

Yapı Taşı Olarak Kullanılan Tüflerin Eğilme Dayanımlarının Kaya-Agrega Özellikleri ile Modellenmesi

Ahmet TEYMEN*¹

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü,
Niğde

Geliş tarihi: 18.02.2019 Kabul tarihi: 27.03.2019

Öz

Merdiven basamaklarında, iç ve dış zemin döşemelerinde kullanılan doğal taşlar araç ve yaya yüklerine maruz kalmaktadır. Yapı taşları genellikle farklı ölçülerde ebatlandırılmış plakalar şeklinde üretildiğinden bu malzemelerin eğilme dayanımı son derece önemli bir parametredir. Plakaların boyutu ve kalınlığı, destek noktaları arasındaki mesafe, kayacın eğilme dayanımına göre tespit edilebilmektedir. Bu çalışmanın başlıca amacı, yapı taşı olarak kullanılan tüflerin eğilme dayanımı ile uygulaması kolay ve düşük maliyetli mühendislik özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmaktır. Bu çalışmada, 27 adet tüfün eğilme dayanımı (FTS), darbe dayanımı (DN), kayaç darbe sertlik numarası (RIHN), kaya dayanım katsayısı (CRS), darbe dayanım indeksi (ISI), yassılık indeksi (FI), İsveç kırılma indeksi (S_{20}) ve porozite (P) değerleri belirlenmiştir. Tüflerin FTS değerinin tahmini için basit ve çoklu doğrusal regresyon analizleri (SPSS) gerçekleştirilmiş ve denklemlerin doğrulanması için F ve t-testleri kullanılarak denklemler doğrulanmıştır. Sonuçlar, kayaçların FTS ve mühendislik özellikleri arasında yeterli ve iyi ilişkiler olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çoklu modeller, basit modellerden daha iyi tahmin verimliliğine sahiptir ve tüflerin FTS değerini yeterli güvenilirlikle tahmin etmek için uygulanabilirler. Türetilen eşitlikler incelendiğinde, FTS'nin tahmini için kullanılan parametreler arasında S_{20} , ISI, CRS, FI ve P gibi testler oldukça etkilidir.

Anahtar Kelimeler: Eğilme dayanımı, Tüf çoklu regresyon, Fiziksel ve mekanik özellikler

Modeling of Flexural Tensile Strength of Tuffs Used as Building Stone by Rock-Aggregate Properties

Abstract

Natural stones used in stair treads, interior and exterior floors are exposed vehicle and pedestrian loads. Since the building stones are generally produced in the form of plates of different sizes, the flexural tensile strength of these materials is an extremely important parameter. The size and thickness of plates, the distance between the support points can be determined according to the flexural tensile strength of the rock. The main aim of this study is to investigate the relationships between flexural tensile strength of tuffs used building stones and engineering properties which are easy to implement and low cost. In this study, flexural tensile strength (FTS), impact strength (DN), rock impact hardness number (RIHN), coefficient of rock strength (CRS), impact strength index (ISI), flakiness index (FI), Swedish brittleness index (S_{20}), and porosity (P) of 27 tuffs were determined. Simple and multiple linear regression analyses (SPSS) were

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet TEYMEN, ateymen@ohu.edu.tr

performed for estimating FTS of tuffs and F and t-test were used to verify the equations. The results show that there were good and satisfactory relationships between FTS and engineering properties of tuffs. Furthermore, the multiple models have a better predictive efficiency than simple models and they can be applied for predicting FTS of tuffs with reasonable confidence. When the derived equations are examined, tests such as S_{20} , ISI, CRS, FI and P are very effective among the parameters used in predicting the FTS.

Keywords: Flexural tensile strength, Tuff multiple regression, Physical and mechanical properties

1. GİRİŞ

Eğilme dayanımı deneyi herhangi bir malzemenin (metal, plastik, seramik, beton ve doğal taşlar) mukavemeti hakkında tasarıma dair bilgileri belirlemek ve söz konusu malzemenin eğilmeye karşı özelliklerini tespit etmek amacı ile gerçekleştirilen bir deneydir. Giriş gibi enine yük taşıyan yapı elemanları eğilmeye maruz kalırlar ve bu girişin her bir bölgesinde eğilme momentleri ortaya çıkar. Bu da eğilme gerilmesinin bir sonucudur. Bu durum madencilikte kuyu, galeri ve tünellerde tahkimat amaçlı ve birçok yapıda (baraj, köprü, yol, bina vb.) kullanılan betonun eğilme dayanımının bilinmesinin ne derece önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Sağlam kayaçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, yeraltı yapıları, temeller, şev ve baraj projeleri gibi mühendislik uygulamalarında kayaçların sınıflandırılması için oldukça önemlidir. Kaya mühendisliği için en yaygın kullanılan parametreler, tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve elastisite modülüdür (E). Eğilme dayanımı (FTS) da bu iki parametre gibi beton ve kaya gibi malzemelerin önemli mekanik özelliklerinden bir tanesidir.

Eğilme dayanımı, plaka şeklinde üretilmiş standart boyutlardaki mermerlerin belirli doğrultuda kırılmaya karşı gösterdiği dayanımdır. Mermerlerin kullanım yerlerine göre belirli boyut ve kalınlıkta olması istenildiği için kayaçların kırılmaya karşı gösterdiği eğilme dayanımının son derece önemli bir parametre olduğu ortaya çıkmaktadır.

Hassas numune hazırlama ihtiyacı, pahalı bir test cihazına duyulan ihtiyaç ve zaman alıcı bir deney olması, FTS deneyinin dezavantajlı taraflarıdır. Uygulanması oldukça pratik olan ve nispeten daha

az gelişmiş ekipmanlara ihtiyaç duyulan bazı indeks ve fiziksel özellikler kullanarak FTS'yi tahmin etmek araştırmacılar için oldukça pratik bir kullanım sağlayacaktır.

Şengün ve Altındağ [1], "Kayaçların kırılma tokluğu (Mod-I) ile fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerinin değerlendirilmesi" adlı çalışmalarında onbeş farklı kayacın kırılma tokluk değerlerini ve bazı fiziksel- mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Kayaçların kırılma toklukları ile FTS arasında ($r = 0,71$) değerinde bir korelasyon katsayısı tespit etmişlerdir.

Akbay ve arkadaşları [2] yaptıkları çalışma kapsamında, farklı dokusal ve yapısal özelliklere sahip sedimanter, metamorfik ve magmatik kökenli doğal taşlara, üç farklı durum için; yoğun yük altında eğilme dayanımı ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar ışığında farklı koşullar için değişim oranlarını incelemişlerdir. Don sonrası eğilme dayanım değerlerindeki değişimin, don sonrası basınç dayanımındaki değişime göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Literatürde kayaçların eğilme dayanımının tespit edildiği bir takım çalışmalar olmakla birlikte bu parametrenin pratik test yöntemleri ile tahmin edilmesine yönelik çalışma neredeyse yoktur. Bu çalışmanın amacı tüflerin FTS'sinin kayaç/agrega özellikleri yardımı ile pratik ve anlamlı şekilde tahmin edilmesine yönelik eşitlikler ortaya koymaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada ağırlıklı olarak Kayseri ve Nevşehir'de bulunan doğaltaş atölye ve fabrikalarından getirilen toplam 27 tuf numunesi kullanılmıştır. Şekil 1'de

çalışmada kullanılan tüfler görülmektedir. Kayaçların fiziksel ve mekanik test sonuçlarının minimum ve maksimum değerleri Çizelge 1’de özetlenirken, bu verilere ait histogram grafikleri Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan tüfler

2.1. Eğilme Dayanımı (FTS)

Eğilme deneyi tüflerin eğilme yüklerine karşı direncini tespit etmek amacı ile yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında 4 nokta yöntemi (sabit moment altında eğilme) tercih edilmiş ve hesaplamalar TS EN 13161 [3] standardı kapsamında Eşitlik 1’e göre yapılmıştır.

$$FTS = (P \times L_m) / (b \times h^2) \quad (1)$$

Burada, FTS eğilme dayanımı (MPa), P kırılma yükü (N), L_m mesnetler arası mesafe (mm), b genişlik (mm) ve h, kalınlıktır (mm). Kullanılan numune ebatları 20 cm x 8 cm x 3 cm’dir. Hazırlanan üç adet plakanın her biri, Şekil 3’te şematik olarak gösterilen ve nokta yük dayanım aletine adapte edilen aparatın mesnetleri arasına yerleştirilmiştir (Şekil 2).

2.2. Darbe Dayanımı (DN)

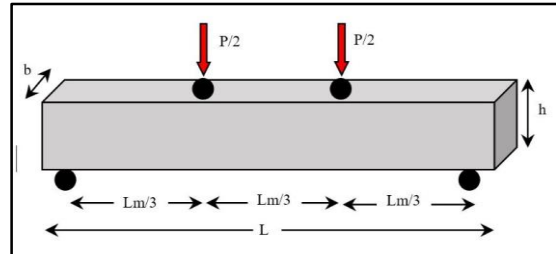
Darbe dayanımı; standart boyuttaki kayaçların belirli bir doğrultudan uygulanan darbelere karşı gösterdiği dirençtir. Kayaçların kullanım alanları belirlenirken darbe dayanımının bilinmesi

önemlidir. Tüflerin darbe dayanımlarının belirlenmesi için, TS 699 [4]’da belirtilen şekilde şistozite düzlemine paralel konumda alınan 4x4x4 cm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler deney düzeneğindeki örsün üzerindeki örnek yuvasına yerleştirilmiştir. Yerleştirilen örneğin üzerine çelik plaka konularak deney tokmağı hesaplanan yükseklikten düşürülmüştür.

Birinci darbeden sonraki takip eden her darbede düşme yüksekliği, bir evvelki yüksekliğin, ilk düşme yüksekliği (H) kadar artırılmasıyla elde edilmiştir. Yukarıda açıklanan işlem deney numunesi kırılıncaya kadar devam ettirilmiş ve nihai olarak kırılmaya sebep olan darbe sayısı tespit edilmiştir. Düşme yüksekliğinin artırılmasına rağmen geri sıçrama miktarı artmamış ve ya azalmışsa; kırılma, çatlama veya pullanma olmuş ise deney numunesi kırılmış sayılmıştır.



Şekil 2. Eğilme deney aparatı



Şekil 3. Eğilme deney düzeneği şematik gösterimi

2.3. Kayaç Dayanım Katsayısı (CRS)

CRS değeri darbeli matkapların ilerleme oranını hesaplamak için çalışma havası basıncı ile birlikte kullanılabilir. CRS, Protodyakonov testinin bir başka bir versiyonudur ve enerji/birim hacim açısından parçalanmaya karşı direnci ölçer. Test, -25,4 mm+19,1 mm elek aralığından seçilen iki agrega parçasına 63,5 cm'lik bir yükseklikten 2,4 kg'lık bir ağırlık düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, aynı kayaç için farklı darbe sayıları kullanılarak beş kez tekrarlanmıştır. Ezilmiş agrega parçaları, 500 mikron elekten elenmiş ve beş deneyden hesaplanan en küçük değer o kayacın CRS değeri olarak kabul edilmiştir.

2.4. Kayaç Darbe Sertlik Numarası (RIHN)

Protodyakonov darbe testinin başka bir versiyonu olan bu deney istenilen oranda ince tane üretmek için gerekli enerji miktarı açısından parçalanma direncini ölçer. SSH, çalışma hava basıncı ve RIHN değerleri darbeli delik delme makinelerinin delme hızlarını hesaplamak için kullanılabilir.

Deney için 25,4 cm³ hacme sahip karot numuneler hazırlanmıştır. Karot numunelerinin üzerine 63,5 cm'lik bir yükseklikten 2,4 kg'lık bir ağırlık düşürülmüştür. RIHN değeri, 0,5 mm'lik elekten geçen ve orijinal kütlelerin %25'ine neden olan darbe sayısıdır.

2.5. Darbe Dayanım İndeksi (ISI)

Deney için etüv kurusu durumda 100 g (-9,525+3,175 mm) numune kullanılmıştır. Deney, 42,86 mm çapa sahip test aparatının içine yerleştirilen agrega üzerine 1,8 kg'lık ağırlığın 30,48 cm yükseklikten 20 defa düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ezilmiş durumdaki agrega 3,175 mm elekten elenmiş ve elek üstü tartımı ISI değeri olarak kabul edilmiştir.

2.6. Yassılık İndeksi (FI)

Tüfler çeneli kırıcı yardımı ile agrega haline getirilmiş ve kırıcı çıkışı malzeme kare gözlü elek setinden elenmiştir. Malzemenin -20 mm+8 mm elek aralığındaki kısmına yassılık indeksi deneyi

uygulanmıştır. TS EN 933-3 [5] standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyde sırasıyla 10 mm, 8 mm, 6,3 mm ve 5 mm açıklıklı silindirik çubuklu elekler kullanılmıştır. Çubuklu eleklerden geçen tanelerin toplam kütlelerinin (g) her tane büyüklüğü fraksiyonundaki tanelerin toplam külesine oranı % cinsinden FI değeri olarak belirlenmiştir.

2.7. Shore Schleroscope Sertliği (SSH)

Deney gerçekleştirilirken ISRM 1981 [6]'de belirtilen esaslar dikkate alınmıştır. SSH, herhangi bir kayacın yüzey sertliğini elastiklik açısından ölçen bir yöntemdir. Bu çalışmada kullanılan kayaçların SSH'sini ölçmek için C-2 modeli tahribatsız ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Test, kızak içerisine yerleştirilmiş 4 cm kalınlığa örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üst yüzeyleri zımparalanmış ve elmas uç kayaç örneğinin yüzeyine 30 cm yükseklikten dikey yönde düşürülmüştür. Ölçümler, en az 5 mm'lik aralıklarla 20 kez tekrarlanmış ve en yüksek on ölçüm sonucunun ortalaması o kayacın SSH değeri olarak belirlenmiştir.

2.8. İsveç Kırılma Deneyi (S₂₀)

Agregalar için parçalanmaya karşı direncin bir başka ölçüsü de S₂₀ deneyidir. Gevreklik testi, kayacın tekrarlanan etkilerle ezilmeye karşı direnme yeteneği için iyi bir ölçüm sağlar. Test yöntemi, 1943'te İsveç'te geliştirilmiştir. Deney için -16 mm+11,2 mm fraksiyona sahip 500 gram numune kullanılmıştır.

Agrega parçaları üzerine 250 mm yükseklikten 14 kilogramlık ağırlığın 20 kez düşürülmesi ile deney gerçekleştirilmiştir. Ezilmiş agrega parçaları 11,2 mm'lik elekten elenmiş ve bu elekten geçen agrega miktarının toplam deney numunesi ağırlığına oranı % cinsinden S₂₀ değerini vermiştir.

2.9. Porozite (P)

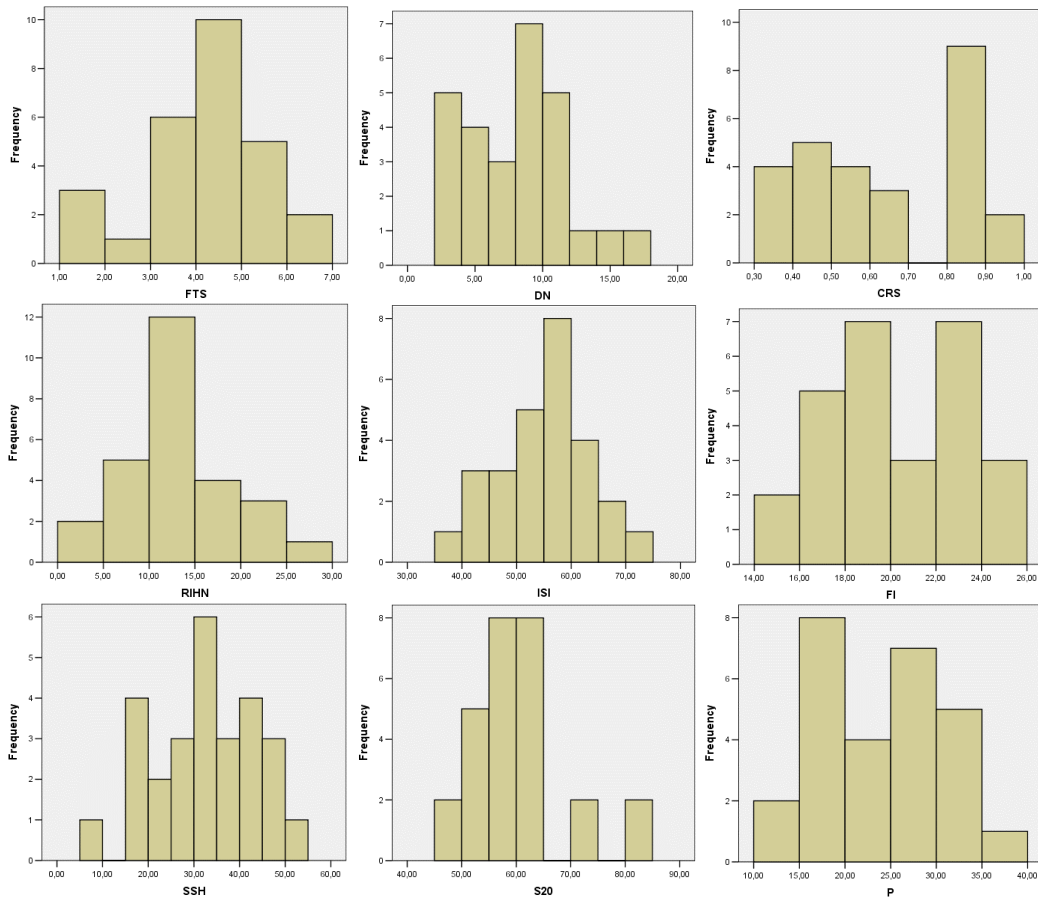
Deney TS EN 1936 [7] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Küp numuneler 105 °C'de 24 saat kurutulup, desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve kuru ağırlıkları tespit edilmiştir.

Örnekler 24 saat suda bekletilerek doygun ağırlıkları da belirlenmiştir. Kumpas yardımıyla ebatları 0,1 mm hassasiyetle ölçülen numunelerinin hacimleri belirlenmiştir. Doygun ve kuru ağırlık

tespit edilmiş ve bu boşluk hacimlerin numune hacmine oranı yüzde cinsinden görünür porozite değeri olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Kayaçların fiziksel ve mekanik test sonuçlarının minimum ve maksimum değerleri

Deney sonuçları	FTS	DN	CRS	RIHN	ISI	FI	SSH	S ₂₀	P
	MPa	MPa	%	-	%	%	-	%	%
En az	6,35	17,0	0,96	25,83	73,88	25,45	54,0	83,15	37,48
En çok	1,23	2,0	0,25	2,90	39,25	15,45	9,17	47,33	13,89
Ortalama	4,11	8,01	0,66	13,23	55,48	20,30	32,44	59,97	24,28
Standart sapma	1,34	3,75	0,19	5,54	8,57	3,08	11,19	8,49	6,59



Şekil 4. Deney verilerinin frekans değerlerini gösterir histogram grafikleri

3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Tüflerin eğilme dayanımlarının yanı sıra fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri de belirlenmiş ve ortalama deney sonuçlarından elde edilen minimum

ve maksimum değerler Çizelge 1’de verilmiştir. Kayaç özellikleri arasındaki ilişkileri modellemek için hem basit hem de çoklu regresyon analizleri birçok araştırmada kullanılmaktadır. F-testleri ve t-testlerini de kapsayan tüm istatistiksel analizler için

SPSS bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Birinci aşamada en uygun ilişkiyi temsil eden ve yüksek korelasyon katsayısına sahip denklemleri elde etmek için, üs, üstel, logaritmik ve lineer fonksiyonları kullanarak basit regresyon analizleri

yapılmıştır (Şekil 5-12). Analizlerin ikinci aşamasını, Çizelge 2’de istatistiksel detayları, eşitlik denklemleri ve korelasyon katsayıları verilen bir dizi çoklu regresyon analizi oluşturmaktadır.

Çizelge 2. FTS’nin kayaç özellikleri ile elde edilen çoklu regresyon denklemleri

Eşitlik No	Değişkenler	Denklem	F-Değeri	t en az	t en çok	VIF en çok	Adj. R ²
1	DN, S ₂₀	FTS = 0,19DN-0,07S ₂₀ +6,97	103,7	3,78	4,76	3,44	0,888
2	SSH, ISI	FTS = 0,06SSH+0,08ISI-2,06	74,12	2,54	3,63	3,29	0,849
3	SSH, S ₂₀	FTS = 0,05SSH-0,09S ₂₀ +7,57	80,67	3,18	4,33	3,39	0,860
4	RIHN, ISI	FTS = 0,13RIHN+0,07ISI-1,57	99,25	2,12	4,66	2,94	0,883
5	RIHN, S ₂₀	FTS = 0,12RIHN-0,07S ₂₀ +6,99	83,71	3,19	3,82	4,18	0,864
6	CRS, ISI	FTS = 2,77CRS+0,09ISI-2,62	66,59	2,88	4,07	3,02	0,835
7	ISI, S ₂₀	FTS = 0,07ISI-0,08S ₂₀ +5,1	93,32	2,45	4,39	3,02	0,877
8	CRS, S ₂₀	FTS = 2,76CRS-0,09S ₂₀ +7,89	85,94	3,47	5,16	2,58	0,867
9	CRS, FI	FTS = 4,48CRS+0,14FI-1,75	48,93	2,13	5,41	1,75	0,787
10	CRS, P	FTS = 3,59CRS-0,08P+3,76	45,93	2,43	3,07	3,30	0,776
11	FI, S ₂₀	FTS = 0,12FI-0,11S ₂₀ +8,5	73,45	2,73	7,12	1,76	0,848
12	P, S ₂₀	FTS = -0,08P-0,1S ₂₀ +11,85	86,87	3,52	16,5	2,29	0,869
13	ISI, CRS, S ₂₀	FTS = 0,05ISI+1,72CRS-0,07S ₂₀ +4,31	72,31	2,08	3,69	4,01	0,892
14	ISI, DN, S ₂₀	FTS = 0,05ISI+0,13DN-0,06S ₂₀ +3,84	85,16	2,07	2,92	4,50	0,907
15	CRS, FI, S ₂₀	FTS = 2,27CRS+0,09FI-0,08S ₂₀ +5,78	67,10	2,12	4,60	2,85	0,884
16	SSH, FI, S ₂₀	FTS = 0,04SSH+0,1FI-0,07S ₂₀ +5,05	66,54	2,41	3,53	3,69	0,883

Basit regresyon analizinde en küçük kareler tekniği kullanılmıştır. Tüflerin test edilen sekiz farklı özelliği bu kayaçların FTS değerleri ile anlamlı korelasyonlar göstermiştir ve denklemlerden elde edilen korelasyon katsayıları 0,57 ile 0,89 arasında değişmektedir. FTS için en yüksek korelasyon katsayıları sırasıyla DN (0,89-üs), RIHN (0,85-üs), S₂₀ (0,84-üstel) ve ISI (0,83-logaritmik) deneylerinden elde edilmiştir. En zayıf korelasyonlar FI (0,57-logaritmik), P (0,71-doğrusal), CRS (0,75-logaritmik) ve SSH (0,79-logaritmik) deneylerine aittir.

Elde edilen denklemlerin geçerliliğini kontrol etmek için %95 güven aralığında F ve t-testleri kullanılmıştır. 27 kayacın kullanıldığı çalışma için tablo F değeri 4,24, tablo t-değeri 2,056 olarak tespit edilmiştir. t-testi, denklemlerin R değerlerinin önem seviyesini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir parametredir. Basit regresyon analizine ait anova çizelgesi incelendiğinde, yukarıda sıralanan testlere ait denklemlerin tamamında hesaplanan t-değerlerinin tablo

t-değerinden çok daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, tüm t-değerlerinin önem katsayısı 0,05’in altındadır. Bu durum kurulan modellerin geçerliliğinin bir göstergesidir. Regresyonların önemini belirlemek için t-testine ek olarak, regresyon varyans analizi de (F testi) kullanılmıştır. Hesaplanan F değerleri tablo F değerlerinden önemli derecede yüksektir. Denklemlerin önemi, F ve t testleri ile teyit edildiğinden, tahmin amaçlı olarak güvenilir bir şekilde kullanılabilirler. Şekil 5-12’de verilen eşitlikler tek bir bağımsız değişken kullanılarak tahmin edildiğinden, kullanım kolaylığı açısından birden fazla bağımsız değişkene sahip denklemlere göre daha pratiktir.

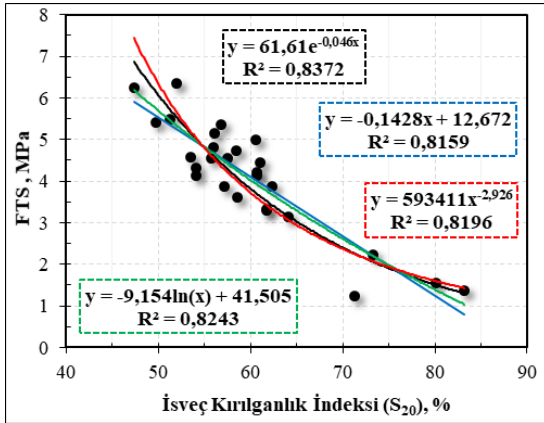
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

FTS’nin tahmin edilebilmesi için yapılan çoklu regresyon çalışmalarında, ortalama sonuçları Çizelge 1’de özetlenen farklı deneysel veriler kullanılmıştır. Modellerde farklı bağımsız

değişkenler girilerek anlamlı ve yüksek güvenilirlikte regresyon denklemleri elde edilmeye çalışılmıştır.

F_{TS}'yi tahmin etmek için, istatistiksel analizle elde edilebilen en güvenilir ve anlamlı çoklu regresyon denklemleri, korelasyon katsayıları, F ve t-değerleri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Elde edilen çoklu regresyon denklemlerinin geçerliliğini kontrol etmek için %95 güven aralığında F ve t-testleri kullanılmıştır. Doğrulamanın daha güçlü olabilmesi için çoklu doğrusallık problemi olup olmadığı da incelenmiştir.

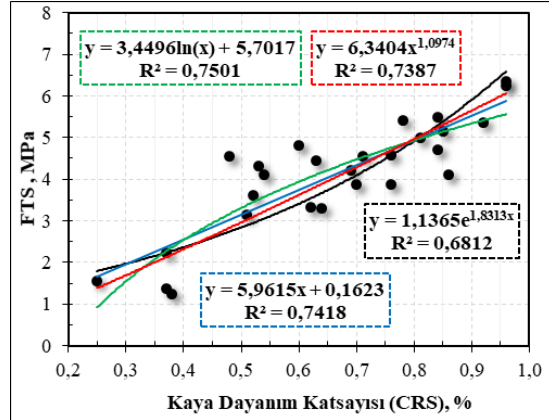
Çoklu doğrusallık probleminin göstergesi, 10'dan az olması gereken VIF (varyans enflasyon faktörü) değeridir. Çizelge 2 incelendiğinde sunulan denklemlerde herhangi bir çoklu doğrusallık probleminin olmadığı görülmektedir. Çoklu regresyonlarda en yüksek katsayıya sahip denklemleri tespit edebilmek amacıyla çizilen (ölçülen-tahmin edilen F_{TS}) dağılım diyagramlarından bir bölümü Şekil 13-16'da verilmiştir. Noktaların her iki bölgede diyagonal çizgiye eşit olarak dağıldığı gerçeği, modellerin güvenilirliğini güçlendirmektedir.



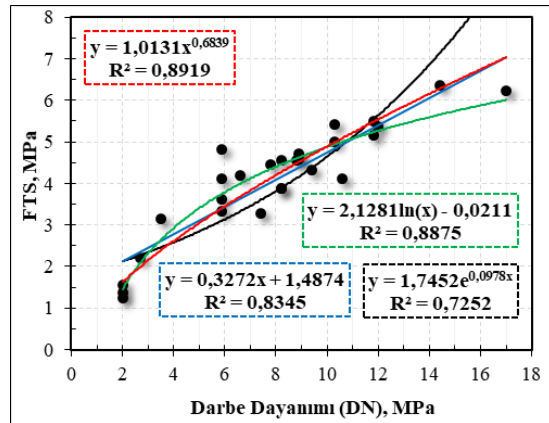
Şekil 5. FTS ile S₂₀ arasındaki korelasyon

Tüm denklemlerde hesaplanan t-değerlerinin tablo t-değerinden çok daha büyük değerlere sahip olduğu, benzer şekilde regresyon varyans analizinde (F testi) hesaplanan F değerlerinin tablo F değerlerinden önemli derecede yüksek olduğu görülmektedir.

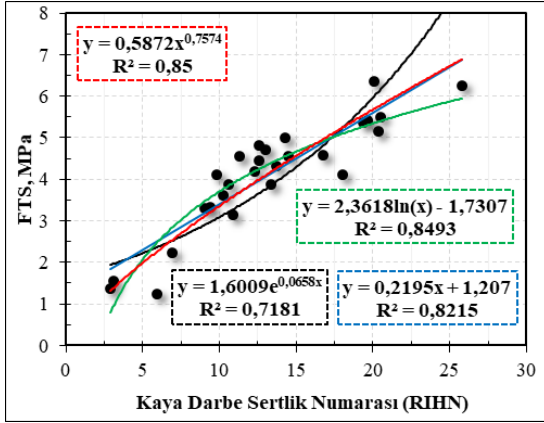
Elde edilen çoklu regresyonlara ait denklemler Çizelge 2'de özetlenmiştir. Çoklu regresyon analizlerinden elde edilen eşitlikler ve bunlara ait güvenilirlik analizleri detaylı olarak incelendiğinde F_{TS}'nin tahmininde en güvenilir sonuçları ve yüksek korelasyon katsayılarını veren denklemlerde sırasıyla S₂₀, ISI, CRS, FI ve P testlerinin etkisi görülmektedir. DN gibi testler ise güvenilirlik testlerinden geçmiş çoklu regresyon denklemlerinde çok fazla yer almamaktadır. Ayrıntılı analizler, çoklu denklemlerin önemli bir bölümünün F_{TS}'nin tahmini için kullanılabileceğini göstermiştir. Çoklu regresyon denklemlerinde birden fazla bağımsız değişken modele girdiğinden, tahmin yetenekleri ve korelasyon katsayıları basit modellerden daha güçlüdür.



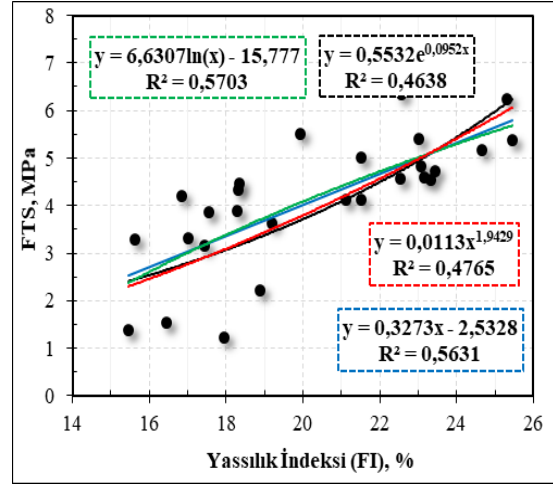
Şekil 6. FTS ile CRS arasındaki korelasyon



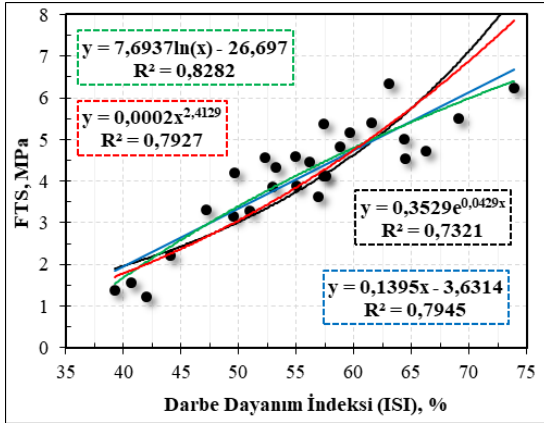
Şekil 7. FTS ile DN arasındaki korelasyon



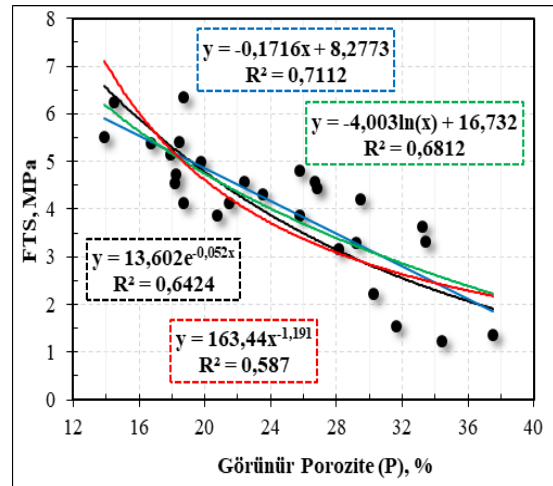
Şekil 8. FTS ile RIHN arasındaki korelasyon



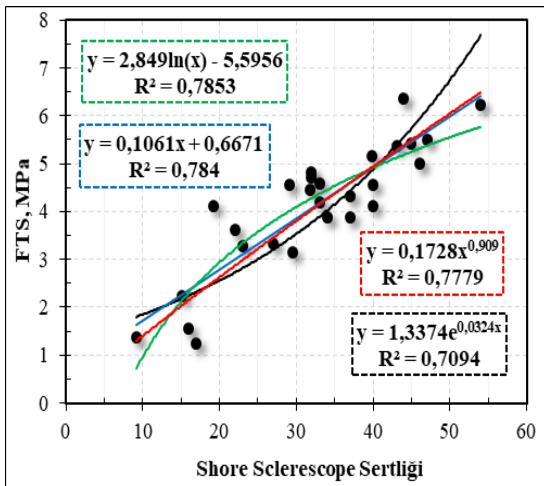
Şekil 11. FTS ile FI arasındaki korelasyon



Şekil 9. FTS ile ISI arasındaki korelasyon



Şekil 12. FTS ile P arasındaki korelasyon



Şekil 10. FTS ile SSH arasındaki korelasyon

5. SONUÇLAR

Çalışmada, tüflerin farklı mühendislik özellikleri test edilmiştir ve çoklu-basit regresyon analizlerinden elde edilen sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir.

Şekil 13-16'da verilen ve ölçülen-tahmin edilen eğilme dayanımlarının karşılaştırıldığı diyagram grafikleri, Çizelge 2'de detayları sunulan 16 eşitlikten sırasıyla Eşitlik 1, 4, 14 ve 16'yı temsil etmektedir.

- FTS'nin diğer mühendislik özellikler ile tahmin edildiği basit korelasyon denklemleri anlamlı ilişkiler ortaya koymaktadır. Ancak çalışmada gerçekleştirilen test sonuçlarının iki ve üç bağımsız değişken olarak kullanıldığı çoklu regresyon denklemleri incelendiğinde çok daha yüksek korelasyon katsayıları elde edildiği görülmektedir.

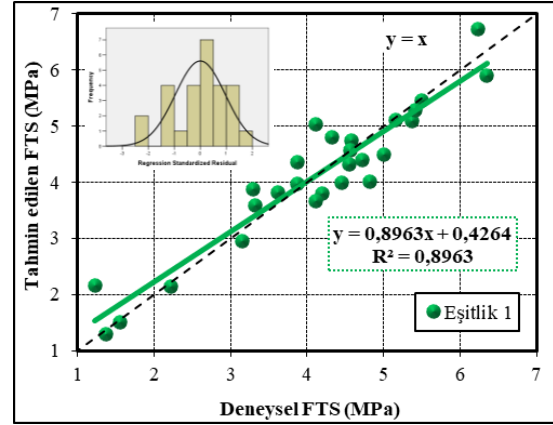
- Bu durum çoklu denklemlerin tahmin güçlerinin basit denklemlere göre daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. Pratik olarak tespit edilebilecek bu testlerin verileri kullanılarak FTS'nin güvenilir bir şekilde tahmini mümkün olacaktır.

- Yapılan regresyon çalışmalarına göre üç bağımsız değişkenin kullanıldığı modellerin iki bağımsız değişkenin kullanıldığı modellere göre daha yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmektedir. FTS'nin tahmininde en güvenilir sonuçları ve yüksek korelasyon katsayılarını veren denklemlerde sırasıyla S_{20} , ISI, CRS, FI ve P testlerinin etkisi görülmektedir.

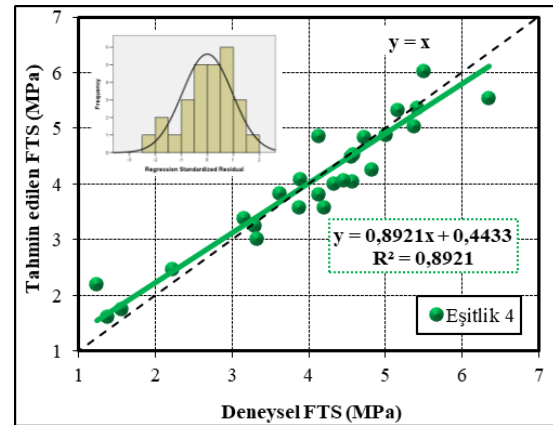
- Kayaçlarda eğilme dayanımının tespit edilmesi zaman alıcıdır. Özel boyutlarda kesilip hazırlanmış çok sayıda test numunesine ve hidrolik kontrollü bir test cihazı gerekmektedir. Öte taraftan çalışma kapsamında gerçekleştirilen agrega/kayaç deneylerinin büyük bir bölümü oldukça basit test ekipmanına, oldukça az miktarda deney numunesine ihtiyaç duyulan testlerdir.

Dolayısı ile literatürde çok rastlanmayan özellikler taşıyan bu çalışmanın ortaya koyduğu eşitlikler, FTS'nin belirlenmesinin çok mümkün olmadığı durumlarda özellikle tahmin amaçlı olarak güvenilir bir şekilde kullanılabilir.

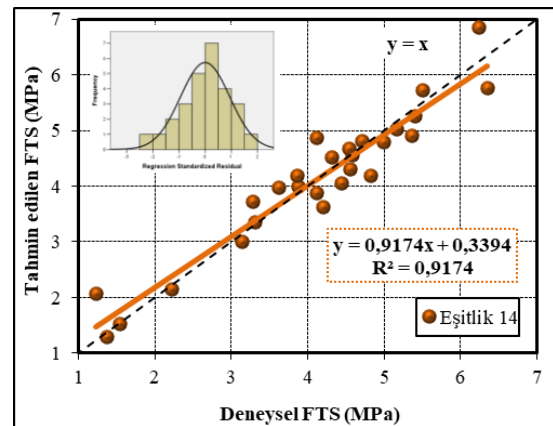
- Bu çalışma ağırlıklı olarak magmatik kökenli tuf ve ignimritlerin oluşturduğu çok sayıda kayaç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modellerin yukarıda belirtilen özelliklere sahip kayaçlar için kullanılması uygun olacaktır. Türetilen modellerin farklı kökenden kayaçlarda kullanılması durumunda özen gösterilmelidir.



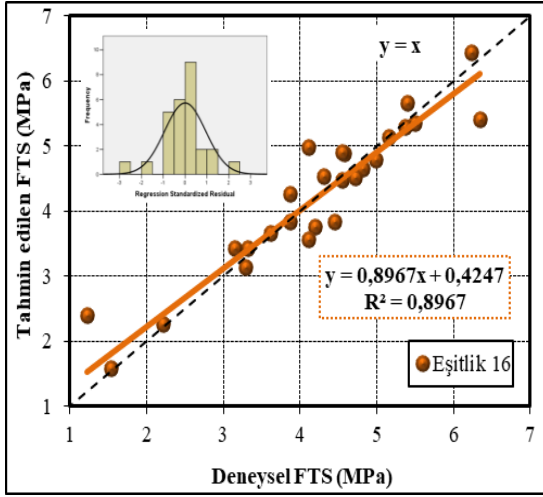
Şekil 13. Ölçülen ve tahmin edilen FTS değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 1)



Şekil 14. Ölçülen ve tahmin edilen FTS değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 4)



Şekil 15. Ölçülen ve tahmin edilen FTS değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 14)



Şekil 16. Ölçülen ve tahmin edilen FTS değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 16)

7. TS EN 1936, 2010. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini, Ankara.

5. KAYNAKLAR

1. Şengün, N., Altındağ, R., 2010. Kayaçların Kırılma Tokluğu (Mod-I) ile Fiziko-mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkilerinin Değerlendirilmesi. Yerbilimleri, 31(2), 127-140.
2. Akbay., D., Şengün, N., Demirdağ., S., Altındağ, R., Uğur., İ., 2015. Bazı Doğal Taşların Farklı Koşullar Altında Dayanım Değerlerinin Değişiminin İncelenmesi. IMCET-2015 Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, 710-717.
3. TS EN 13161, 2014. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri -Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımının Tayini, Ankara.
4. TS 699, 2009. Doğal yapı taşları- İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri, Ankara.
5. TS EN 933-3 12.04.2012, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 3: Tane Şekli Tayini Yassılık Endeksi. TSE, Ankara.
6. ISRM., 1981., Rock Characterization, Testing and Monitoring-Commission on Standardization Laboratory and Field Results. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks. Part 4, 102-103, Pergamon, Oxford.