



Travertenlerin Donma-Çözülme Döngüsü Sonrasındaki Tek Eksenli Basınç Dayanımı Kaybının Fiziko-Mekanik Parametreler Kullanılarak Tahmin Edilmesi

Estimating the Uniaxial Compressive Strength Loss of the Travertines by Using Physico-Mechanical Parameters After Freeze-Thaw Cycle

Mert Mutlu¹ , Murat Kalkan^{2*} 

¹ Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, 68100 ve Aksaray, TÜRKİYE

² Jeoloji Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, 68100 ve Aksaray, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 04/12/2023

Kabul / Accepted: 22/01/2024

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2024

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2024

Öz

Doğal taşların inşaat sektöründe bir yapı malzemesi olarak kullanımı günden güne bir artış trendi içerisinde. Travertenin yapısı gereği dayanıklı, aşınmaya karşı dirençli, ucuz, kolay işlenebilir ve hafif olması nedeniyle diğer doğal taşlara göre iç ve dış kaplamalarda kullanılabilirliği daha fazladır. Özellikle zorlu atmosferik koşullara sahip soğuk bölgelerde bu taşların dayanıklılığın belirlenebilmesi için donma-çözülme testinin yapılması gerekmektedir. Yapılan bu test sonucu eğer bir doğal taşın tek eksenli basınç dayanımı değeri kaybı %20'den fazla ise bu malzemenin yapı sektöründe kullanılması tavsiye edilmemektedir. Yapılan bu çalışmada Denizli travertenleri için literatürdeki çeşitli fiziko-mekanik parametreler kullanılarak kurulan çoklu regresyon modeliyle bu değer kaybı oranının donma-çözme deneyi yapmadan tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çoklu regresyon analizi yöntemi olarak geriye doğru eleme tekniği tercih edilmiştir. Model denkleminin güvenilirlik değeri (R^2) 0,98 olarak hesaplanmış olup, oldukça yüksektir. Çalışma kapsamında geliştirilen bu model, araştırmacılara Denizli bölgesi travertenlerinin donma-çözülme testi yapmadan tek eksenli basınç dayanımındaki kaybın önceden kolayca, minimum maliyetle belirlenebilmesi açısından çok yararlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler

“Traverten, Tek eksenli basınç dayanımı, Donma-çözülme, Çoklu regresyon analizi, Geriye doğru eleme tekniği”

Abstract

The use of natural stones as a building material in the construction industry is becoming increasingly popular. Since travertine is durable due to its structure, abrasion-resistant, cheap, easy to process and lightweight, it can be used more in interior and exterior coatings than other natural stones. A freeze-thaw test is required to determine the durability of these stones, especially in cold-regions with harsh atmospheric conditions. As a result of this test, if the percentage loss of uniaxial compressive strength value of a natural stone is more than 20%, it is not recommended to use this material in the construction sector. In this study, it was aimed to estimate this depreciation rate without performing a freeze-thaw experiment with a multiple regression model established using various physico-mechanical parameters in the literature for Denizli travertines. Backward elimination technique was used for the multiple regression analysis method. The model equation's reliability value (R^2) was calculated as 0.98, which is quite high. This model developed within the scope of the study will be very useful for researchers to predict the loss of uniaxial compressive strength of Denizli region travertines easily and at minimum cost without performing freeze-thaw tests.

Key Words

“Travertine, Uniaxial compressive strength, Freeze-thaw, Multiple regression analysis, Backward elimination technique”

1. Giriş

Belirli niteliksel gereksinimleri karşılayabilmek için ocaktan büyük bloklar halinde çıkarılan farklı türdeki kayalar, doğal taş işleme tesislerinde boyutlandırılıp işlenerek günümüzde inşaat ve dekorasyonda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Farklı kökene sahip kireçtaşı, mermer, andezit, bazalt, granit ve traverten gibi kaya türleri iç ve dış mekân uygulamaları, mutfak tezgâhı, kaldırım, döşeme, kaplama gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal taşların dış mekân uygulamalarında kullanılabilirliği konusunda en önemli sorun değişken iklim ve çevre koşullarına olan dayanımı ve uzun süre kullanılabilirliğidir. Soğuk bölgelerde gelişen donma-çözülme olayı, doğal taşların başlangıçtaki mekanik mukavemetinin zaman içinde azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle doğal taşların don sonrası basınç dayanımı değişimi ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur.

Literatür irdelenecek olunursa çeşitli araştırmacıların yaptığı benzer nitelikte çalışmalar mevcut olup bunlardan bazılarını detaylı olarak değinilmiştir. Yavuz vd., (2006) gerçekleştirdikleri çalışmada, 12 farklı karbonatlı kayaç numunesini donma-çözme ve termal şok deneylerine tabi tutmuşlardır. Buradan elde ettikleri verileri kullanarak kayaçların bu parametrelerini çoklu regresyon analizi yöntemiyle tahmin edebilen bir model geliştirmişlerdir. Tan vd., (2011), tek eksenli ve üç eksenli sıkıştırma testleri ile donma-çözülme döngülerinin bir fonksiyonu olarak Çin'in Tibet bölgesindeki biyotitli granitin mekanik özelliklerindeki bozulmayı araştırmışlardır. Bayram (2012), çalışmasında kireçtaşı numunelerinin donma-çözülme testi sonrası tek eksenli basınç dayanımlarındaki yüzde kayıp değerlerini, çoklu regresyon yöntemini kullanarak % 95 olasılıkla doğru tahmin edebilen bir istatistiksel model geliştirmiştir. Liu vd., (2015) donma-çözme döngülerinden önceki ve sonraki kayaç özelliklerine dayalı olarak tek eksenli basınç dayanımlarını belirlemek için ampirik bir denklem geliştirmiştir. Momeni vd., (2016) üç farklı granitoid kayacın donma ve çözülme olayına karşı mühendislik davranışlarını karşılaştırdıkları çalışmalarında, donma-çözülme döngülerinin sayısının artmasıyla gözeneklilik ve su emme değerleri de artan bir artış gösterirken, V_p dalga hızı, çekme mukavemeti, ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Kahraman ve Eser (2016) Elazığ bölgesi travertenlerinin çeşitli fiziko-mekanik özelliklerini kullanarak kaplama taşı olarak kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, bu traverten çeşidinin don oluşumu olmayan, az yağış alan bölgelerde kaplama taşı olarak kullanılabilirliği sonucuna ulaşmışlardır. İnce ve Fener (2016), Kapadokya yöresinden aldıkları 10 piroklastik kayaç numunesinin çeşitli fiziko-mekanik özelliklerini kullanarak kayacın donma-çözme döngüsü sonucu oluşan basınç kaybını tahmin etmek için bir istatistiksel model geliştirmişlerdir. Jamshidi vd. (2017) yaptıkları çalışmada geliştirdikleri model ile 12 traverten örneğinin fiziko-mekanik parametrelerini kullanarak don sonrası mekanik dayanımını tahmin etmeye çalışmışlardır. Amirkiyaei vd., (2021) makroskobik mekanik özelliklerin bozulma yasasını niceliksel olarak tanımlamak için donma-çözülme döngülerinden önce ve sonra gözeneklilik değişimini kullanarak hasar modelleri önermişlerdir. Huang vd. (2022) çalışmalarında, donma-çözülme mukavemeti kaybını tanımlamak için elastisite modülü ve çekme mukavemetinin yanı sıra başlangıç gözenekliliğinin de önemli bir parametre olduğunu öne sürmüşlerdir.

Traverten, kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren sıcak yeraltı sularının, hava ile temasında, karbondioksitin (CO_2) uçmasından sonra, tabakalar halinde birikmesi ile meydana gelmiş bir karbonat kökenli kayadır. Travertenler, tektonik bir hat boyunca yeryüzüne çıkan kalsiyum ve bikarbonatça zengin sıcak yer altı sularının çevresinde ince tabakalı ve laminalı oldukça sert karbonat çökeltileri olarak da tanımlanabilmektedirler (Guo & Riding, 1998; Pentecost, 2005; Pedley, 2009; Çobanoğlu vd., 2010). Türkiye'deki önemli traverten oluşum alanları Ağrı-Diyadin, Erzincan-Otlukbeli Gölü, Denizli-Pamukkale, Sivas-Sıcakçermik Erzurum-Hölenk, Van-Başkale, Hadim-Aksazak, Hadim-Yerköprü, Sındırgı-Hisaralan, Cihanbeyli-Bolluk Gölü, Bolu-Akkale, gibi birçok yerde oluşum gözlenmektedir (Polat, 2013). Travertenlerinin yapı ve mimaride kullanım alanının artmasıyla kimyasal bileşimleri ve fiziko-mekanik özellikleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çalışmaya konu olan Denizli travertenleri ile ilgili de jeomekaniksel birçok çalışma literatürde mevcuttur. Özpınar vd. (2001), Kocabaş (Denizli) travertenleri ve Kömürcüoğlu (Kocabaş) travertenlerinin jeolojik, petrografik özellikleri ve oluşumunu incelemişlerdir. Çalışmalarında, fabrika atığı mikronize traverten tozlarının belli oranlarda agregaya katılması halinde üretilen betonların dayanımlarında artış oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Çelik ve Çobanoğlu (2019), Denizli traverteninin temel fiziksel özellikler ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin, ultrasonik hız (V_p ve V_s) değerlerinden tahmini amaçlamıştır. Sonuç olarak çalışmada, V_p ve V_s dalga hızlarının artışıyla tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin üstel olarak arttığı ortaya konmuştur.

Donma-çözülme döngüsü travertenlerde fiziksel aşınmanın ana nedenidir ve yüksek derecede taşın bozulmasına neden olmaktadır. Donma-çözülme döngüsü sırasında yüzey veya yeraltı suyu kılcal etkiyle travertenin içine nüfuz eder. Sıcaklık $0\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altına düştüğünde su, boşluklu yapıya sahip travertenin gözeneklerinde ve süreksizliklerinde donarak %9'luk hacim genleşmesi nedeniyle boşlukların yüzeylerine baskı uygular. Bu döngünün tekrarlanması yapı taşlarında istenmeyen aşınmalara neden olur (Fener & İnce, 2015).

Donma-çözülme sonucu bozulan kayacın tek eksenli basınç dayanımındaki değişim, kayaçların fiziksel özelliklerine, mekanik özelliklerine ve iklim koşullarına bağlıdır. Yapı malzemeleri için tek eksenli basınç dayanımındaki kayıp yüzdesi %20'den daha az olmalıdır. Hesaplanan bu değer eğer %20'den fazla ise, söz konusu doğal taş soğuk bölgelerde kullanılmamalıdır (Erguvanlı, 1995). Bu nedenle kayaçların kullanımı öncesi, özellikle dış mekân kaplaması olarak kullanılacaksa don sonrası basınç dayanımındaki değişimin belirlenmesi, uzun ömürlü olabilmeleri ve kullanım amacına tam olarak hizmet edebilmeleri açısından büyük önem arz etmektedir. Ancak donma-çözülme testi yöntemi son derece zahmetli ve zaman alıcıdır. Deney prosedürünün standardında kullanılan donma-çözülme testi cihazının maliyeti yüksektir. TS EN 12371 (2003) donma dayanım deneyi testi standardına göre;

- Önceden istenilen özellikleri belirlenmiş (örneğin Tek Eksenli Basınç Dayanımı), traverten malzemesinden alınan karot veya küp numuneleri 20 °C suda 12 saat bekletilerek suya doygun hale getirilir.
 - Suya doyurulmuş numuneler, sudan çıkarılıp soğutma hızı 4 saatte -20 °C'ye düşecek şekilde ayarlanmış derin dondurucuya konur ve 12 saat süre ile bekletilir.
 - Çıkarılan numuneler tekrar 20 °C suya daldırılarak 12 saat daha bekletilir ve buzları tamamen çözündürülür.
- Yukarıda bahsedilen ilk 3 adım, tek bir donma-çözülme döngüsü olup bu kullanılacak olan traverten malzemesinin kullanılacak bölgenin iklim şartlarına göre en az 25 döngü olacak şekilde tekrarlanır. Bu işlemler gerekli sayıda tekrarlandıktan sonra donma çevrimleri sonucu oda sıcaklığında traverten numuneleri 24 saat ve ardından 70 °C fırında 24 saat kurutulup, tek eksenli sıkıştırma testine tabii tutularak don sonrası basınç kaybı deneyi tamamlanır. Yukarıda bahsedilen deney prosedürü uzun, zahmetli, zaman alıcı ve masraflı bir süreç olup, yapılmasının gerekliliği tartışılmazdır.

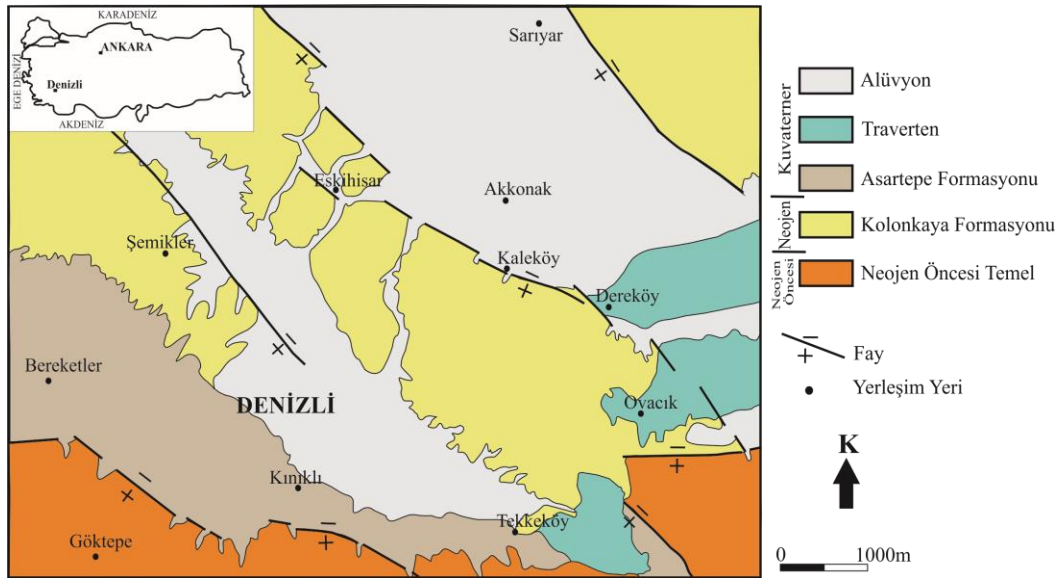
Yapılan bu çalışmanın temel amacı, özellikle zorlu atmosferik koşullara sahip soğuk bölgelerde yapı malzemesi olarak travertenlerin kullanılabilirliğinin kolaylıkla belirlenmesidir. Bunun belirlenmesi için gerekli olan donma-çözülme testinin yapılmadan, mümkün olan minimum fiziko-mekanik parametreleri kullanarak, donma-çözülme döngüleri sonrasındaki tek eksenli basınç dayanımındaki kaybı bir model ile yüzdesel olarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kurulan bu model "Don Sonrası Basınç Kaybı" (DSBK) tahmin modeli olarak adlandırılmıştır. Geliştirilen bu model araştırmacılara, Denizli bölgesi travertenlerinin donma-çözülme testi yapmadan tek eksenli basınç dayanımındaki kaybı yüzdesel olarak, minimum maliyetle önceden kolayca tahmin edebilmelerini sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Denizli Travertenlerinin Jeolojik Konumu

Ege genişleme bölgesinin doğu kesimini oluşturan Batı Anadolu grabenlerinden birisi olan Denizli Grabeninin kuzey ve güney kenarları normal faylarla sınırlandırılmış KB-GD uzanımlıdır. Grabenin oluşumu ve graben dolgusunun incelenmesine yönelik bir çok çalışma yapılmıştır (Taner, 1975; Şimşek, 1982; Sun, 1990; Taner, 2001; Topal, 2003; Koçyiğit, 2005; Westaway vd., 2005; Kaymakçı, 2006; Tagliassachi, 2018).

İnceleme alanının temelini oluşturan Neojen Öncesi Temel, alta Menderes Masifinin en üst seviyelerine ait Paleosen-Alt Eosen yaşlı rekristalize pelajik kireçtaşı ve şeylleri ile başlamaktadır. Bu birim üzerine tektonik bir dokanakla Üst Triyas-Liyas yaşlı, masif-kalın tabakalı, genellikle gri, koyu gri dolomitik kireçtaşları yer almaktadır. Bunların üzerine Dogger-Üst Kretase yaşlı gri, koyu gri, masif kalın tabakalı, seyrek ufak çört yumrulu kireçtaşları gelir (Okay, 1989). Neojen öncesi temel üzerine uyumsuzlukla Denizli Grubuna ait Neojen (Üst Miyosen) yaşlı kiltası, silttaşı, kireçtaşı ve marn ara düzeyleri içeren egemen kumtaşı istifi ile belirgin Kolonkaya Formasyonu gelir (Şimşek, 1982). Kolonkaya Formasyonu üzerinde uyumsuzlukla Pliyo-Kuvaterner yaşlı konglomera, kumtaşı ve silttaşlarından oluşan alüvyal kökenli Asartepe Formasyonu yer almaktadır (Ercan vd., 1977). En üstte ise Kuvaterner yaşlı traverten ve alüvyon çökeller yer alır (Şekil 1).



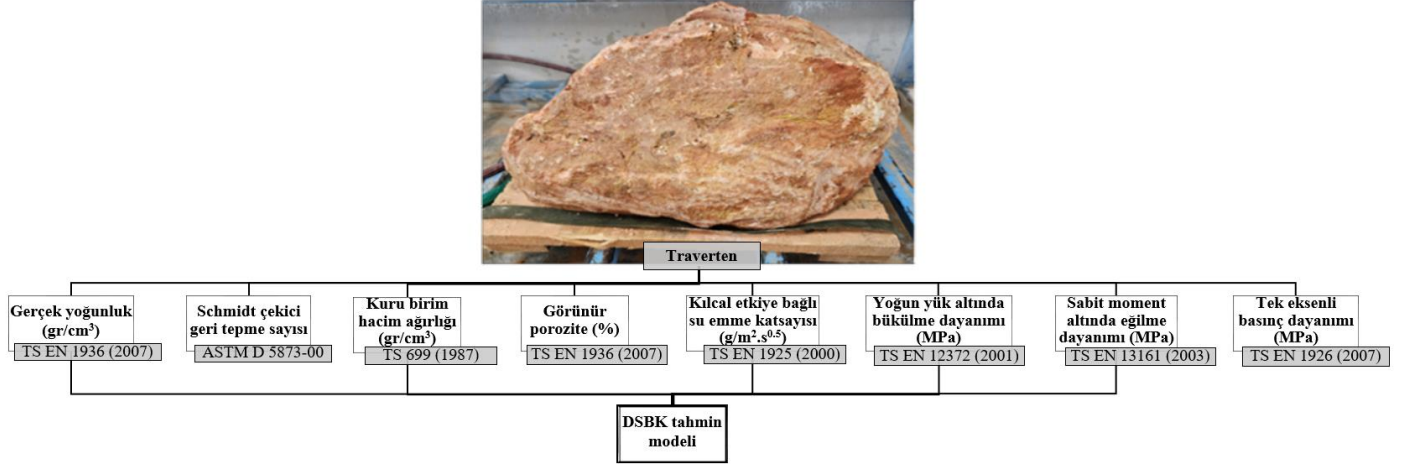
Şekil 1. Denizli Bölgesinin Jeolojik Haritası (Topal, 2003)

2.2. Uygulama çalışmasında kullanılan deney standartları

Çalışma kapsamında, Denizli yöresindeki travertenler üzerinde Çobanoğlu vd., (2010)'nin çalışması referans kaynak olarak alınmıştır. Referans çalışmasının amacı, ülkemizde ve dünyada Denizli travertenlerinin büyük bir öneme sahip olması nedeniyle, yapı malzemesi olan travertenin kullanım alanlarının eldeki fiziksel, mekanik ve kimyasal parametreler ışığında belirlenmesi ve böylece bunların daha

verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktır. Bu amaçla Denizli ilindeki 51 farklı traverten ocağına ait bilgileri kullanarak bir traverten bilgi sistemi oluşturmuşlardır.

Çobanoğlu vd., (2010) Denizli travertenleri üzerinde yaptıkları deneysel çalışmaları TS EN standartlarına göre gerçekleştirmişlerdir. İlgili deneylerde 7*7*7 cm boyutlarında küp ve 3*7*18 cm boyutlarında plaka şekilli örnekler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında Şekil 2'deki deney standartları kullanılarak, Tablo 1'deki gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar sunulmuştur. Çalışma kapsamında Tablo 1'deki veri seti kullanılarak, SPSS 17.0 istatistiksel analiz paket programında bir ÇRA yapılmıştır.



Şekil 2. Uygulama Çalışmasında Model Oluşturma Aşamasında Kullanılan TS EN Deney Standartları.

Tablo 1. Traverten Örneklerinin Fiziksel, Mekanik Özellikleri ve Donma-Çözme Deneyi Sonrası Basınç Değişimi Sonuçları (Çobanoğlu vd., 2010)

No	Traverten türü	Gerçek yoğunluk (gr/cm ³)	Schmidt çekici geri tepme sayısı	Kuru birim hacim ağırlığı (gr/cm ³)	Görünür porozite (%)	Kılcal etkiye bağlı su emme katsayısı (g/m ² .s ^{0.5})	Yoğun yük altında bükülme dayanımı (MPa)	Sabit moment altında eğilme dayanımı (MPa)	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	Don sonrası basınç direnci (MPa)	Dayanım azalması (%)
1	Klasik	2,637	34	2,30	4,32	11,13	9,6	15,64	41	37,21	9,24
2	Noçe ve krem renkli	2,647	41	2,43	1,47	5,11	10,04	14,23	75,18	62,38	17,03
3	Beyaz ve medium	2,659	40	2,29	4,63	4,91	12,57	13,75	48,77	44,17	9,43
4	Light, medium ve noçe	2,660	39	2,4	2,15	2,22	12,87	13,22	51,7	48,19	6,79
5	Light ve medium	2,603	40	2,41	2,58	1,94	13,95	14,42	68,07	63,28	7,04
6	Light, medium ve noçe	2,694	36	2,35	5,15	6,9	10,64	8,71	82,33	40,14	51,24
7	Klasik	2,645	52	2,39	3,56	2,22	11,57	11,99	62,54	51,29	17,99
8	Noçe klasik	2,670	52	2,43	3,44	3,35	12,73	13,42	90,55	74,85	17,34
9	Noçe	2,632	38	2,29	3,04	2,93	14,17	14,28	39,05	37,77	3,28
10	Noçe ve sarı	2,678	32	2,31	8,71	10,03	14,11	13,66	48,19	32,45	32,66
11	Klasik, medium ve noçe	2,696	40	2,49	1,82	2,88	14,54	14,22	72,11	62,22	13,72
12	Sarı	2,643	37	2,18	8,89	6,18	14,08	13,62	49,93	48,13	3,61

2.3. Çoklu Regresyon Analizi

Regresyon analizi, istatistiksel modellemede bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkileri belirlemeye, öngörmeye, yani tahmin etmeye yönelik bir dizi istatistiksel süreçtir. Burada bağımlı (açıklanan) değişken kavramını bir etki olarak tanımlamak yerinde olacaktır. Yani değeri bağımsız (açıklayıcı) değişkenlerdeki değişimlere bağlıdır. Bağımsız değişken ise bir sebeptir. Yani değeri çalışmadaki diğer değişkenlerden bağımsızdır. Söz konusu analiz yöntemi iki farklı amaç için kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, bağımlı değişkenin tahmini ve öngörüsü için kullanılmasıdır ki bu makine öğrenmesi tekniği ile örtüşmektedir. İkincisinde ise, bazı durumlarda bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri ortaya çıkarmak için de regresyon analizi kullanılabilir (Özdamar, 2018).

Basit doğrusal regresyon yalnızca iki değişken olduğunda yani tek bir bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasındaki ilişkileri özetlememize, incelememize ve bu bağımsız değişken yardımıyla bağımlı değişkeni tahmin etmeye olanak tanıyan istatistiksel bir yöntemdir. Eşitlik 1'de X ile gösterilen bir değişken, yordayıcı, açıklayıcı veya bağımsız değişken olarak kabul edilmektedir ve modelde sadece bir bağımsız değişken bulunmaktadır. Y ile gösterilen diğer değişken ise yanıt, sonuç veya bağımlı değişken olarak kabul edilmektedir (Özdamar, 2018).

Çoklu regresyon analizi (ÇRA) de basit regresyona benzeyen bir istatistiksel süreçtir. Ancak bir çoklu regresyon denklemi yapısında birden fazla bağımsız değişkeni olduğu için basit regresyondan farklı, daha geniş bir regresyon sınıfıdır. ÇRA'nın amacı, tek bağımlı değişkenin değerini tahmin etmek için, değerleri bilinen bağımsız değişkenleri kullanmaktır. Çoklu regresyonlar doğrusal ve doğrusal olmayan olabilir. Ayrıca bağımsız değişkenler arasında önemli bir korelasyon olmadığı varsayılmaktadır. ÇRA birden fazla açıklayıcı değişkenin ilgilenilen bazı sonuçlar üzerindeki etkisini dikkate almaktadır. Modeldeki diğer tüm değişkenleri sabit tutarken, bu bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki göreceli etkisini değerlendirmektedir. Çoklu regresyondaki her bağımsız değişkenin, her değişkenin uygun şekilde ağırlıklandırılmasını sağlamak için kendi katsayısı bulunmaktadır. Bir çoklu regresyon denkleminin teorik olarak ana yapısı Eşitlik (1)'deki gibi özetlenebilir.

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + e \quad (1)$$

Burada Y bağımlı değişkeni; X_1, \dots, X_n bağımsız değişkenleri; b_1, \dots, b_n ise bağımsız değişken katsayılarını temsil etmektedir. a ise regresyon eğrisinin y eksenini kesim noktasıdır yani sabit terimdir. e ise Y 'nin tahmin edilen değeriyle gözlenen değeri arasındaki farkı temsil etmektedir. Bu çalışmada doğrusal regresyonun yönteminin tercih edilme sebebi makalenin konusu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalarda da tercih ediliyor olması, uygulanabilirliğinin kolay olması, kolaylıkla başarılı sonuç alınabilmesidir.

Geriye doğru eleme tekniği ise çoklu regresyon modeli için değişkenlerin bir alt kümesini seçmenin basit ve etkili bir yoludur ve araştırmacılar için uygulaması kolaydır. Genel olarak kısaca tüm değişkenlerin yer aldığı modelden, fazlalıkların atılarak daha az değişkenden oluşan ve daha verimli, yani tahmin yeteneği daha fazla olan bir model oluşturmaya yönelik geliştirilmiş bir tekniktir. Sürecin ilk aşamasında tüm bağımsız değişkenler modele dâhil edilmekte, sonraki aşamalarda ise her seferinde birisi olmak üzere en düşük kısmi F değeri olan bağımsız değişkenin modelden atılması suretiyle işleme devam edilmektedir. Her değişken atıldıktan sonra bu sürecin modele olan katkısı test edilmektedir. Eğer atılan bağımsız değişkenin modele olan katkısı istatistiksel olarak önemli ise atma işlemi artık durdurulur ve en iyi hesaplanmış düzeltilmiş R^2 değerine sahip model seçilerek ve bu modelin istatistiksel katsayıları kullanılarak bir çoklu regresyon denklemi kurulur (Efe vd., 2000; Kayaalp vd., 2015).

2.4. Uygulama Çalışması

Çobanoğlu, vd., (2010) çalışmasındaki Denizli travertenlerine ait fiziko-mekanik özellikler kullanılarak, ÇRA ile oluşturulan bir DBSK tahmin modeli ile don sonrası basınç kayıpları yüzdesel olarak tahmin edilmiştir. Model kapsamında elde edilen program ekran çıktıları sırasıyla Tablo 2-4'te sunulmuştur. Başlangıçta model oluşturma aşamasında veri setinde yer alan değişkenlerden bağımsız değişkenler olan Gerçek Yoğunluk X_1 , Schmit Çekici Geri Tepme Sayısı X_2 , Kuru Birim Hacim Ağırlığı X_3 , Görünür Porozite X_4 , Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısı X_5 , Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı X_6 , Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı X_7 , Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı X_8 ; bağımlı değişken olan Dayanım Azalması değişkeni ise Y olarak modelde programa tanımlanmıştır.

ÇRA'da R^2 belirlilik (tanımlayıcılık, determinasyon) katsayısı genellikle yeterli olmamaktadır. Bunun yerine, modelin evren uyum iyiliğini daha iyi yansıtan bir değer olan düzeltilmiş R^2 değeri (adjusted R square) katsayısı kullanılması tercih edilmektedir (Akgül & Çevik, 2003). Çünkü ÇRA modelleri için denkleme yeni değişken ilave edilmesi durumunda R^2 değeri genellikle artmaktadır. Bu yüzden anlamlı bir test yapabilmek için çoklu modellerde düzeltilmiş R^2 değerinin hesaplanması önerilmektedir. Uygulama çalışması kapsamında bağımlı değişken olan don sonrası basınç dayanım azalması değişkenini, en iyi şekilde açıklayabilen yani en yüksek düzeltilmiş R^2 değeri hesaplanan bağımsız değişkenlerin yer aldığı model seçilmiştir. Sürecin ilk aşamasında tüm bağımsız değişkenler modele dâhil edilmiş, sonraki aşamalarda ise her seferinde birisi olmak üzere en düşük kısmi F değeri olan bağımsız değişkenin modelden atılması suretiyle işleme devam edilmiştir. Atılan bağımsız değişkenin modele olan katkısı istatistiksel olarak önemli olduğu anda işlemi durdurulmuş ve en iyi hesaplanmış düzeltilmiş R^2 değerine sahip model seçilmiş ve bu modelin istatistiksel katsayıları kullanılarak da bir DBSK tahmin denklemi kurulmuştur.

Tablo 2’de 1. model tüm bağımsız değişkenlerin modele dâhil olduğu süreçte ($X_{1,2,...,8}$) söz konusu değişkenler ile dayanım azalması (Y) bağımlı değişkeni üzerindeki etkiyi, 2. model $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_7$ ve X_8 bağımsız değişkenlerinin Y bağımlı değişkeni üzerindeki etkiyi; 3. Model X_1, X_2, X_3, X_5, X_7 ve X_8 bağımsız değişkenlerinin Y bağımlı değişkeni üzerindeki etkiyi; 4. Model ise X_1, X_3, X_5, X_7 ve X_8 bağımsız değişkenlerinin Y bağımlı değişkeni üzerindeki etkiyi göstermektedir. İlk model varyansın %95,3’ünü açıklarken sırasıyla, 2. Model %96,2’sini, 3. Model %96,7’sini, 4. Model ise %97,1’ini açıklamaktadır. Bunun için matematiksel ölçütlere göre girilen, bir adım adım ekleme tekniği olan geriye doğru eleme tekniği (Backward Elimination Technique) kullanılmış ve tahmin oranı en yüksek olan model 4. model bağımlı değişkeni en iyi açıklayan DSBK tahmin modelini olarak seçilmiştir (Tablo 2). 4. model için hesaplanan düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,971 için bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğu yorumu yapılabilmektedir.

Ayrıca Tablo 2’de uygulama çalışmasında kurulan DSBK tahmin modeli için hesaplanan Durbin-Watson (DW) değeri ise otokorelasyonu test etmektedir. Buna göre e = hata terimi ya da artık, t = zaman olmak üzere Durbin Watson test istatistiği aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır (Eşitlik 2).

$$d = \frac{\sum_{t=2}^T (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_t e_t^2} \quad (2)$$

Burada d değeri genellikle 0-4 arasında değerler almaktadır. Eğer hesaplanan DW değeri 1.5 ile 2,5 değerleri arasındaysa, bu durum modelde otokorelasyon olmadığını ifade etmektedir. Hesaplanan bu değer genellikle 2’ye yakın olması tercih edilir. Hesaplanan bu değer eğer 0’a yakın ise pozitif korelasyonu yani b katsayılarının standart hatalarının çok küçük olduğunu, 4’e yakın değerleri ise negatif korelasyonu yani b katsayılarının standart hatalarının çok büyük olduğunu ifade etmektedir (Ağca & Böyükaslan, 2016). Model için hesaplanan bu değer 1,82 olup, bu durum kurulan DSBK tahmin modelinde bir otokorelasyon olmadığı anlamına gelmektedir.

Tablo 2. Geriye Doğru Eleme Tekniği Kullanılarak Bağımlı Değişkeni En İyi Açıklayan DSBK Tahmin Modelinin Seçimi

Model No	Düzeltilmiş R^2	F’deki değişim	Serbestlik derecesi 1	Serbestlik derecesi 2	Durbin-Watson
1	0,953 ^a	31,523	8	3	
2	0,962 ^b	0,088	1	3	
3	0,967 ^c	0,093	1	5	
4	0,971 ^d	0,214	1	6	1,820

a. Kullanılan bağımsız değişkenler: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$

b. Kullanılan bağımsız değişkenler: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_7, X_8$

c. Kullanılan bağımsız değişkenler: $X_1, X_2, X_3, X_5, X_7, X_8$

d. Kullanılan bağımsız değişkenler: X_1, X_3, X_5, X_7, X_8

Kurulan bu çoklu regresyon modelinin anlamlı olup olmadığını tespit edebilmek için değerlendirilen Varyans Analizi ANOVA testi sonuçları ise Tablo 3’te sunulmuştur. Tablo 3’te sunulan DSBK tahmin modelinin ANOVA testi sonuçlarına göre model için hesaplanan F değeri istatistiksel açıdan anlamlıdır. Yani modelin en iyi tahmin olarak ortalamaları kullanmaktan daha iyi olduğu söylenilebilir. ANOVA tablosu modelin bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını test etmektedir. Hesaplanan anlamlılık değeri olan P değeri <0,05 olduğu için buradan DSBK tahmini için kurulan ÇRA modelinin %99 güvenilirlik seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu yorumu yapılabilir.

Tablo 3. DSBK Tahmin Modelinin ANOVA Testi Sonuçları

Model	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	F değeri	Ortalama kare	P (anlamlılık)
Regresyon	5002,894	5	81,772	1000,579	0,000
Artık	85,653	7		12,236	
Toplam	5088,547	12			

Mevcut modelin değişkenlerinin modele olan katkılarını belirlemek ÇRA’dan elde edilen katsayı tablosu ise Tablo 4’te sunulmuştur. DSBK tahmin modeli için elde edilen sonuçlara göre bağımlı değişkenler ile bağımsız değişken arasındaki çoklu regresyon katsayısı olan (R) değeri 0,992 olarak, R^2 belirlilik (tanımlayıcılık, determinasyon) katsayısı 0,983 olarak, düzeltilmiş R^2 değeri (adjusted R square) ise 0,971 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. DSBK Tahmin Modelinin İstatiksel ÇRA Sonuçları

Modeldeki Değişkenler	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	T	P
	Beta	Standart hata	Beta		
Gerçek Yoğunluk(X_1)	-53,726	17,733	-6,928	-3,030	0,019
Kuru Birim Hacim Ağırlığı(X_3)	91,835	17,899	10,513	5,131	0,001
Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısı(X_5)	3,688	0,528	1,037	6,979	0,000
Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı(X_7)	1,814	0,787	1,117	2,305	0,055
Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı(X_8)	7,378	0,653	-4,848	-11,293	0,000
	R=0,992	R ² =0,983	Düzeltilmiş R ² =0,971		

Tablo 4'teki DSBK tahmin modelinin istatiksel ÇRA sonuçları değerlendirilerek, aşağıdaki nihai çoklu regresyon denklemi elde edilmiştir (Eşitlik 3). Eşitlik 3'teki ÇRA denklemi oluşturulurken Tablo'4 teki Beta sütununda modeldeki her bir bağımsız değişken için hesaplanan Beta katsayısı (değişken katsayısı) değerleri kullanılmıştır. Burada Beta katsayısı değeri bağımsız değişkende meydana gelen bir birimlik değişiminin çoklu regresyon denkleminde yarattığı değişimi ifade etmektedir (Özdamar, 2018).

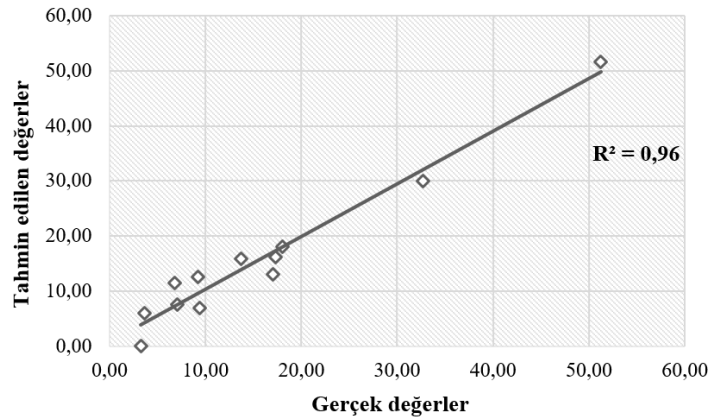
$$Y (\%) = -53,726X_1 + 91,835X_3 + 3,688X_5 + 1,814X_7 - 7,378X_8 \quad (3)$$

Elde edilen bu ÇRA denklemine göre, Kuru Birim Hacim Ağırlığı, Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısı ve Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı bağımsız değişkenleri ile Dayanım Azalması bağımlı değişkeni arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu ve diğer bağımsız değişkenler sabit tutularak bu değişkenlerdeki artışın bağımlı değişken üzerinde bir artışa sebep olacağı yorumu yapılabilir. Diğer taraftan ise, Gerçek Yoğunluk bağımsız değişkeni ve Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı bağımsız değişkeni ile Dayanım Azalması bağımlı değişkeni arasında bir ters orantı olduğu söylenilebilir. Gerçek Yoğunluk ve Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı değişkenlerindeki artış, diğer bağımsız değişkenler sabit tutulduğunda Dayanım Azalması bağımlı değişkeni üzerinde bir azalmaya sebebiyet verecektir.

DSBK tahmin modeli denklemi için Tablo 4'te 0,992 olarak hesaplanan çoklu regresyon katsayısı (R) değerine göre, modelindeki tüm bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasında ilişkinin yüksek olduğu yorumu yapılabilir. DSBK tahmin modelinin ÇRA sonuçlarına göre hesaplanan R² belirlilik (güvenirlilik, tanımlayıcılık, determinasyon) katsayısı 0,983 olarak hesaplanmış olup, bu değere göre yorum yapılacak olunursa, bağımlı değişkendeki değişimlerin %98,3'ü bağımsız değişkenler tarafından açıklanabilmekte olduğu söylenilebilir. Yine DSBK tahmin modeli için düzeltilmiş R² değeri ise 0,971 olarak hesaplanmıştır. Buradan da çalışmada seçilen ÇRA modeli için bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğu yorumu yapılabilir. Dolayısıyla elde edilen bu denklem, araştırmacılar tarafından son derece güvenilir bir tahmin metodu olarak kullanılabilir.

Yine Tablo 4'te hesaplanan standardize katsayılar (Beta) bağımsız değişkenlerin önem sırasını göstermektedir. Burada işarete bakmadan en yüksek Beta değerine sahip olan değişken en önemli bağımsız değişkendir. Yani uygulama çalışmasında kurulan bu denklem için oluşturulan DSBK tahmin modeli için en önemli değişkenin Kuru Birim Hacim Ağırlığı olduğu, ardından Gerçek Yoğunluk ve Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı, değişkenleri olduğu yorumu yapılabilir.

Denklem ayrıca gerçek (gözlenen) ve tahmin edilen değerler için sınanmış ve denklemin R² değeri 0,96 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Çıkan bu sonuçta, geliştirilen denklemin tek eksenli basınç dayanımındaki değişimleri yüzdesel olarak güvenilir bir şekilde tahmin etmekte kullanılabileceğini bir kez daha göstermiştir.

**Şekil 3.** DSBK Modeli İçin Gerçek Değerler ile Tahmin Edilen Basınç Kaybı Değerleri Arasındaki İlişki.

Yapılan bu çalışma kapsamında kurulan DSBK tahmin modelinin doğruluğu literatürde yer alan çeşitli çalışmalarla kıyaslanmıştır (Tablo 5). Tablo 5 incelendiğinde yapılan çalışmada model oluşturma aşamasında kullanılan traverten numunesi sayısının diğer çalışmalarla kıyaslandığında yeterli düzeyde olduğu, DSBK tahmin modelinin doğruluğu için hesaplanan R^2 belirlilik katsayısının diğer çalışmalardan daha yüksek olduğu söylenilebilir.

Tablo 5. DSBK Tahmin Modelinin Doğruluğunun Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması.

Yazar(lar) ve Yayın Yılı	Numune Sayısı	Kaya Türü	Modelin R^2 Belirlilik Katsayısı	Kullanılan Bağımsız Değişkenler
Yavuz vd. (2006)	12	Kireçtaşı, Mermer, Traverten	0,93	Tek Eksenli Basma Dayanımı Porozite
Bayram (2012)	9	Kireçtaşı	0,91	Darbe Dayanımı Elastisite Modülü Su Emme Testi
İnce ve Fener (2016)	10	Piroklastik kaya	0,84	Ultrasonik Hız Nokta Yük Dayanımı Kuru Yoğunluk Suda Dağılmaya Karşı Duraylılık
Huang vd. (2022)	6	Kumtaşı	0,82	Porozite Elastisite Modülü Çekme Dayanımı
Bu çalışma	12	Traverten	0,98	Gerçek Yoğunluk Kuru Birim Hacim Ağırlığı Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısı Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı

3. Sonuçlar

Doğal taş yapı malzemesi olarak inşaat ve dekorasyonda kullanılan travertenlerin, donma-çözülme döngülerinden sonra tek eksenli basınç dayanımlarındaki kaybın belirlenebilmesinin tek yöntemi zahmetli ve zaman alıcı donma-çözülme testi yapılmasıdır. Bu çalışmada travertenlerin, zorlu iklim koşullarında kullanılabilirliğinin kolaylıkla kestirimi için donma-çözülme testinin yapılmadan kayacın gerçek yoğunluk, kuru birim hacim ağırlık, kılcal etkiye bağlı su emme, yoğun yük altında bükülme ve sabit moment altında eğilme fiziko-mekanik özelliklerini kullanarak, donma-çözülme döngüleri sonrasındaki tek eksenli basınç dayanımındaki yüzde kayıp oranı kurulan bir model ile tahmin edilmiştir.

Çalışmada, tek eksenli basınç dayanımındaki azalmayı yüzdesel olarak tahmin edebilmek için bir çoklu regresyon analizi tekniği olan geriye doğru eleme tekniği kullanılarak, çeşitli istatistiksel analizler yapılmış ve araştırmacılar için faydalı olabilecek, doğru tahmin edebilme oranı yüksek bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model kapsamında kurulan denklemin güvenilirlik değeri (R^2) 0,98 olarak; düzeltilmiş R^2 değeri ise 0,97 olarak hesaplanmış olup bu değerler oldukça yüksektir. Kurulan denklem ayrıca gerçek değerlerle sınanmış ve denklemin gerçek değerlerle olan R^2 değeri ise 0,96 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler göstermektedir ki, kurulan denklemin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler yüksek oranda örtüşmektedir.

Geliştirilen bu model, çalışmanın gerçekleştirildiği Denizli bölgesindeki travertenler için geçerli olup, kurulan modelin veri tabanı daha zenginleştirilerek tüm travertenler için yapılabileceği gibi, yapılan bu çalışma araştırmacılar tarafından farklı jeolojik kökene ait doğal taşlar için de benzer çalışmalara bir temel kaynak olacaktır.

Referanslar

Ağca, V., & Böyükaslan, H.D. (2016). Aile işletmelerinde iç girişimciliğin sosyal girişimciliğe etkisi: Afyonkarahisar’da bir araştırma. Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 13(3), 200-220.

Akgül, A., & Çevik, O. (2003). İstatistiksel Analiz Teknikleri “SPSS’te İşletme Yönetimi Uygulamaları”, Emek Ofset, Ankara

Amirkiyaei, V., Ghasemi, E., & Faramarzi, L. (2021). Estimating uniaxial compressive strength of carbonate building stones based on some intact stone properties after deterioration by freeze–thaw. Environmental Earth Sciences, 80(9), 352. doi: 10.1007/s12665-021-09658-8

Bayram, F. (2012). Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze–thaw in cold regions. Cold Regions Science and Technology, 83, 98-102. doi: 10.1016/j.coldregions.2012.07.003

- Çelik S.B., & Çobanoğlu İ. (2019). Denizli travertenlerinde P ve S dalga hızları ile bazı fiziksel ve tek eksenli sıkışma dayanımı özellikleri arasındaki ilişkilerin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 22(2), 341-349. doi:10.2339/politeknik.444370
- Çobanoğlu, İ., Atatanır L., Çelik, S.B., & Kaya, M. (2010). Denizli travertenlerinin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi ve traverten bilgi sisteminin oluşturulması, Tübitak Proje Sonuç Raporu, Proje No: 107Y213, Ankara.
- Efe, E., Bek, Y., & Şahin, M. (2000) SPSS'de çözümleri ile istatistik yöntemler II, Kahramanmaraş Sütçüimam Üniversitesi Rektörlüğü Yayın No:10, Kahramanmaraş.
- Ercan, T., Dinçel, A., Günay, E., & Türkecan, A. (1977). Uşak yöresinin jeolojisi ve volkanitlerinin petrolojisi. MTA Derleme, No: 6354, Ankara.
- Erguvanlı, K. (1995). Mühendislik Jeolojisi. Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Fener, M., & İnce, İ. (2015). Effects of the freeze–thaw (F–T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building, *Journal of African Earth Sciences*, 109, 96–106. doi:10.1016/j.jafrearsci.2015.05.006
- Guo, L., & Riding, R. (1998). Hot-spring travertine facies and sequences, Late Pleistocene Rapolano Terme, central Italy: *Sedimentology*, 41, 499-520. doi:10.1046/j.1365-3091.1998.00141.x
- Huang, S., He, Y., Yu, S., & Cai, C. (2022). Experimental investigation and prediction model for UCS loss of unsaturated sandstones under freeze-thaw action. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(1), 41-49.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., & Khamehchiyan, M. (2017). A novel physico-mechanical parameter for estimating the mechanical strength of travertines after a freeze–thaw test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 181-190. doi:10.1016/j.jafrearsci.2015.05.006
- Kahraman, E., & Eser, A. (2016). Elazığ bölgesi travertenlerinin kaplama taşı olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 243-254. doi: 10.21605/cukurovaummfd.242764
- Kayaalp, G.T., Güney, M.Ç., & Cebeci, Z. (2015). Çoklu doğrusal regresyon modelinde değişken seçiminin zootekniye uygulaması. *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 30(1), 1-8.
- Kaymakçı, N. (2006). Kinematic development and paleostress analysis of the Denizli Basin (Western Turkey): Implications of spatial variation of relative paleostress magnitudes and orientations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2), 207-222. doi:10.1016/j.jseaes.2005.03.003
- Koçyiğit, A. (2005). Denizli-graben horst system: basin fill, structure, deformational mode, throw amount and episodic evolutionary history, SW Turkey, *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 167-208. doi: 10.3166/ga.18.167-208
- Liu, Q., Huang, S., Kang, Y., & Liu, X. (2015). A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw. *Cold Regions Science and Technology*, 120:96–107. doi: 10.1016/j.coldregions.2015.09.013
- Momeni, A., Abdilor, Y., Khanlari, G.R., Heidari, M., & Sepahi, A.A. (2016). The effect of freezethaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 275(4):1649–56. doi: 10.1007/s10064-015-0787-9
- Okay, A.İ. (1989). Denizli'nin güneyinde Menderes Masifi ve Likya Naplarının jeolojisi, *MTA Dergisi*, 109, 45-58.
- Özpinar, Y., Heybeli, H., Semiz, B., Baran, H.A. & Koçan B. (2001). Kocabaş (Denizli) travertenleri ve Kömürcüoğlu (Kocabaş) travertenlerinin jeolojik, petrografik özellikleri ve oluşumunun incelenmesi, teknik açıdan değerlendirilmesi. *Türkiye 3. Mermer Sempozyumu bildiriler kitabı*, 133-148.
- Özdamar, K. (2018). SPSS uygulamalı temel istatistik, Nisan Kitabevi, 230.
- Pedley, H.M. (2009). Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology*, 56, 221–246. doi: 10.1111/j.1365-3091.2008.01012.x
- Pentecost, A. (2005). *Travertine*. Springer, Berlin, 445.
- Polat, S. (2013). Türkiye'de traverten oluşumu, yayılış alanı ve korunması. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 23:389-428.
- Sun, S. (1990). Denizli-Uşak arasının jeolojisi ve linyit olanakları, MTA Rap. No: 9985, 92 s. (yayınlanmamış).
- Şimşek, Ş. (1982). Denizli, Sarayköy-Buldan alanının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları, İstanbul Üniversitesi Yer Bilimleri Fakültesi Yayın Organı, 3(1-2), 145-162.

- Tan, X., Chen, W., Tian, H., & Cao, J. (2011). Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 68, 130–138. doi:10.1016/j.coldregions.2011.05.007
- Taner, G. (1975). Denizli bölgesi Neojen’inin paleontolojik ve stratigrafik etüdü III: MTA Bull., 85, 45-66.
- Taner, G. (2001). Denizli Bölgesi Neojen’ine ait katların stratigrafik konumlarında yeni düzenleme, 54. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildirileri, No:54-79, Ankara
- Tagliassachi, T.E. (2018). Orta-Geç pleyistosen yaşlı Gürlek-Kocabaş (Denizli) ve Örtülü (Afyon) travertenlerinin sedimentolojik özellikleri ve paleoortamsal gelişimine ait ilk bulgular (GB-Türkiye), *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 61, 1-22. doi:10.25288/tjb.358160
- Topal, S. (2003). Denizli neojen istifinin stratigrafisi ve tektonik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- TS 699, Tabii Yapı Taşları – Muayene ve Deneysel Metotları, TSE Yayını, (1987), 81. s.
- TS EN 1925. Doğal Taşlar – Deneysel Metotları – Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısının Tayini. TSE Yayını. Ankara. (2000). 7 s.
- TS EN 1926. Doğal Taşlar – Deneysel Metotları – Basınç Dayanımı Tayini. TSE Yayını. Ankara. (2007). 17 s.
- TS EN 1936. Doğal Taşlar – Deneysel Metotları – Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini. TSE Yayını. Ankara. (2007). 11 s.
- TS EN 12371. Doğal Taşlar-Deneysel Metotları-Dona Dayanım Tayini. TSE Yayını. Ankara. (2003). 7 s.
- TS EN 12372. Doğal Taşlar – Deneysel Metotları – Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini. TSE Yayını. Ankara. (2001). 8 s.
- TS EN 13161. Doğal Taşlar – Deneysel Metotları –Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı Tayini. TSE Yayını. Ankara. (2003). 8 s.
- Westaway, R., Guillou, H., Yurtmen, S., Demir, T., Scaillet, S., & Rowbotham, G. (2005). Constraints on the timing and regional conditions at the start of the present phase of crustal extension in western Turkey, from observations in and around the Denizli region. *Geodinamica Acta* 18, 209–238. doi: 10.3166/ga.18.209-238
- Yavuz, H., Altındag, R., Sarac, S., Ugur, I., & Sengun, N. (2006). Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze–thaw and thermal shock weathering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43, 767–775. doi:10.1016/j.ijrmms.2005.12.004