



Sedimanter ve metamorfik kökenli doğal taşların üretiminde kullanılan blok kesme (S/T) ve katraş makinelerinin kesilebilirliğin değerlendirilmesi

Evaluation of the sawability of block-cutting (S/T) and gang saw machines used in production of the sedimentary and metamorphic origin natural stones

Yunus Emre Satı¹ , Deniz Tumaç^{2,*} , Aydın Shaterpour-Mamaghani³ 

^{1, 2, 3} İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliđi Bölümü, 34469, İstanbul Türkiye

Öz

Türkiye’de doğal taş sektörü son yıllarda önemli derecede gelişmiş ve işletmelerin büyük yatırımlar ile modern üretim yöntemlerine ve tekniklerine yöneldiği görölmektedir. Fabrika ve ocaklarda kullanılan üretim yöntemlerine bakıldığında özellikle elmas boncuklu tel kesme, zincirli kollar kesme, dairesel testereli blok kesme (S/T) ve katraş makinelerinin ön plana çıktığı görölmektedir. Yüksek verimlilik, üretim ve kar oranlarına sahip bu makineler firmalar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada Denizli’de bulunan bir doğal taş işletmesinden sedimanter ve metamorfik kökenli doğal taşlar elde edilmiştir. Daha sonra bu örnekler üzerinde kaya mekaniği deneyleri yapılarak bazı önemli fiziksel-mekanik özellikler belirlenmiştir. Sonunda işletmede kullanılan S/T ve katraş makinelerinin alansal plaka üretim oranı (APÜO) tahmininde kullanılacak ampirik modeller önerilmiştir. Yapılan analizler sonucunda doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı, Cerchar aşındırıcılık indeksi, dolaylı çekme dayanımı ve yoğunluk özellikleri S/T ve katraş makinelerinin kesme performansının tahmini için kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca, önerilen modellerin güvenilirliği literatürde bulunan diğer modellerle kıyaslanmıştır. Bu çalışma, farklı kökenli ve farklı fiziksel-mekanik özelliklere sahip doğal taşların veri tabanına ekleyerek daha genel ve güvenilir tahmin modelleri geliştirmek için sürdürülmelidir.

Anahtar kelimeler: Doğal taş, Blok kesme makinesi, Katraş makinesi, Kesilebilirlik, Modelleme

1 Giriş

Dünya genelinde doğal taş üretiminin artışı, doğal taşların dekorasyon ve yapı taşı olarak kullanımlarının artmasıyla doğru orantılıdır. Bilhassa son yıllara tekabül eden artış, gelişen teknoloji ile birlikte giderek daha mükemmel bir hal alan işleme teknikleri ile doğal taşlar, çok daha kolay ve ekonomik bir şekilde istenen forma getirilerek kendilerine yeni kullanım alanları bulmaktadırlar. Dünyadaki toplam doğal taş rezerv miktarı 15 milyar m³ olarak tahmin edilmektedir. Dünyanın en zengin mermer yataklarının bulunduğu Alp kuşağında yer alan Türkiye, 5.1

Abstract

The natural stone sector in Türkiye has developed significantly in recent years and it is seen that enterprises are tried to use modern production methods and techniques with large investments. When these production methods used in factories and quarries are investigated, it is seen that especially diamond wire cutting, chain saw machines, circular saw block cutting (S/T) and gang saw machines come to the fore. These machines due to high productivity, production and profit rates are more preferred by companies in the natural stone quarries. In this study, natural stones with sedimentary and metamorphic origin were obtained from a natural stone enterprise in Denizli. Then, some important physical-mechanical properties of these samples are determined by performing rock mechanics experiments. Finally, new empirical models are proposed for the estimation of the areal slab production rate (ASPR) of the S/T and gang saw machines used in the natural stone enterprise. This study shows that uniaxial compressive strength, indirect tensile strength, Cerchar abrasivity index and density properties of natural stones can be used to estimate sawing performance of S/T and gang saw machines. In addition, the reliability of the proposed models is compared with other models in the literature. This study should be continued to develop more generalized and reliable estimation models especially by adding natural stones of different origin and with different physical-mechanical properties to the database.

Keywords: Natural stone, Block-cutting machine, Gangsaw machine, Sawability, Modeling

milyar m³ muhtemel rezerve sahiptir. Bu değer dünya rezerv toplamının yaklaşık %33’üne tekabül etmektedir [1].

Ocaklarda üretimi gerçekleştirilen doğal taş blokları, fabrikalarda belirli işlemlere tabi tutularak istenilen boyut ve şekle getirilir. Yüzeyleri parlatılır ve pürüzsüzleştirilir. Doğal taş bloklarının piyasada en yüksek değeri olacak şekilde levha haline getirilmesi işleminde dairesel testereli blok kesme, katraş kesme, köprü kesme, dikey ve yatay yarma, ebatlama ve pah makineler kullanılmaktadır.

Doğal taş plaka ve fayans üreten fabrikaların büyük çoğunluğu dairesel testereli blok kesme (S/T) makinelerinde üretim yapmaktadır. Bu makineler 1.8-3.0 m çapında, 4-6

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tumacde@itu.edu.tr (D. Tumaç)

Geliş / Received: 08.04.2023 Kabul / Accepted: 22.06.2023 Yayımlanma / Published: 15.07.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1279557

mm kalınlığında dairesel bir disk etrafına oturtulmuş soketlerle kesim yapar. S/T makineleri genel itibarıyla 4 ayaklı ve 2 ayaklı olmak üzere iki çeşittir. 2 ayaklı S/T'de köprü sadece dikey hareket yapabilirken, 4 ayaklı S/T buna ek olarak yatay hareket de yapabilir [2]. Katrak makineleri sektörde "cut rock", "gangsaw", "frame saw" veya "gangsaw mill" isimleri ile de tarif edilir. Katrak makineleri, ocaklardan gelen doğal taş blokları ve molozlarından aynı zaman diliminde birden fazla levha üretilmesinde kullanılan doğal taş işleme makineleridir. Kesme işlemi, lineer olarak hareket eden lamalara lehimlenmiş elmas soketlerin doğal taş bloğuna nüfuz etmesi ile gerçekleştirilir. Katrak makinelerinin üzerindeki lama sayısı makinenin kapasitesine göre 10 ila 120 arasında değişebilmektedir.

S/T ve katrak makinelerinin doğru seçimi ve performans tahmini, doğal taş tesislerinin maliyet tahmini ve planlamasını etkileyen iki önemli parametre olarak belirtilebilir. Bu iki parametre genellikle doğal taşların fiziksel-mekanik özelliklerine, makinenin teknik özelliklerine ve tasarımına ve çalışma koşullarına bağlıdır. Bu makinelerinin kesilebilirlik ve Alansal Plaka Üretim Oranı (APÜO) performans parametresi olarak literatürde en çok araştırılan parametrelerdir.

S/T ve katrak kesme makinelerinde kesme işlemini etkileyen faktörler kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen parametreler olarak gruplandırılabilir. Testere türü ve çapı, makine özellikleri, uygulanan dönüş hızı gibi parametreler kontrol edilebilir parametreler olarak dikkate alınabilir. Kontrol edilemeyen parametreler ise doğal taş özellikleri ve jeolojik oluşumlarını kapsamaktadır. Literatür incelemesi sonucunda S/T ve katrak makinelerinin performanslarını tahmin etmek için farklı araştırmacılar tarafından bu iki ana faktör dikkate alınarak modeller önerildiği görülmektedir. Önerilen modellerin bu iki ana faktörü kapsadığı zaman daha güvenli performans tahmininin yapılması mümkündür. Özellikle, spesifik enerji, spesifik kesme enerjisi veya enerji tüketimi gibi değişkenlerin tahmin edilmesine yönelik modellerin daha çok avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak, sahada ve laboratuvarında karşılanan bazı kısıtlamalardan dolayı bütün çalışmalarda bu iki ana faktörü aynı anda elde etmek mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, araştırmacılar elde edilen doğal taşlar üzerinde bazı basit ve diğer araştırmacılar tarafından tekrarlanabilen deneyler yaparak S/T ve katrak kesme makinelerin performansını tahmin etmek için doğal taşların fiziksel-mekanik özelliklerine dayalı modeller önermektedirler. Ayrıca, bilindiği gibi bu makinelerde operatör faktörü de göz ardı edilmemesi gereken bir diğer parametredir. S/T ve katrak makinelerinin APÜO operatör tarafından ayarlanabilmekte ve değiştirilebilmektedir. Ancak, önerilen performans tahmin modelleri doğal taş işletmelerinde işveren, mühendisler ve operatörler tarafından bir ön tahmin yöntemi olarak kullanılabilmektedir. Özellikle, bu modeller kullanılarak doğal taşlar için APÜO değerleri öngörülebilir ve böylelikle makinelerin daha verimli kullanılmasına katkı sağlanabilir.

Norling [3] taşların tane boyutunun kuvars içeriğinden çok kayacın kesilebilirliğiyle ilgili olduğunu belirtmiştir. Burgess ve Birle [4] kayaçların aşınmaya karşı olan

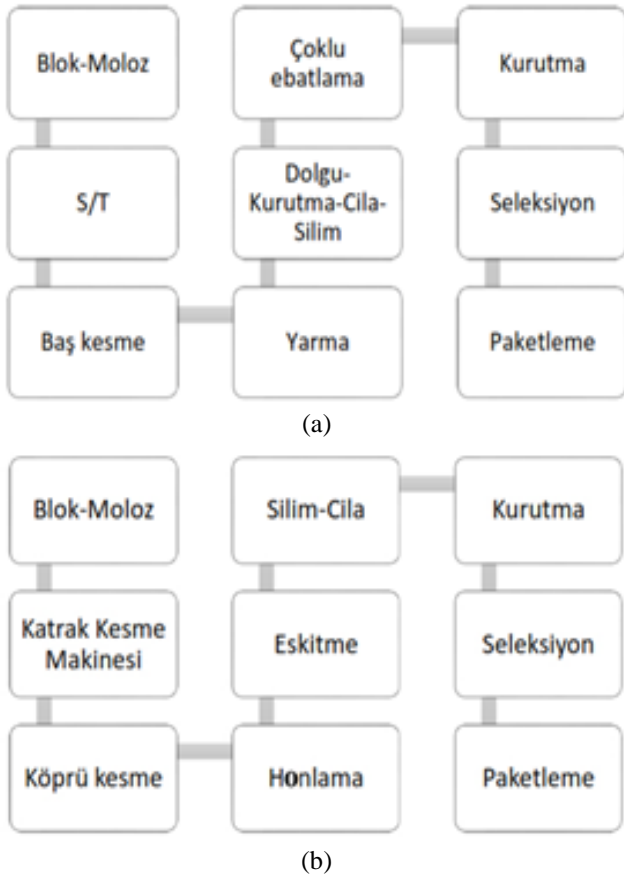
dirençlerini, mineralojik kompozisyonu, tane boyutunu ve sertliğini kullanarak kesilebilirlik parametresini tahmin etmek için bir model önermişlerdir. Plaka üretim oranları ile spesifik kesme arasındaki ilişkiyi Ceylanoglu ve Gorgulu [5] incelemiştir ve istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde etmişlerdir. Kahraman vd. [6] karbonatlı kayaçların kesiminde kullanılan dairesel testerelerin performans tahmini için nokta yük dayanımı, Schmidt çekici sertliği, darbe dayanımı ve P dalga hızı değerlerini kullanarak anlamlı ilişkiler elde etmişlerdir. Gunaydin vd. [7] sekiz değişik doğal taş üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda, sekiz farklı yaklaşımda bulunarak kırılma değeri ile plaka üretim oranı ilişkisini incelemiştir. Ribeiro vd. [8], taşların kesilebilirliğini makinenin özellikleri, kesme derinliği ve taşın özellikleri ile ilişkilendirmiştir. Fener vd. [9] karbonatlı kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve alansal plaka üretim hızı arasında iyi korelasyon olduğunu belirlemiştir. Güney [10] beş farklı metamorfik kökenli doğal taşın kesme performanslarının tahminine yönelik yüzey sertliği ile alansal üretim hızı arasında iyi ilişkiler elde etmiştir. Tumaç [11] Cerchar aşındırıcılık indeksi (CAI) ve deformasyon katsayısı değerlerini kullanarak S/T makinelerinin performans tahminini için modeller önermiştir. Çevim [12] dokuz farklı doğal taş üzerinde yaptığı basit ve çoklu regresyon analizlerini kullanarak S/T makinelerinin performansını tahmin etmek için yeni modeller önermiştir. Kahraman vd. [13] doğal taşların P dalga hızını kullanarak bir kalite sınıflandırması önermiştir ve bu sınıflandırmayı katraklarla taş kesmeye uygulamalarında incelemiştir. Yedi farklı karbonatlı kayaç üzerinde kullanılan çok bıçaklı katrak makinesinin levha üretim parametresi Neves vd. [14] tarafından çoklu regresyon modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, Dormishi vd. [15] karbonatlı kayaç kesme işleminde kullanılan katrak makinelerinin enerji tüketim parametresini tahmin etmek için kaya özelliklerine dayalı olarak yeni modeller önermişlerdir. Dormishi vd. [16] katrak makinelerinde elektrik akımı ve bu akıma etki eden karbonatlı kayaçların bazı fiziksel-mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri esnek hesaplama (soft computing) tekniklerini kullanarak araştırmışlardır. Shaffiee Haghshenas vd. [17] çalışmalarında, katrak makinelerinin performans değerlendirmesi için yeni bir geleneksel yaklaşım önermişlerdir. Bu çalışmada, maksimum elektrik akımını tahmin etmek için çoklu doğrusal regresyona ve doğrusal olmayan gen ifade programlama algoritmasına (GEP) dayalı iki yeni model önerilmiştir.

Bildiği gibi, jeolojik oluşumları açısından doğal taşlar magmatik (püskürük), sedimanter (tortul) ve metamorfik (başkalaşmış) taşlar olmak üzere üç ana grup altında incelenirler. S/T ve katrak makineleriyle ilgili literatürde performans için önerilen modeller genel olarak karbonatlı taşlar veya mermerler gibi belirli doğal taş türleri için elde edilmiştir. Bu bilgiler dikkate alınarak, bu çalışmanın amacı altı farklı sedimanter ve metamorfik doğal taşlarda kesim işlemi yapan S/T ve katrak makinelerinin performansını tahmin etmek için yeni ampirik modeller önermektir. Bu amaca ulaşmak için Denizli'de bulunan bir doğal taş işletmesinden numuneler elde edilmiştir. Daha sonra bu

numunelerin laboratuvarında tek eksenli basınç dayanımı (UCS), dolaylı (endirekt) çekme dayanımı (BTS), yoğunluk (ρ), porozite (ϕ) ve Cerchar aşındırıcılık indeksi (CAI) belirlenmiştir. Daha sonra basit ve çoklu regresyon analizleri kullanarak S/T ve katarak makinelerinin APÜO ile kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri incelemiştir.

2 Saha çalışmaları

Bu çalışma kapsamında Denizli ilinde bulunan bir doğal taş işleme fabrikasında altı farklı doğal taşın S/T ve katarak makineleri ile kesimleri analiz edilmiştir. Bu performans analizi Muğla Beyaz, Patara Bej, Denizli Traverten, Korkuteli Bej, Muğla Şeker ve Muğla Gümüş blokları üzerinde yapılmıştır. Fabrikada S/T ve katarak makinesiyle yapılan işlerin akım şeması Şekil 1’de özetlenmiştir. Çalışmaların gerçekleştirildiği dört farklı S/T makinesi de dört ayaklı olup, aynı ağırlık ve ebatlama ölçülerine sahiptirler. Tablo 1’de kullanılan S/T makinesinin teknik özellikleri listelenmiştir. Ayrıca, performans analizi aynı marka ve özelliklere sahip iki farklı katarak blok kesme makinesi üzerinde yapılmıştır. Bütün makineler 80 lamalı katarak blok kesme makinesi olmakla birlikte aynı ağırlık ve ebatlama ölçülerine sahiptirler. Tablo 2’de kullanılan katarak makinesinin teknik özellikleri özetlenmiştir. Şekil 2’de fabrikada kullanılan S/T ve katarak makinelerinin fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 1. Doğal taş fabrikasında uygulanan üretim akım şeması (a: S/T, b: katarak)

Tablo 1. MKS S/T 1800 makinesinin teknik özellikleri

Teknik özellikler	Değerler
Dikey testere çapı	1000-1800 mm
Yatay testere çapı	450 mm
Vagon motor gücü	2.2 / 3.0 kW/HP
Toplam elektrik gücü	144 / 193 kW/HP
Makinede kullanılan su miktarı	100-150 lit/min.
En büyük blok ebatları (boy×en×yükseklik)	3400×2200×2400 mm
Makine ebatları (boy×en×yükseklik)	8200×5350×4800 mm
Makine ağırlığı	16500 kg

Tablo 2. MKS 80-80 lamalı katarak makinesinin teknik özellikleri

Teknik özellikler	Değerler
Kesme lama sayısı	80
Dakikadaki strok sayısı	92
Lama kursu	800 mm
Ana motor gücü	110 / 147.5 kW/HP
Toplam elektrik gücü	132 / 180 kW/HP
En büyük blok ebatları (boy×en×yükseklik)	3250×2000×2000 mm
Makine ebatları (boy×en×yükseklik)	11400×4450×5150 mm
Makine ağırlığı	48200 kg



(a)



(b)

Şekil 2. Doğal taş fabrikasında kullanılan S/T ve katarak makineleri (a: S/T, b: katarak).

3 Laboratuvar çalışmaları

Fabrikadan elde edilen numuneler üzerinde yoğunluk (ρ), tek eksenli basınç dayanımı (UCS), dolaylı (endirekt) çekme dayanımı (BTS), Cerchar aşındırıcılık indeksi (CAI) ve porozite (ϕ) deneyleri ISRM [18] ve ASTM [19] standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Blok numunelerden alınan NX karot numuneleri hassas terazide tartılarak ağırlıkları bulunmuştur. Hacim ve ağırlıkları hesaplanan numunelerin yoğunlukları bulunmuştur. UCS deneylerinde kullanılan karot örneklerinin yükseklik/çap oranı yaklaşık 2.5 olarak belirlenmiş ve deney esnasında yükleme hızı 1.0 kN/sn. olarak sabit alınmıştır. BTS deneylerinde ise örneklerinin yükseklik/çap oranı yaklaşık 0.5 olarak belirlenmiş ve deney esnasında yükleme hızı 0.25 kN/sn. olarak sabit alınmıştır. Her iki ucu düzgün olarak kesilmiş karot numuneler etüvde 105 - 110°C' de 24 saat bekletilmiştir. Etüvde bekletilen örnekler hassas terazide tartılarak kuru ağırlıkları bulunmuştur. Kuru ağırlıkları bulunan örnekler su dolu bir kabın içerisinde 48 saat bekletilmiştir. Su içerisinde bekletilen örnekler yine hassas terazide tartılarak yaş ağırlıkları bulunmuştur. Elde edilen bu değerler kullanılarak her bir örnek için porozite değeri belirlenmiştir. CAI deneyi ve analizleri ASTM [19] standartlarına uygun olarak taze kırılmış örnekler üzerinde yapılmıştır. Her bir numune için beş pin ile yapılan deneyler sonucunda on okuma değerli elde edilmiş ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak CAI değerleri hesaplanmıştır. Doğal taşların fiziksel-mekanik özelliklerinin toplu sonuçları Tablo 3'te özetlenmiştir.

4 S/T ve katraş makinelerinin performans analizi

Bu bölümde ilk olarak fabrikada kullanılan S/T ve katraş makinelerinin performansları anlatılmıştır. Daha sonra laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ve alansal plaka üretim oranı (APÜO) arasındaki ilişkiler tek değişkenli ve çok değişkenli doğrusal regresyon yöntemleri ile incelenmiştir.

4.1 Blok kesme (S/T) makinesi

Fabrikada üretilen plakaların kalınlıkları 3 cm, enleri 30-43 cm ve boyları 63-200 cm aralıklarında değişmektedir. Dört ayaklı S/T makinelerinin performans parametresi olarak bir saatteki alansal plaka üretim oranının (m^2/h) belirlenmesi dikkate alınmıştır. Bir blok kesimi için net kesim süresinin hesabında duraklamaların, operatör etkisinin kesimi etkileyen parametreler olduğu gözlemlenmiştir.

Performans ölçümleri her bir doğal taş için üç kere tekrar edilmiş ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak kesim performansı belirlenmiştir. Bu ölçümler, S/T makinesinin verimli kesim yaptığı gözlemlendiği zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'te doğal taşların kesiminde kullanılan S/T makinelerinin performans analiz değerleri özetlenmiştir. Karşılaştırmaların güvenilir bir şekilde yapılabilmesi için kayaç yüzeyine temas eden lama sayıları dikkate alınmış ve değerler normalize edilmiştir.

Tablo 4. Doğal taşların kesiminde kullanılan S/T makinelerinin performans analizi

Muğla Beyaz				
Ölçüm No.	1	2	3	Ortalama
Plaka ebatları (cm×cm)	160×30	160×30	160×30	160×30
Üretilen plaka sayısı	86	90	75	83.7
APÜO (m^2/h)	15.2	16.2	16.6	16.0
Patara Beş				
Ölçüm No.	1	2	3	Ortalama
Plaka ebatları (cm×cm)	200×33	200×33	200×33	200×33
Üretilen plaka sayısı	90	95	91	92
APÜO (m^2/h)	11.2	9.8	10.4	10.5
Denizli Traverten				
Ölçüm No.	1	2	3	Ortalama
Plaka ebatları (cm×cm)	63×43	63×43	63×43	63×43
Üretilen plaka sayısı	338	165	100	201
APÜO (m^2/h)	16.2	13.5	14.1	14.6
Korkuteli Beş				
Ölçüm No.	1	2	3	Ortalama
Plaka ebatları (cm×cm)	160×33	160×33	160×33	160×33
Üretilen plaka sayısı	15	10.2	12.9	12.7
APÜO (m^2/h)	7.2	4.9	6.2	6.1
Muğla Şeker				
Ölçüm No.	1	2	3	Ortalama
Plaka ebatları (cm×cm)	63×43	63×43	63×43	63×43
Üretilen plaka sayısı	184	203	156	181
APÜO (m^2/h)	13.3	14.2	15.1	14.2
Muğla Gümüş				
Ölçüm No.	1	2	3	Ortalama
Plaka ebatları (cm×cm)	135×33	135×33	135×33	135×33
Üretilen plaka sayısı	84	56	92	72.3
APÜO (m^2/h)	14.9	14.5	13.8	14.4

4.1.1 Tek değişkenli regresyon yöntemine dayalı modeller

Tek değişkenli regresyon yöntemi, bir bağımsız ve bir bağımlı değişken arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak incelenmesi olarak tanımlanır. Bu yöntemden yola çıkarak, S/T makinesinin performans parametresi olarak seçilen alansal plaka üretim oranı (APÜO) bağımlı değişken olarak seçilmiş ve doğal taşların fiziksel-mekanik özellikleriyle (bağımsız değişkenler) olan ilişkileri araştırılmıştır. Bu incelemeler sonucunda, S/T makinesinin kesme performansı üzerinde hangi doğal taş özelliğinin baskın parametre olduğunu anlaşılmıştır.

Tablo 3. Doğal taşların fiziksel ve mekanik özelliklerinin özeti.

Doğal taş	Jeolojik köken	ρ (gr/cm^3)	UCS (MPa)	BTS (MPa)	ϕ (%)	CAI (-)
Muğla Beyaz	Metamorfik	2.67	97.3	7.1	0.4	2.99
Patara Beş	Sedimanter	2.64	112.7	7.3	0.5	1.03
Denizli Traverten	Sedimanter	2.50	55.5	4.9	9.6	0.70
Korkuteli Beş	Sedimanter	2.70	120.3	9.4	0.4	1.30
Muğla Şeker	Metamorfik	2.68	66.2	7.0	0.5	0.90
Muğla Gümüş	Metamorfik	2.72	99.9	7.7	0.2	2.25
Muğla Beyaz	Metamorfik	2.67	97.3	7.1	0.4	2.99

ρ : yoğunluk, UCS: tek eksenli basınç dayanımı, BTS: dolaylı (endirekt) çekme dayanımı, ϕ : porozite, CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi.

Şekil 3'te S/T makinesinin kesme performans ile doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler verilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki belirlilik katsayısına (R^2) göre değerlendirmiştir. İlişkilerin R^2 değeri %50 ile %69 arasında orta derecede güçlü, %70 ile %89 arasında güçlü ve %90'a eşit veya daha büyükse çok güçlü olarak alınmıştır. R^2 değeri %50'den küçük olan ilişkiler de zayıf/çok zayıf olarak tanımlanmıştır. Şekillerden görüldüğü gibi, APÜO ile doğal taşların fiziksel-mekanik özellikleri arasında çok zayıf ve orta derecede güçlü ilişkiler bulunmuştur. Özellikle yoğunluk ve porozite değerlerinin S/T makinesinin kesme performansı ile çok zayıf ilişkilerinin nedeni incelenen doğal taşlarında bu iki özellik değerlerinin çok dar bir aralıkta değişiyor olmasından kaynaklanmaktadır (Denizli Traverten porozite değeri aykırı değer olarak değerlendirilebilir).

4.1.2 Çoklu regresyon yöntemine dayalı modeller

Çoklu regresyon yöntemi, birden fazla bağımsız değişkenlerin aynı anda bağımlı değişken üzerindeki etkisinin araştırılmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, basit regresyon yöntemi ile elde edilen ilişkilerinin genel olarak zayıf olduğundan dolayı çoklu regresyon yöntemine dayalı modellerin daha güvenilir sonuçlar üreteceği düşünülmüştür. Bu doğrultuda, doğal taş numunelerinin belirlenmiş fiziksel-mekanik özelliklerinin APÜO tahminine etkilerini belirlemek üzere çoklu regresyon analizleri uygulanmıştır. Burada, APÜO bağımlı değişken ve bütün fiziksel-mekanik özellikler ise bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki Denklemlerde (1-3) özetlenmiştir. Bu eşitliklerde verilen R^2 değerleri düzeltilmiş belirlilik katsayısı değerlerini göstermektedir.

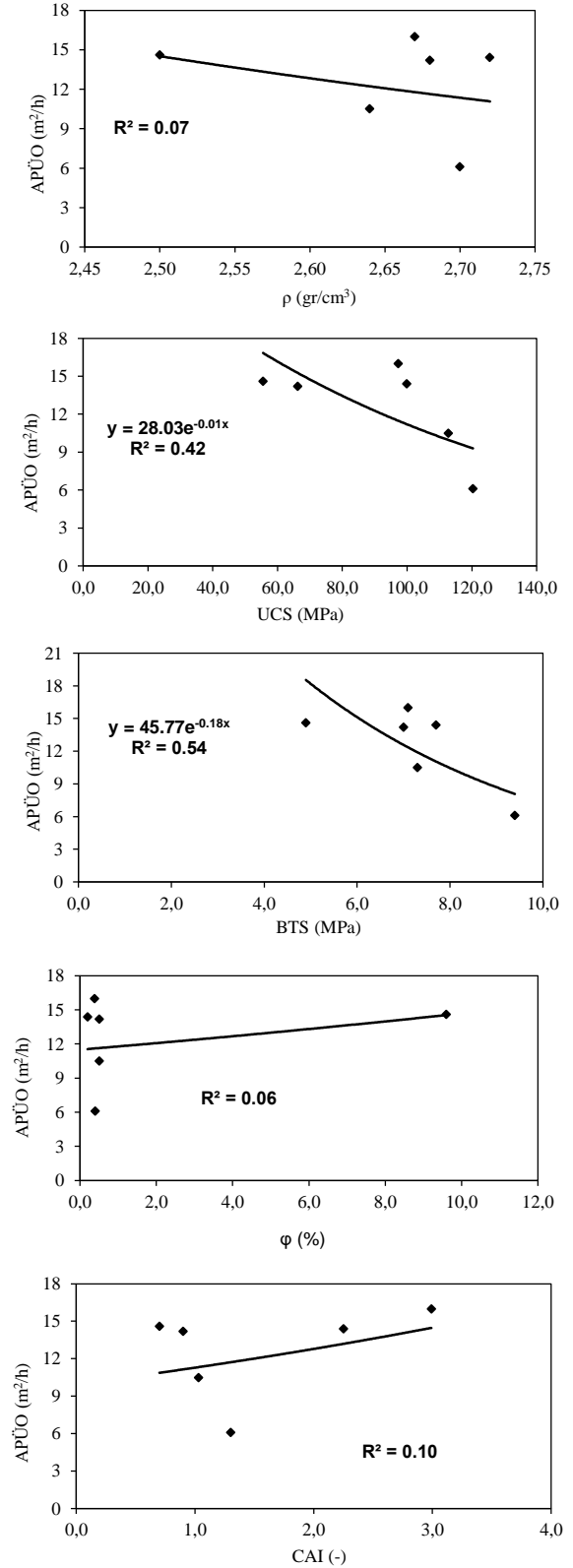
$$AP\ddot{U}O = 55.5\rho - 4.37BTS - 103 \quad R^2 = 0.86 \quad (1)$$

$$AP\ddot{U}O = -0.13UCS + 2.92CAI + 20.2 \quad R^2 = 0.77 \quad (2)$$

$$AP\ddot{U}O = -2.21BTS + 2.44CAI + 24.9 \quad R^2 = 0.72 \quad (3)$$

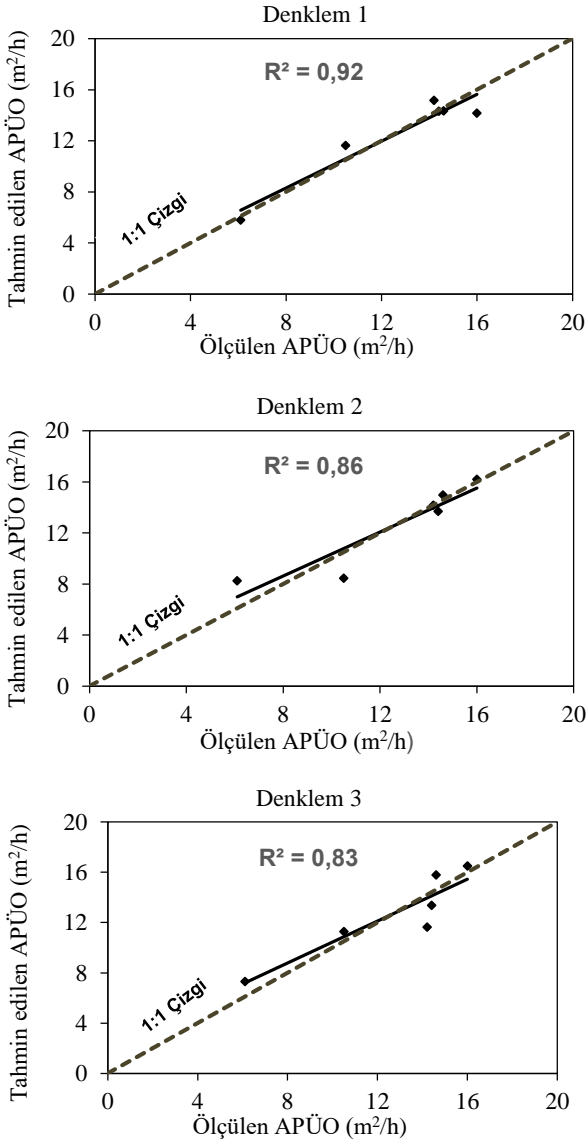
Burada, APÜO alansal plaka üretim oranı (m^2/h), ρ yoğunluk (g/cm^3), BTS dolaylı (endirekt) çekme dayanımı (MPa), UCS tek eksenli basınç dayanımı (MPa) ve CAI Cerchar aşındırıcılık indeksi parametrelerini göstermektedir.

Elde edilen bu denklemlerin istatistiksel analiz sonuçları Tablo 5'te özetlenmiştir. Analizlerde Minitab 2016 [20] istatistik yazılımı kullanılmıştır. Olası istatistiksel ilişkileri ve güçlü yönlerini görmek için en iyi alt kümeler yöntemi kullanılmıştır. Minimum güven sınırı %75 olarak alınmıştır ve maksimum anlamlılık değeri 0.25'tir. Çoklu doğrusallık probleminde kaçınmak için (bağımsız / tahmin edici parametreler arasında yüksek korelasyon) varyans şişirme faktörü (VIF) de dikkate alınmıştır ve bu değer 10'dan düşük olması seçilmiştir. İstatistiksel "t" (iki kuyruklu) ve "F" (tek kuyruklu / sağ kuyruk) testleri de dikkate alınmış ve tahmini değerlerinin tablo değerlerinden büyük olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca, bu denklemler için ölçülen ve



Şekil 3. Doğal taşların fiziksel-mekanik özellikleri ile S/T makinelerinin alansal plaka üretim oranı arasındaki ilişkiler.

tahmin edilen değerlerinin dağılım grafikleri Şekil 4'te sunulmaktadır. Geliştirilen modeller incelendiğinde, 1:1 çizgisinden çok az bir sapma ve dağılım gözlemlenmiştir. Böylece bu modellerin tahmin yeteneği ve güvenilirliği güçlü / çok güçlü olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4. Ölçülen ve tahmin edilen S/T makinelerinin alansal plaka üretim oranı parametresinin dağılım grafikleri.

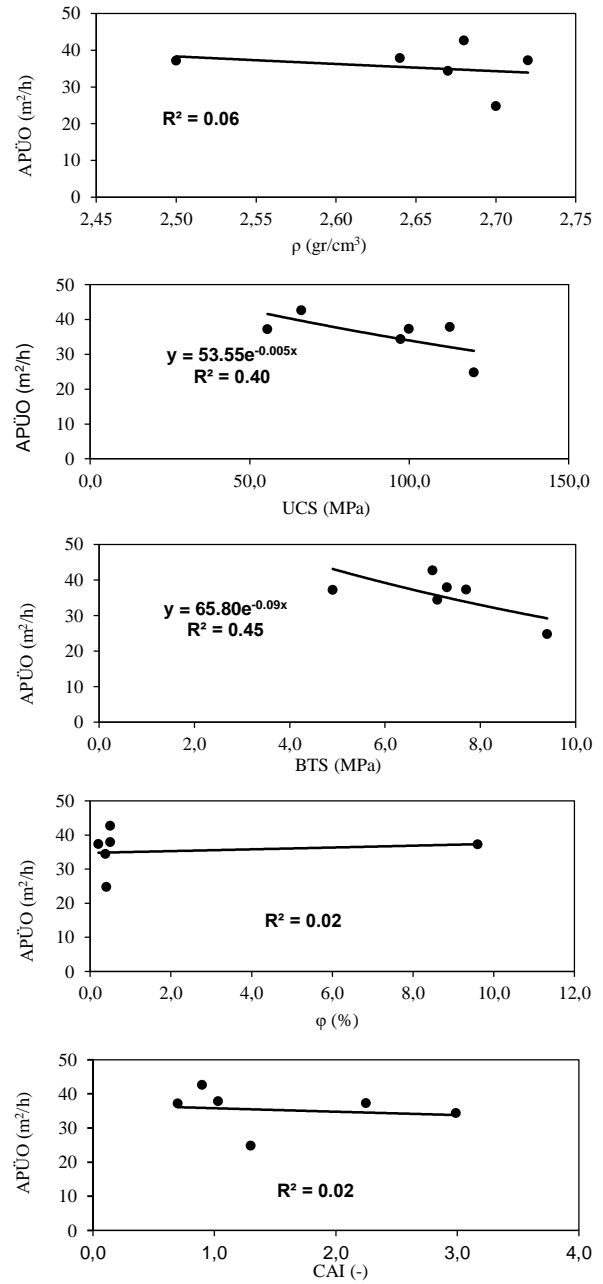
4.2 Katrak makinesi

Fabrikada üretilen plakaların kalınlıkları 2-3 cm, enleri 43-280 cm ve boyları 63-275 cm aralıklarında değişmiştir. Bu makinelerde de performans parametresi olarak bir saatteki alansal plaka üretim oranının (m^2/h) belirlenmesi dikkate alınmıştır. Kesim hızları vagona koyulan bloğun boyuna ve doğal taşın kırıklı-çatlaklı yapısına göre değişiklik gösterebilir. Katrak kesim hızları üç bölüm içerisinde incelenir bunun sebebi ise makine bloğa giriş ve çıkış süreçlerinde hızını kısıtlayarak bloğun kırılmasını ve çatlamasını önlemektir. Tablo 6'da her bir doğal taş ait blok

ve plaka ebatları, üretilen plaka sayıları, toplam plaka alanı ve ortalama alansal üretim oranları verilmiştir.

4.2.1 Basit regresyon yöntemine dayalı modeller

Doğal taşların fiziksel-mekanik özellikleri ile katrak makinelerinin performans arasındaki ilişkiler Şekil 5'te verilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki belirleme (determinasyon) katsayısına (R^2) göre değerlendirmiştir. Görüldüğü gibi, katrak makinelerinin APÜO ile yoğunluk, porozite ve Cerchar aşındırıcılık indeksi arasında çok zayıf ilişki elde edilmiştir. Ayrıca, APÜO ile tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı (endirekt) çekme dayanımı arasında da zayıf ilişkiler belirlenmiştir.



Şekil 5. Doğal taşların fiziksel-mekanik özellikleri ile katrak makinelerinin alansal plaka üretim oranı arasındaki ilişkiler.

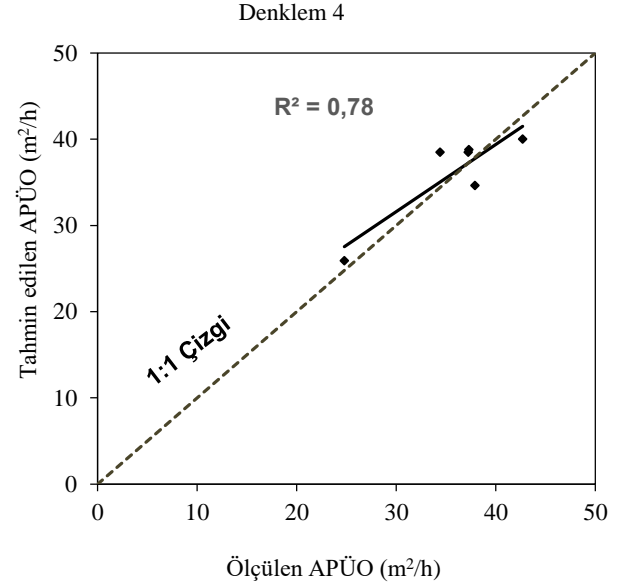
4.2.2 Çoklu regresyon yöntemine dayalı modeller

Basit regresyondan elde edilen çok zayıf / zayıf ilişkileri güçlendirmek için çoklu regresyon yöntemi kullanarak katarak makinelerinin performansını tahmin etmek için bir model elde edilmiştir. Önerilen bu model **Denklem 4**'te verilmiştir. Bu denklemde verilen R^2 değeri düzeltilmiş belirleme katsayısı değerini göstermektedir.

$$AP\ddot{U}O = 85.1\rho - 6.58BTS - 142 \quad R^2 = 0.64 \quad (4)$$

Burada, AP \ddot{U} O alansal plaka üretim oranı (m^2/h), ρ yoğunluk (g/cm^3) ve BTS dolaylı (endirekt) çekme dayanımı (MPa) parametrelerin göstermektedir.

Elde edilen bu denklemin istatistiksel analiz sonuçları **Tablo 7**'de özetlenmiştir. 4.1.2 bölümünde anlatılan yöntemler burada da uygulanmıştır. Ayrıca, bu denklem için ölçülen ve tahmin edilen değerlerinin dağılım grafiği **Şekil 6**'da sunulmaktadır. Görülüşü gibi, bu önerilen model, S/T makineler için önerilen modellerden daha düşük belirleme katsayısına sahiptir. Ancak, önerilen bu modelde 1:1 çizgisinde az bir sapma ve dağılım gözükmemektedir ve böylece bu modelin tahmin yeteneği ve güvenilirliği güçlü olarak değerlendirilebilir.



Şekil 6. Ölçülen ve tahmin edilen katarak makinelerinin alansal plaka üretim oranı parametresinin dağılım grafiği.

Tablo 5. S/T makinelerinin performans tahmini için çoklu regresyon yöntemi ile önerilen modellerin istatistiksel sonuçları

Denklem No.	Ön gösterge	Tahmini t-değeri	Tablo t-değeri	p değeri	VIF	R^2 (%)	Düzeltilmiş R^2 (%)	Tahmini F	Tablo F-değeri
1	Sabit	-3.07		0.055	-				
	ρ	3.85	2.01	0.031	3.42	91.6	86.0	16.40	5.46
	BTS	-5.53		0.012	3.42				
2	Sabit	6.87		0.006	-				
	UCS	-3.95	2.01	0.029	1.16	86.1	76.8	9.26	5.46
	CAI	3.06		0.055	1.16				
3	Sabit	5.59		0.011	-				
	BTS	-3.53	2.01	0.039	1.07	83.3	72.1	7.47	5.46
	CAI	2.44		0.093	1.07				

Tablo 6. Doğal taşların kesiminde kullanılan katarak makinelerinin performans analizi

	Blok ölçüsü ($cm \times cm \times cm$)	Plaka boyutu ($cm \times cm \times cm$)	Üretilen plaka sayısı	Üretilen toplam plaka alanı (m^2)	Alansal üretim oranı (m^2/h)
Muğla Beyaz	155×275×114	2×110×275	54	163.35	34.40
Patara Bej	158×255×160	2×160×255	79	322.32	37.90
Denizli Traverten	165×250×162.5	3×250×162.5	55	223.43	37.24
Korkuteli Bej	120×223×161	2×160×220	60	211.20	24.80
Muğla Şeker	185×280×175	3×280×175	61	289.90	42.70
Muğla Gümüş	172×260×181	3×260×181	57	268.24	37.30

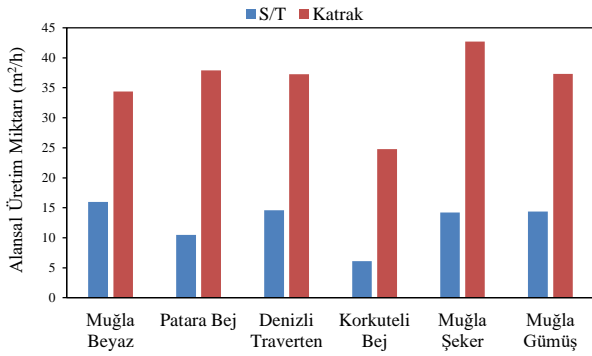
Tablo 7. Katarak makinelerinin performans tahmini için çoklu regresyon yöntemi ile önerilen modelin istatistiksel sonuçları

Denklem No.	Ön gösterge	Tahmini t-değeri	Tablo t-değeri	p değeri	VIF	R^2 (%)	Düzeltilmiş R^2 (%)	Tahmini F	Tablo F-değeri
4	Sabit	-1.62		0.205	-				
	ρ	2.25	1.30	0.110	3.42	78.1	63.6	5.36	2.28
	BTS	-3.18		0.050	3.42				

5 Bulgular ve tartışma

Daire testereli blok kesme makineleri (S/T) ve katrik blok kesme makinelerinin kesme performansları (alansal plaka üretim oranı) birçok malzeme ve işletme parametreleri ile ilişkilendirilebilir. Bu parametreler kısaca doğal taşın cinsi, testerenin çevresel uzunluğu, testerenin dönüş hızı, makinenin gücü, ilerleme hızı, soğutma için kullanılan suyun yeterliliği ve operatörün tecrübesi olarak tanımlanabilir. Bu çalışma kapsamında doğal taş fabrikalarındaki S/T ve katrik makinelerinin kesim performansları incelenmiştir. Şekil 7’de bu incelemenin sonuçları özetlenmiştir. Yapılan incelemelere dayanarak katrik blok kesme makinelerinin, S/T blok kesme makinelerine göre 3.91 kat yüksek alansal plaka üretim oranlarının olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmada dikkat edilmesi gereken önemli konu; önerilen modellerde kullanılan doğal taş sayısıdır. Şüphesiz modelleme çalışmalarında doğal taş sayısının fazla olması önerilen modellerin daha genel ve güvenilir olmalarında büyük katkılar sağlamaktadır. Ancak, bildiği gibi sahalardan örnekler elde etmek zor ve zaman alıcı bir süreçtir işti; ayrıca laboratuvarında, alınan örnekler üzerinde deneylerin yapılması da zaman alıcı ve kaliteli insan gücüne ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, yedi farklı metamorfik ve sedimanter doğal taş örneğinde S/T ve katrik makinesinin kesme performansını tahmin etmek için modeller önerilmiştir. Ayrıca, giriş bölümünde belirtildiği gibi araştırmacılar çeşitli esnek hesaplama (soft computing) yöntemlerini kullanarak kesme işlemi yapan makinelerinin performansını tahmin etmek için modeller geliştirmişlerdir. Bu modeller gittikçe birçok araştırmacı tarafından performans tahmin modellerinin geliştirilmesine kullanılmaktadır, ancak bu çalışmada veri sayısının az olduğu düşünüldüğü için bu yöntemler uygulanmamıştır.



Şekil 7. S/T ve katrik makinelerinin alansal plaka üretim oranlarının karşılaştırması

Doğal taşların Cerchar aşındırıcılık indeks değerleri ile S/T ve katrik makinelerinin performansı arasında çok zayıf bir ilişki bulunmuştur. Ancak Tumaç [11] çalışmasında CAI ile S/T performansı arasında anlamlı ilişkiler olduğunu belirtmiştir. S/T ve katrik makinelerinin performansı ve doğal taşların dolaylı (endirekt) çekme dayanımı arasında ise orta derecede güçlü ilişkiler elde edilmiştir. Bu bulgu Fener vd. [9] ve Tumaç [11] bulgularıyla örtüşmektedir. Her iki

çalışmada karbonatlı kayalarda yapılan incelemeler sonucunda S/T makinelerinin performansı ile dolaylı çekme dayanımı parametresi arasında güçlü ilişkiler elde etmişlerdir. Ancak Çevim [12] ve Tumaç ve Tolouei [21] çalışmalarında bu iki parametre arasında zayıf ilişkiler belirlemişlerdir. Çoklu regresyon yöntemi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, doğal taşların dolaylı (endirekt) çekme dayanımı, yoğunluk ve Cerchar aşındırıcılık indeks değerleri birlikte girdi parametresi olarak kullanıldığı zaman S/T makinelerinin performansını tahmin etmek için önerilen modellerin daha güçlü ilişkiler sunduğu gösterilmiştir (dolaylı çekme dayanımı ve yoğunluk $R^2=0.86$; dolaylı çekme dayanımı ve Cerchar aşındırıcılık indeks $R^2=0.72$). Doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı değeri birçok araştırmacı tarafından işletmelerde kullanılan makinelerinin performansını değerlendirmek için tercih edilen parametredir. Bu çalışmada basit regresyon yöntemi dikkate alındığında, S/T ve katrik makinelerinin performansı ile doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı değerleri arasında zayıf ilişkiler elde edilmiştir. Bu bulgu Çevim [12], Tumaç ve Tolouei [21] bulgularıyla örtüşmemektedir. Belirtilen bu iki çalışmada araştırmacılar S/T performansı ile doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı değerleri arasında güçlü ilişkiler elde etmişlerdir. Ancak bu çalışmada S/T makinelerinde tek eksenli basınç dayanımı parametresi Cerchar aşındırıcılık indeks değerleri ile birlikte çoklu regresyona girdi değeri olarak kullanıldığı zaman güçlü ilişkiler elde etmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Tablo 8’de bu çalışmadaki doğal taşların özelliklerini kullanarak literatürde S/T makinelerinin performans tahmini için önerilen modellerin validasyon sonuçları özetlenmiştir.

Tablo 8. Literatürdeki S/T makinelerinin performans tahmini için önerilen modellerin validasyon sonuçları

Doğal taş	APÜO ₀ (m ² /h)	APÜO _T (m ² /h) ¹	APÜO _T (m ² /h) ²	APÜO _T (m ² /h) ³
Muğla Beyaz	16.0	8.1	7.5	8.4
Patara Bej	10.5	4.3	6.9	7.8
Denizli Traverten	14.6	18.4	13.2	11.0
Korkuteli Bej	6.1	2.5	1.5	7.6
Muğla Şeker	14.2	15.7	7.7	10.1
Muğla Gümüş	14.4	7.5	5.9	8.3
Doğal taş	APÜO _T (m ² /h) ⁴	APÜO _T (m ² /h) ⁵	APÜO _T (m ² /h) ⁶	
Muğla Beyaz	9.8	12.0	9.0	
Patara Bej	8.3	15.4	8.7	
Denizli Traverten	18.5	23.4	12.1	
Korkuteli Bej	7.8	13.7	8.5	
Muğla Şeker	15.2	21.5	13.3	
Muğla Gümüş	9.6	13.7	8.8	

APÜO₀: ölçülen alansal plaka üretim oranı, APÜO_T: tahmin edilen alansal plaka üretim oranı.

¹ Tumaç [11]’de denklem 7 kullanmıştır.

² Tumaç [11]’de denklem 8 kullanmıştır.

³ Çevim [12]’de denklem 7.1 kullanmıştır.

⁴ Tumaç ve Tolouei [21]’de UCS ile APÜO arasındaki ilişki kullanılmıştır.

⁵ Tumaç ve Tolouei [21]’de denklem 1 kullanılmıştır.

⁶ Tumaç ve Shaterpour-Mamaghani [22]’deki metamorfik ve sedimanter doğal taşlar için önerilen UCS ile APÜO arasındaki ilişkiler kullanılmıştır.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada bir doğal taş işletmesinde kullanılan S/T ve katrik makinelerinin performansını tahmin etmek için bazı ampirik modeller önerilmiştir. Sedimanter ve metamorfik kökenli doğal taşların bazı önemli fiziksel-mekanik parametreleri laboratuvarında belirlenmiştir; daha sonra bu özelliklerle S/T ve katrik makinelerinin alansal plaka üretim oranı arasındaki ilişkiler irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Doğal taşların tek eksenli basınç dayanımları 55.5 ve 120.3 MPa arasında, dolaylı çekme dayanımları ise 4.9-9.4 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Ayrıca, örneklerin Cerchar aşındırıcılık indeks değerleri 0.70 ve 2.99 arasında değişiklik göstermiştir.
- S/T ve katrik makinelerde alansal plaka üretim oranı sırasıyla 6.1-16.0 m²/h ve 24.8-42.7 m²/h arasında değişmiştir.
- S/T makinelerin kesme performansını tahmin etmek için doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve Cerchar aşındırıcılık indeks özellikleri kullanılabilirliği saptanmıştır.
- Katrik makinelerinde alansal plaka üretim oranını tahmin etmek için önerilen modelde doğal taşların dolaylı çekme dayanımı ve yoğunluk özellikleri girdi parametresi olarak belirlenmiştir.

S/T ve katrik makinelerin kesim performansında, doğal taşların fiziksel-mekanik özellikleri dışında makine tipi, kullanılan testere, motor gücü gibi diğer özellikler de etkili olmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda bu özelliklerin incelenmesi de faydalı olacaktır. Ayrıca, bu çalışma farklı fiziksel-mekanik özelliklere sahip doğal taşlar için de incelenmelidir. Önerilen modellerin güvenilirliğini arttırmak için veri sayılarının artırılması büyük önem taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma birinci yazar Yunus Emre Satı'nın yüksek lisans bitirme tezinin bir bölümünü kapsamaktadır. Yazarlar, fabrika çalışmalarında numune temininde ve performans ölçümlerinde yardımını esirgemeyen İlker Kömürçüoğlu'na teşekkürlerini sunmaktalar.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] Y.E. Satı, Doğal taş fabrikalarında kullanılan S/T ve katrik makinelerinin performans analizi. Bitirme ödevi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2020.
- [2] Y. Güngör, Mermer plaka kesimi-2. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Makine teknolojisi modülü, Ankara, 2011.
- [3] R.G. Norling, Mechanical properties and the composition of some Swedish natural stone types and their effect on cutting results. In: Presentation at the conference on diamond in the construction and stone industry, Germany, 1971.
- [4] R.B. Burgess, J. Birle, Circular sawing granite with diamond saw blades. Proceedings of the fifth industrial diamond seminar, 3-10, 1978.
- [5] A. Ceylanoglu, K. Gorgulu. The performance measurement results of stone cutting machines and their relations with some material properties. Sixth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Ostrava, Czech Republic, 393-398, 1997.
- [6] S. Kahraman, M. Fener, O. Gunaydin, Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(7), 1123-1131, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.04.009>.
- [7] O. Gunaydin, S. Kahraman, M. Fener, Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 104 (4): 239-243, 2004.
- [8] R.P. Ribeiro, A.B. Paraguassu, J.E. Rodrigues, Sawing of blocks of siliceous dimension stone: influence of texture and mineralogy. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 101-7, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0049-y>.
- [9] M. Fener, S. Kahraman, M.O. Ozer, Performance prediction of circular diamond saws from mechanical rock properties in cutting carbonate rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 40 (5), 505-517, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00603-006-0110-y>.
- [10] A. Güney, Performance prediction of large-diameter circular saws based on surface hardness tests for Mugla (Turkey) marbles. Rock Mechanics and Rock Engineering, 44(3), 357-366, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00603-010-0119-0>.
- [11] D. Tumaç, Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 75, 159-168, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.01.015>.
- [12] K.C. Çevim, Doğal taş fabrikalarında kullanılan dairesel testere blok kesme (S/T) makineleri için performans tahmin modelinin geliştirilmesi. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2016.
- [13] S. Kahraman, U. Ulker, M.S. Delibalta, A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 107, 427-430, 2007.
- [14] P.F. Neves, M.C.E. Silva, G. Paneiro, M. Frazão, Prediction of slab production with multiblade gang saw. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2, 681-686, 2016.
- [15] A. Dormishi, M. Ataei, R. Khalokakaei, R. Mikaeil, Energy consumption prediction of gang saws from rock properties in carbonate rocks cutting process. International Journal of Mining and Mineral

- Engineering, 9 (3), 216-227, 2018. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2018.096115>.
- [16] A. Dormishi, M. Ataei, R. Mikaeil, R. Khalokakaei, S. Shaffiee Haghshenas, Evaluation of gang saws' performance in the carbonate rock cutting process using feasibility of intelligent approaches. *Engineering Science and Technology*, 22, 990-1000, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.007>.
- [17] S. Shaffiee Haghshenas, R. Shirani Faradonbeh, R. Mikaeil, S. Shaffiee Haghshenas, A. Taheri, A. Saghatforoush, A. Dormishi, A new conventional criterion for the performance evaluation of gang saw machines. *Measurement*, 146, 159-170, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.06.031>.
- [18] ISRM, The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. International Society of Rock Mechanics (ISRM), London: Pergamon Press, 1981.
- [19] ASTM D7625-10, Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. American Society for Testing and Materials, 2010.
- [20] Minitab 16 Statistical Software. (Licensed by Istanbul Technical University, Türkiye).
- [21] D. Tumaç, S. Tolouei, Mermer fabrikalarında kullanılan büyük çaplı dairesel testerelerin (S/T) performans analizi. *Politeknik Dergisi*, 20 (3), 651-662, 2017.
- [22] D. Tumaç, A. Shaterpour-Mamaghani, Estimating the sawability of large diameter circular saws based on classification of natural stone types according to the geological origin. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 101, 18-32, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.014>.

