisine bağlı olarak TC ile mekanik parametreler arasında önemli ilişkiler bulunmuştur. Bu sonuçlardan hareket ederek, kayaç malzeme- lerinin TC değerleri 5 farklı bulanık sınıfa ayrılmış ve her bir sınıfın dayanım özelliğinin tayini için bulanık model geliştirilmiştir. Model sonuçlar ile deneysel sonuçların uyumluluğu TC'nin kaya mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir yeni bir girdi parametresi olarak atanmasını sağlamıştır. Bu aşamadan sonra ise

TC'nin kaya mekaniği uygulamalarında kullanı- labilirliği araştırılmış ve bu amaca yönelik olarak, kaya kütle sınıflama sistemleri, bölgesel değişken olarak TC'nin değerlendirilmesi, agre- ga malzemelerinin sınıflandırılması ve kayaç malzemelerinin mekanik ve kesilebilirlik özel- liklerin TC'den kestimi amacıyla uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, TC'nin kaya mühendisliğinde güvenilir olarak kullanılacak yeni bir girdi parametresi olarak atanmasını sağlamış olması açısından dikkat çekici olmuştur. Bunun yanında, TC değerinin tayini için gereken numune miktarının az olması, veri sayısının son derece sınırlı olduğu kaya mühendisliği projelerinde veri sayısının artırıl- masının sağlanması açısından da son derece önemlidir.



Şekil 6. TC değerinin kaya mekaniğinde uygulama alanları

Kaynaklar

- Azzoni, A., Bailo, F., Rodena, E., ve Zaninetti, A., (1996). Assessment of Texture Coefficient for Different Rock Types and Correlation with Uniaxial Compressive Strength and Rock Weathering, *Rock Mechanics Rock Engineering*, **29**, 1, 39-46.
- Bilgin, N., ve Shahriar, K., (1987). Madenlerde mekanize kazı için bir ölçme sisteminin geliştirilmesi ve TTK Amasra taşkömürü kömür yataklarına uygulanması, TÜBİTAK Projesi, No. 674.
- Bilgin, N., Seyrek, T., ve Shahriar, K., (1988). Golden Horn clean-up 397 contributes valuable data, *Tunnels Tunneling*, Haziran, 41-44.
- Ersoy, A., ve Waller, M. D., (1995). Textural characterization of rocks, *Engineering Geology*, **39**, 123-136.
- Howarth, D.F., ve Rowlands, J.C., (1987). Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties, *Rock Mechanics Rock Engineering*, **20**, 57-85.
- Kahraman, S., (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, **38**, 981-994.
- Kahraman, S., Günaydın, O., ve Fener, B., (2005). The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, **42**, 584-589.
- Nasuf, E., ve Öztürk, C. A., (2005). Kayaçların doku özelliklerinin görüntü işleme yöntemi ile incelenmesi ve doku özellikleri ile mekanik özellikler arasında ilişki kurulması, TÜBİTAK Projesi, No. 199Y046.
- Öztürk, C. A., Nasuf, E., ve Bilgin, N., (2004a). The assessment of rock cuttability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient, *Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy*, **7**, 397-403.
- Öztürk, C. A., Özbakır, A. D., ve Nasuf E., (2004b). Nokta yük ve tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi, *6. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Ekim 21-22, Sivas.
- Öztürk, C. A. ve Nasuf, E., (2002). Geostatistical assessment of rock zones for tunnelling, *Tunneling and Underground Space Technology*, **17**, 3, 275-285.