



BETON DAYANIMI TAHMİNİNDE İKİLİ VE ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Nevbahar EKİN^{1*}

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Beton Dayanım, Ultrasonik, Özdirenç, İkili Doğrusal Regresyon, Çoklu Doğrusal Regresyon.</i>	Bu çalışma tahribatsız yöntemler kullanarak Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) analizi ile düşük-orta dayanımlı donatılı betonların basınç dayanımını tahmin etmeyi amaçlamıştır. Tahribatsız olarak ultrasonik ve özdirenç yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden elde edilen donatılı betonun ultrasonik P ve S dalga hızları ve görünür özdirenç değerlerinden yararlanılmıştır. Ayrıca donatılı betonun kür süresi, donatı çapı, beton numunelerin ağırlık ve yoğunluk değerleri de kullanılmıştır. Tüm bu parametreler ile betonun tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) arasında ayrı ayrı ilişkiler elde edilmiştir. Ayrıca ÇDR analizi ile oluşturulan matematiksel model yardımıyla bağımlı değişken TEBD tahmin edilmeye çalışılmıştır. TEBD tahmininde hangi bağımsız değişkenin önemli ve etkili olduğunu gösteren anlamlılık (önem) düzeyleri de belirlenmiştir. Anlamlılık düzeylerine göre donatı çapı, ağırlık ve yoğunluk parametrelerinin eşik değer olan 0.05 değerinden büyük olması nedeni ile anlamlı parametreler olmadığı anlaşılmıştır. Buna karşın kür süresi, ultrasonik P ve S dalga hızları ve görünür özdirenç parametreleri anlamlı bulunmuştur. ÇDR analizinden anlamlı bulunan parametrelerden elde edilen TEBD değerleri ve İkili Doğrusal Regresyon (İDR) ile belirlenen TEBD değerleri karşılaştırılarak hata oranları ortaya konulmuştur.

COMPARISON OF BINARY AND MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS IN CONCRETE STRENGTH PREDICTION

Keywords	Abstract
<i>Concrete Strength, Ultrasonic, Resistivity, Binary Linear Regression, Multiple Linear Regression.</i>	This study aims to estimate the compressive strength of low-medium strength reinforced concretes using non-destructive methods with Multiple Linear Regression (MLR) analysis. Ultrasonic and resistivity methods were utilized as non-destructive methods. Ultrasonic P and S wave velocities and apparent resistivity values of reinforced concrete obtained from these methods were used. In addition, the curing time of reinforced concrete, reinforcement diameter, weight, and density values of concrete samples were used. Separate relationships were obtained between all these parameters and the uniaxial compressive strength (UCS) of the concrete. In addition, the dependent variable UCS was tried to be estimated with the help of the mathematical model created with the MLR analysis. Significance levels showing which independent variables are important and effective in UCS estimation were also determined. According to the significance levels, it was understood that the reinforcement diameter, weight, and density parameters were not significant parameters because they were greater than the threshold value of 0.05. On the other hand, curing time, ultrasonic P and S wave velocities, and apparent resistivity parameters were found to be significant. The error rates were revealed by comparing the UCS values obtained from the parameters found to be significant in the MLR analysis and the UCS values determined by binary linear regressions (BLR).

Alıntı / Cite

Ekin, N., (2025). Beton Dayanımı Tahmininde İkili ve Çoklu Doğrusal Regresyon Analizlerinin Karşılaştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 64-77.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process								
N. Ekin, 0000-0003-4959-8077	<table><tr><td>Başvuru Tarihi / Submission Date</td><td>23.10.2024</td></tr><tr><td>Revizyon Tarihi / Revision Date</td><td>21.11.2024</td></tr><tr><td>Kabul Tarihi / Accepted Date</td><td>27.11.2024</td></tr><tr><td>Yayın Tarihi / Published Date</td><td>20.03.2025</td></tr></table>	Başvuru Tarihi / Submission Date	23.10.2024	Revizyon Tarihi / Revision Date	21.11.2024	Kabul Tarihi / Accepted Date	27.11.2024	Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025
Başvuru Tarihi / Submission Date	23.10.2024								
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.11.2024								
Kabul Tarihi / Accepted Date	27.11.2024								
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025								

* İlgili yazar / Corresponding author: nevbaharsabbag@sdu.edu.tr, +90-246-211-1353

COMPARISON OF BINARY AND MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS IN CONCRETE STRENGTH PREDICTION

Nevbahar EKİN^{1†}

¹Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geophysical Engineering, Isparta, Türkiye.

Highlights

- Non-destructive methods estimate concrete compressive strength.
- Different parameters can be used to predict the concrete compressive strength.
- Binary and multiple linear regression analyses estimate concrete strength.
- Concrete strength is predicted from multiple linear regression analysis with high accuracy.

Purpose and Scope

This study was carried out to estimate the compressive strength values of low-medium strength concretes using parameters determined from non-destructive methods. The BLR and MLR analysis are used for this prediction. It is aimed to determine the concrete strength with high accuracy.

Design/methodology/approach

The P and S wave velocities and resistivity values obtained using the ultrasonic and resistivity methods were non-destructively used to estimate the concrete strength. In addition to P and S-wave velocity and resistivity parameters, the curing time of the reinforced concrete, the diameter of the reinforcement, and the weight and density values of the concrete samples were also considered to predict the concrete strength. The BLR and MLR analysis were used to determine the relationships between all these parameters and the uniaxial concrete compressive strength (UCS).

Findings

Binary and multiple analyses were performed using the parameters obtained from non-destructive methods and the physical parameters of the concrete. As a result of binary analyses, the correlation coefficients were low, and the error rates were high. However, the MLR analysis distinguished the parameters according to their significance levels. According to the significance levels of MLR analysis, it was understood that the reinforcement diameter, weight, and density parameters were not significant parameters because they were greater than the threshold value of 0.05. On the other hand, the curing time, ultrasonic P and S wave velocities, and apparent resistivity parameters were found to be significant. Therefore, UCS values were estimated by using the significant parameters in MLR analysis with high accuracy.

Originality

The most important innovation in this study is that it enables the estimation of UCS values from the MLR analysis by using ultrasonic P and S wave velocities and resistivity parameters together. In addition, different physical properties of the concrete are interpreted from the parameters used in MLR analysis. Therefore, an approach with a high correlation coefficient was made to the strength values determined by the destructive method by using non-destructive methods.

[†] Corresponding author: nevbaharsabbag@sdu.edu.tr, +90-246-211-1353

1. Giriş (Introduction)

Kompozit bir yapı olan beton malzemesinin dayanımı aranılan en önemli özelliğidir. Beton basınç dayanımı TEBD testi gibi tahribatlı yöntemler kullanılarak doğrudan belirlenebildiği gibi tahribatsız (hasarsız) yöntemler vasıtasıyla da dolaylı olarak belirlemek mümkündür (Uyanık, 2012; Uyanık ve Tezcan, 2012; Uyanık vd., 2012a; 2012b; 2012c; 2013; Uyanık, 2014; Jedidi, 2020; Yörübulut vd., 2020; Ekin, (2021a; 2021b); Ekin ve Uyanık, (2021a; 2021b); Arora vd., 2024; Singh vd., 2024). Günümüzde, hızlı, etkin, güvenilir ve daha az maliyetli tahribatsız deneyler ile elde edilen parametreler kullanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda beton dayanımına yaklaşım yapılması oldukça tercih edilen bir yöntem haline almıştır (Jain vd., 2013; Pucinotti, 2015; Amini vd., 2016; Bhosale ve Salunkhe, 2016; Rashid ve Waqas, 2017; Sabbağ ve Uyanık, (2017; 2018a)). Bu durumun en önemli nedeni, beton dayanımı belirlenirken tahribatlı bir şekilde yapıdan karot numunesi alınması esnasında yapı elemanlarında hem kesit hem de taşıma kapasitesi kayıplarına sebep olunmasıdır (Yörübulut vd., 2020).

Yerinde veya laboratuvarında ultrasonik yöntem gibi tahribatsız yöntemler kullanılarak beton dayanımına yaklaşım yapmak ve karot sayısını azaltmak amaçlanmalıdır (Öziçer ve Uyanık, 2017). Ayrıca, elektrik yöntemi kullanılarak belirlenen görünür öz direnç parametresi ile hem betonun dayanımı hem de nem içeriği, korozyon durumu gibi betona ait diğer birçok özelliğin belirlenmesi sağlanabilir (Wei vd., 2012; Sabbağ ve Uyanık, (2018a; 2018b)). Bu yöntemlerin ayrı ayrı kullanılmasının yanı sıra bir arada kullanılması da mümkündür ve bu durum elde edilen verilerin değerlendirilmesinde ve yorumlanmasında oldukça yararlı olmaktadır. Zira bir yöntemden elde edilen parametre beton içerisindeki özelliklerden bazılarında daha az etkilenirken, diğer bir yöntem bu durumdan çok daha fazla etkilenebilmektedir. Örneğin yerinde veya laboratuvarında yapılan ölçümlerde kür koşullarının dolayısıyla beton içerisindeki gözeneklerin sıvı veya hava dolgulu olmasının yanı sıra gözeneklerin miktarı, boyutu ve uzanım yönleri de dayanım üzerinde etkili olabilmektedir. Bu etki ultrasonik yöntemde daha az iken öz direnç yönteminde çok daha fazla olmaktadır (Sabbağ ve Uyanık, (2017; 2018a; 2020); Ekin, (2021a; 2021b); Ekin ve Uyanık, (2021a; 2021b)). Buna karşın ultrasonik yöntemde P dalgalarının yanı sıra S dalgalarının da belirlenmesi betonun elastik modüllerinin (elastisite modülü, kayma modülü ve bulk modülü) yanı sıra Poisson oranı, sismik hız oranı, beton içeriğinin kırıklı ya da çatlaklı olup olmadığı gibi durumların da ortaya konulmasını sağlayabilecektir (Uyanık ve Tezcan, 2012; Uyanık vd., 2012a; Sabbağ ve Uyanık, 2017). Cu ve Chen (2016) karbon fiber takviyeli iletken betonda iletkenlik ve hasar derecesi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu kapsamda öz direnç (iletkenliğin tersi) ve ultrasonik yöntemlerden yararlanmışlardır. Azarsa ve Gupta (2017) öz direnç ile betonun belirli dayanıklılık özellikleri arasındaki ilişkiyi tartışmışlardır. Böylece, dış ortam (örneğin sıcaklık) ve beton karışımı gibi çeşitli etki eden parametrelerin öz direnç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öziçer ve Uyanık (2017) yerinde beton dayanımını belirlemek amacıyla İzmir’de mevcut binalar üzerinde yaptıkları çalışmada P dalga hızı ile TEBD arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Sabbağ ve Uyanık (2017) düşük orta ve yüksek dayanımlı donatılı ve donatısız betonların P ve S dalga hızlarından beton dayanımını tahmin etmiştir. Amini vd. (2018), geçirgen betonun basınç dayanımını analiz etmek için istatistiksel modelleme yaklaşımını kullanmışlardır. Bu yaklaşım, analizde kritik parametreler olarak ultrasonik P dalga hızı ve boşluk oranı ölçümlerinin kullanımını kapsamaktadır. Sabbağ ve Uyanık (2018a) donatılı betonlarda öz direnç yönteminden beton dayanımının belirlenmesi esnasında kür koşullarının önemini ortaya koymuşlardır. Sertçelik vd. (2018) farklı beton türleri üzerinde yaptıkları çalışmada ultrasonik P dalga hızı, öz direnç, yüklenebilirlik ve TEBD arasında bir ilişki bulmaya çalışmışlardır. Sathiparan vd. (2024) geçirgen betonun özelliklerini tahmin etmek için ultrasonik P dalga hızı ve öz direnç yöntemini birlikte kullanarak elde ettiği parametreleri makine öğrenmesi tekniği ile değerlendirmişlerdir. Bu hedefte düşündüğümüzde beton dayanımına yaklaşım yapmak amacı ile birçok yöntemden elde edilen parametreler ile ampirik ilişkiler elde edilmektedir (Wei vd., 2012; Jain vd., 2013; Rashid ve Waqas, 2017; Sabbağ ve Uyanık, (2017; 2018a); Kouddane vd., 2024). Bu ilişkilere ek olarak mühendislik yapılarının analizi başta olmak üzere birçok alanda ÇDR analizi uygulanmaktadır. Çeşitli bağımsız değişkenlere dayalı olarak beton mukavemetini tahmin etmek için ÇDR kullanılmaktadır. Beton mukavemet tahmini bağlamında bu bağımsız değişkenler, kullanılan çimento türü, su-çimento oranı, agrega türü ve boyutu, kür süresi vb. gibi faktörleri içerebilir (Kalaycı, 2008; Subaşı vd., 2008; Durmuş ve Can, 2009; Başıyigit vd., 2012; Sabbağ ve Uyanık, 2017; Çakır vd., 2023).

Bu çalışmada bağımlı değişken olarak TEBD; bağımsız değişkenler olarak ise Ultrasonik boyuna (P) ve enine (S) hız değerleri, öz direnç (R), ölçüm zamanı (T), donatı çapı (D), ağırlık (A) ve yoğunluk (Y) kullanılarak ÇDR analizi ile düşük-orta dayanımlı donatılı betonların basınç dayanımı tahmin edilmeye çalışılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre ÇDR analizi yardımıyla anlamlı bulunan bütün parametreler bir arada kullanılarak beton basınç dayanımı İDR analizlerinden çok daha yüksek bir ilişki katsayısıyla elde edilebilmiştir (R^2 : 0.915).

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Farklı amaçlar için farklı mekanik özelliklere (basınç dayanım, çekme dayanımı, elastisite modülü, sünme, büzülme, termal genleşme, yangın dayanımı vs.) sahip olarak tasarlanabilen beton malzemesi agrega ve çimentonun, su ve gerektiğinde yardımcı kimyasal katkı maddeleri ile birleşmesinden oluşmaktadır. Beton günümüzde yapıların inşasında en çok kullanılan malzeme haline gelmiştir (Jedidi, 2020). Donatılı beton ise, beton ve içerisine yerleştirilmiş olan çelik (çubuklar veya ağ) gibi güçlendirici malzemelerden yapılmış bir kompozit materyaldir (Sabbag, 2016; Sabbag ve Uyanık, (2016; 2017; 2018a)). Donatılı betonların dayanım ve esneklik gibi mekanik özellikleri, hazırlanan karışım tasarımı, kür koşulları ve donatının türü, çapı ve miktarı gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenebilmektedir.

Çalışma kapsamında, 150 mm³ boyutundaki küp şeklindeki beton numuneler TS EN 12390-2 (2019) standardına göre hazırlanmıştır. Daha sonra, her bir beton numunesinde bir adet çapları 10 mm, 14 mm veya 20 mm ve boyu 250 mm olan donatı demiri tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilerek 3 adet düşük-orta dayanımlı (B1: 4-10 MPa, B2: 15-20 MPa ve B3: 25-35 MPa) beton tasarımına ait donatılı numuneler hazırlanmıştır. Toplam 74 adet numunenin yarısı su küründe (laboratuvarda 20±2°C'deki kür havuzlarında) ve yarısı da hava küründe (ortalama sıcaklığın 20° ve nemin %50 civarında olduğu çevre koşullarında) bekletilerek 7., 28. ve 90. günlerde üzerlerinde tahribatsız ve tahribatlı ölçümler yapılmıştır. Ölçü alım günlerinde numunelerin ağırlıkları ve yoğunlukları belirlenmiştir. Ardından tahribatsız bir şekilde özdirenç cihazları ile donatılı betonların özdirençleri belirlenmiş ve ultrasonik cihaz ile de P ve S dalga ölçümleri yapılarak dalga hızları hesaplanmıştır. Tahribatsız ölçümlerden sonra da TEBD ölçümleri yapılmıştır.

2.1. Tek Eksenli Basınç Dayanım (TEBD) Testi

Tek eksenli basınç dayanım testinde beton numunelerin uygulanan basınca karşı göstermiş olduğu direnç belirlenmektedir (Uyanık, 2014). Tek eksenli basınç testinde cihazın plakaları arasına yerleştirilen beton numuneler sıkıştırılarak kırılma anında uygulanan yük belirlenmekte ve yük/alan oranından dayanım değeri hesaplanmaktadır (Sabbag ve Uyanık, (2016; 2017; 2018a); Uyanık vd., 2019; Ekin, 2021; Singh vd., 2024). Bu test betonun basınç dayanımı kalitesinin ortaya konulmasını sağlayan en önemli parametredir. Basınç dayanımı, betonun yapım aşamasındaki yerleşme, sıkıştırma, kürlenme gibi koşullardan etkilendiği gibi kullanılan agrega malzemesinin özellikleri, su/çimento oranı, kür koşulları, donatı içeriği, tek eksenli basınç dayanım testinin yükleme hızı gibi birçok parametreden de etkilenebilmektedir (Jedidi, 2020). Mevcut yapılarda elde edilen basınç dayanımı ile laboratuvar ortamında hazırlanan betonların basınç dayanımları da bu sebeplerle birbirinden farklı çıkabilmektedir. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testi (TEBD)'nden tahribatlı bir şekilde belirlenen basınç dayanımlarına tahribatsız yöntemlerle yaklaşımlar yapılarak alınacak karot sayılarının en aza indirgenmesi hedeflenmektedir (Öziçer ve Uyanık, 2017). Çalışma kapsamında hazırlanan donatılı numunelerin dayanımları TS EN 12390-3, (2019)'te belirtilen esaslara uygun olarak belirlenirken donatı bulunan yüzey yana gelecek şekilde kırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece cihaza zarar verilmesinin de önüne geçilebilmiştir.

2.2. Ultrasonik Yöntem

Malzeme içerisinden geçen ultrasonik dalganın geçiş süresinin ölçülmesi esasına dayanan bu yöntemde, dalganın geçiş mesafesinin ölçülen geçiş süresine oranı ultrasonik hızları vermektedir (Uyanık, (1999; 2012); Kouddane vd., 2022; Babacan vd., 2023). Boyuna veya birincil ultrasonik dalgası olarak bilinen P dalgası katı, sıvı ve gaz şeklindeki bütün ortamlarda yayılabilmektedir. Buna karşın, enine veya ikincil ultrasonik dalgası olarak bilinen S dalgası sadece katı ortamlarda yayılabilmekte, sıvı ve gaz gibi ortamlarda rijiditesi sıfır olduğu için yayılamamaktadır (Sabbag ve Uyanık, (2016; 2017)).

Donatılı beton bağlamında, uygulanan doğal veya yapay bir yük altında bulunan malzemenin yapısal bütünlüğünü ve davranışını değerlendirmek amacıyla ultrasonik hızlar önemli birer parametredir. Ultrasonik P ve S dalga hızları bir arada kullanılarak elastik modüller de bazı ampirik bağıntılardan hesaplanabilmektedir (Uyanık ve Tezcan, 2012; Uyanık vd., 2012a; Sabbag ve Uyanık, 2017). Yapılan çalışmada, küp şeklindeki donatılı numunelerde donatı demiri üst yüzeye gelecek şekilde karşılıklı iki yan yüzeyden OYO marka Sonic Viewer-SX ultrasonik cihaz ile P ve S dalgalarının seyahat süreleri ölçülmüştür. Küp şeklindeki numunelerin boyutu 15 cm³ tür. Buna göre, numune boyu-dalganın seyahat süresine oranlanarak ultrasonik hızlar hesaplanabilmıştır.

2.3. Özdirenç Yöntemi

Özdirenç, bir maddenin elektriksel akımın akışına direnme özelliğidir (Yoon ve Park, 2001). Beton üzerinde ölçü alınmasına olanak sağlayan bir portatif özdirenç cihazı (Proseq Resipod marka beton direnç ölçer) yardımıyla yapılan ölçümlerde 4 nokta elektrod sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde dışarıdaki iki elektrod vasıtasıyla uygulanan

akımın içerideki iki elektrod arasında oluşturduğu potansiyel ölçülerek bir bağıntı yardımıyla özdirenç değerleri hesaplanabilmektedir (Kim vd., 2011; Sabbağ, (2016; 2018a; 2018b)). Küp şeklindeki donatılı beton numuneleri üzerinde donatı çubuğu yan yüzeye gelecek şekilde bu ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Beton içindeki çelik donatının korozyon potansiyelini değerlendirmek amacıyla sıklıkla direnç ölçümleri kullanılmaktadır (Hornbostel vd., 2013; Azarsa ve Gupta, 2017; Yoon ve Chang, 2020). Ancak kür koşulları göz önünde bulundurularak beton dayanımının tahminine yönelik araştırma yapmak da mümkündür (Wei vd., 2012; Sabbağ ve Uyanık, 2018c; Shahmansouri vd., 2019; Ekin, 2021; Castillo ve Hedjazi, 2024). Çünkü, özdirenç değerleri betondaki gözeneklilik türü ve miktarından oldukça etkilenmektedir. Suya doygunluk arttıkça özdirenç değerleri azalırken, havaya doygunluk ile birlikte özdirenç değerleri de artmaktadır. Bu durumda, beton dayanımı ile özdirenç arasında yapılan ilişkilendirmelerde doğrusal bir ilişkiden söz edilmemelidir. Tam tersi doğrusal olmayan bir ilişki denklemi ile özdirenç değerlerinden beton dayanımına yaklaşım yapılması gerekir (Sabbağ ve Uyanık, 2018a).

2.4. Analizler

2.4.1. İkili Doğrusal Regresyon Analizi

İkili doğrusal regresyon analizinde bir bağımlı ve bir bağımsız değişken kullanılarak aralarında doğrusal bir ilişki belirlenmeye çalışılmaktadır. Böylece bağımsız değişken kullanılarak bağımlı değişkenin hesaplandığı ilişki denklemi, ilişki katsayısına (R^2) bağlı olarak sunulabilmektedir.

$$Y = b_0 + b_1X \quad (1)$$

Burada, Y : bağımlı değişken; X : bağımsız değişken; b_0 : sabit değer; b_1 : bağımsız değişkenle ilişkilendirilmiş katsayıdır.

Ölçülen ve hesaplanan regresyon çizgisi, eksik değerleri tahmin etmek veya kestirmek amacıyla kullanılabilir. Hesaplama en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. Bunun temel sebebi, tüm veri noktaları ile en iyi uyum çizgisi arasındaki dikey mesafenin toplamını en aza indirmektir.

2.4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) Analizi

ÇDR, bağımlı bir değişken ve iki veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modellemeyi içeren ikili doğrusal (linear) regresyonun bir uzantısıdır. Çoklu doğrusal regresyon için temel denklem Eşitlik (2)'de tanımlanmıştır.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n \quad (2)$$

Burada, Y : bağımlı değişken (yanıt); $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$: bağımsız değişkenler; b_0 : sabit değer; $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$: bağımsız değişkenlerle ilişkilendirilmiş katsayılarıdır.

Çoklu doğrusal regresyon analizinde bağımlı değişkenin belirlenmesi amacıyla kullanılacak en uygun bağımsız değişkenlerin belirlenmesi ve uygun olmayan önemsiz değişkenlerin kurulan modelden çıkarılması gerekmektedir (Alpar, 2003). Bu aşamadan sonra bağımlı değişken en iyi tahmin eden model kurularak bağımsız değişkenlerin her birinin bağımlı değişken üzerindeki etkileri incelenebilmektedir. Modelin etkinliği seçilen bağımsız değişkenlerin kalitesine ve alaka düzeyine bağlıdır (Kalaycı vd., 2008; Subaşı vd., 2010).

İstatistiksel olarak kullanılan parametrelerin anlamlılık seviyesi 0-1 aralığında değişmekte ve hipotezin kazara ortaya çıkma olasılığının ne kadar olası olduğunu gösterebilmektedir. α ile gösterilen anlamlılık derecesi için yapılan çalışmada kritik eşik değeri 0.05 olarak belirlenmiştir. Bu durumda şans eseri ortaya çıkabilecek olayların önüne geçilebilmektedir. α değerinin 0.05' ten küçük olması bu parametrelerin kurulan modelde önemli (anlamlı) olduğunu ve 0.05' ten büyük olması da istatistiksel olarak bu parametrelerin anlamlı olmadığını göstermektedir.

Analiz sonucunda belirlenen modele ait hesaplanan veriler ile ölçüm sonucu belirlenen bağımlı değişkene ait değerler karşılaştırılarak doğrusal (düz bir çizgi) biçiminde bir ilişki oluşturulmakta ve karekök hata değerine (R^2) bağlı olarak modelin tahmin aşamasındaki doğruluğu ortaya konulmaktadır. Bu parametrenin yanı sıra istatistiksel analizlerden elde edilen ortalama hata miktarlarının belirlenmesi de sınır değerlerinin ortaya konulabilmesi açısından değerlidir. Bu kapsamda, Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE), Hata Kareler Ortalaması (MSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) sırasıyla Eşitlik (3), (4) ve (5) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (5)$$

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Çalışma kapsamında ultrasonik boyuna ve enine hız değerleri, özdirenç, ölçüm zamanı, donatı çapı, ağırlık ve yoğunluk parametrelerinin elde edilmesi amacıyla hazırlanan düşük-orta dayanımlı 3 adet beton tasarımı (B1, B2 ve B3)'na ait istatistiksel sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

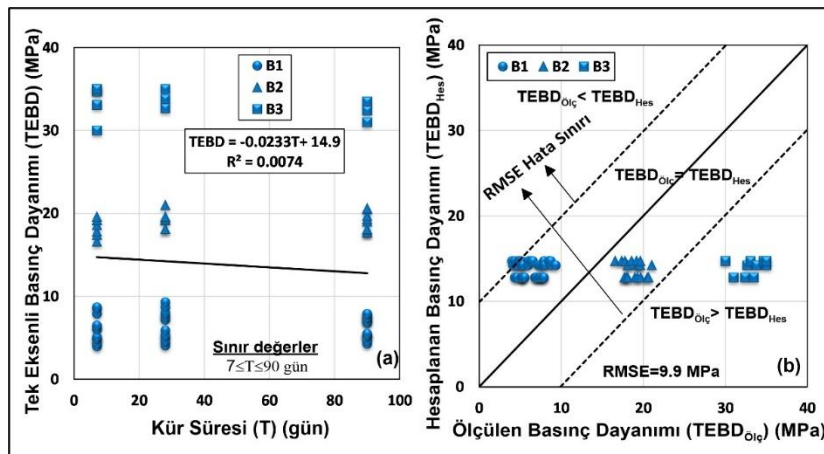
Buna göre, küp şeklindeki beton numunelerin ortalama ağırlık ve yoğunlukları sırasıyla 7980 gr ve 2.36 gr/cm³ 'tür. Donatılı beton numunelerin V_p hızları 3.030-4.878 km/s, V_s hızları 1.700-2.564 km/s ve Özdirenç değerleri 4.3-48 kohm.cm aralığında değişmektedir. Tek eksenli basınç dayanım testine göre betonların dayanımlarının ise 4-35 MPa aralığında değiştiği gözlenmiştir.

Tablo 1. Çalışma kapsamında kullanılan parametrelerin istatistiksel sonuçları
(Statistical results of the parameters used in the study)

Parametreler	Birimler	Min.	Max.	Ortalama	Std. Sapma	N
TEBD	MPa	4	35	13.831	9.969	74
T	gün	7	90	45.770	36.687	74
D	mm	10	20	14.811	4.173	74
A	gr	7390	8485.2	7979.75	260.08	74
Y	gr/cm ³	2.189	2.514	2.365	0.076	74
V _p	km/s	3.030	4.878	3.895	0.456	74
V _s	km/s	1.700	2.564	2.102	0.210	74
R	kohm.cm	4.3	48	17.652	13.707	74

T: Zaman; D: Donatı çapı; A: Ağırlık; Y: Yoğunluk; V_p: Boyuna dalga hızı;
Vs: Enine dalga hızı; R: Özdirenç; TEBD: Tek eksenli basınç dayanımı, N: Veri sayısı

Şekil 1-7'de bağımsız değişkenler ile beton dayanımı arasındaki İDR analizi ile belirlenen ikili ilişkiler ayrı ayrı sunulmuştur. 3 tasarıma ait veriler daire (B1), üçgen (B2) ve kare (B3) şeklinde ayrı ayrı şekillerle gösterilmiştir. Her şeklin içerisindeki (a)'da bağımsız değişken ve beton dayanımı arasındaki ilişki sunulurken (b)'de ise ölçülen basınç dayanımı ile (a) şeklinde kullanılan bağımsız değişkenden hesaplanan basınç dayanımı arasındaki ilişkiler sunulmuştur.

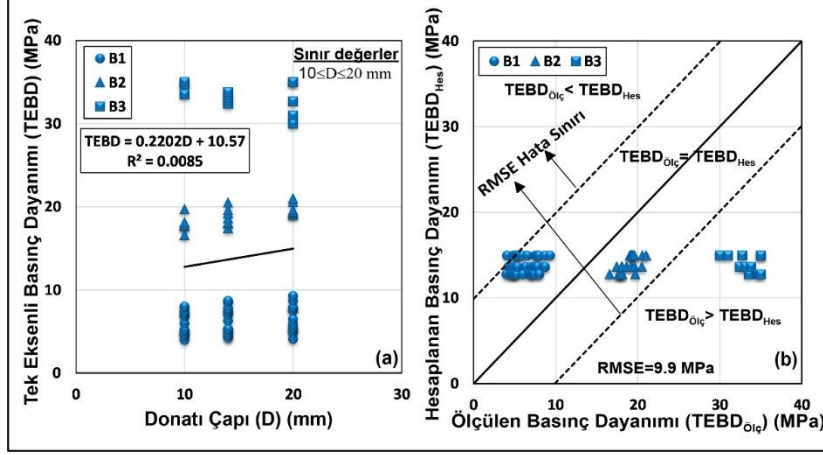


Şekil 1. a) Kür süresi ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve kür süresinden hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between curing time and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from curing time)

Normal şartlarda kür süresinin artışı ile beton dayanımının artması beklenir. Bu durumun oluşmasında gözeneklerin suya doygunluğunun da etkisi vardır (Sabbağ, 2016). Ancak yapılan çalışmada elde edilen Şekil 1 incelendiğinde kür süresi ile basınç dayanımı arasında ters yönlü bir doğrusal ilişki belirlenmiştir. İlişki

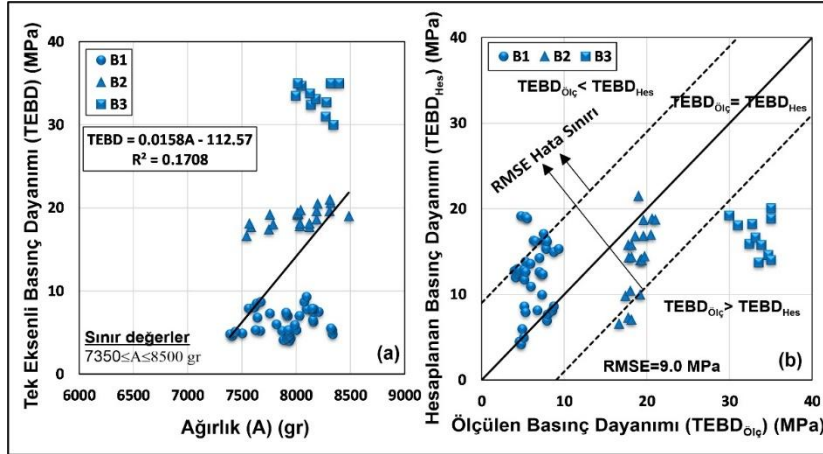
katsayısının çok düşük olması ve ölçülen ile hesaplanan basınç dayanımları arasında bir ilişkinin olmaması da bu iki parametre arasında doğrudan bir ilişki aramanın doğru olmadığını ortaya koymaktadır.

Şekil 2’de küp şeklindeki beton numunelerinin içerisindeki donatıların çaplarındaki artışa bağlı olarak basınç dayanımındaki değişim ortaya konulmuştur. Buna göre, donatı çapındaki artış ile beton dayanımı da artma eğilimi göstermiştir. Ancak kurulan ilişki denkleminde ilişki katsayısının oldukça düşük olduğu ve bu nedenle iki parametre arasında kurulan bu denklemin kullanımının doğru sonuçlar üretemeyebileceği düşünülmektedir.



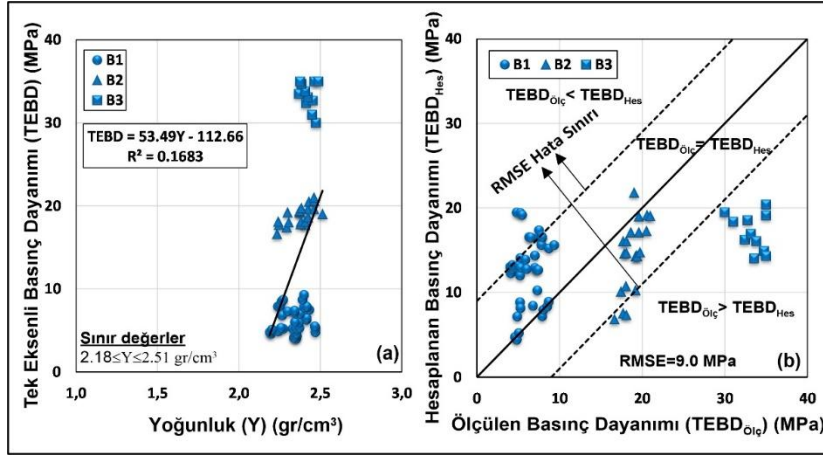
Şekil 2. a) Donatı çapı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve donatı çapından hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between reinforcement diameter and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from reinforcement diameter)

Şekil 3 ve 4’te numunelerin ağırlık ve yoğunluklarındaki artışa bağlı olarak beton dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Bu durumun oluşmasında gözenek miktarının da etkisi vardır. Düşük dayanımlı (B1 ve B2) betonlarda gözenek miktarı daha fazla olduğu için beton numunelerinin ağırlık ve yoğunlukları da düşük bulunacaktır. Orta dayanımlı (B3) betonlarda gözenek miktarı daha az olacağı için ağırlık ve yoğunlukları da daha fazla bulunacaktır.

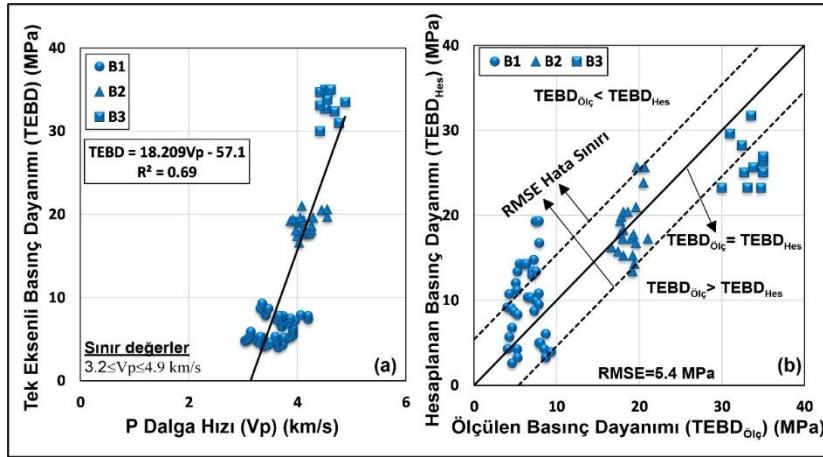


Şekil 3. a) Ağırlık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve ağırlıktan hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between weight and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from weight)

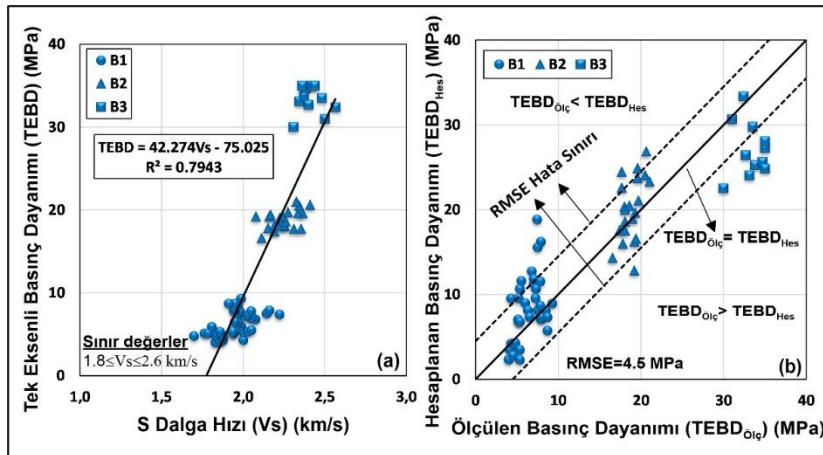
Ultrasonik P ve S dalga hızları ile beton dayanımı arasındaki ilişkiler Şekil 5 ve 6 ‘da sırasıyla verilmiştir. Buna göre, ultrasonik hızlar ile beton dayanımı arasında doğrusal yönde artan ilişkiler gözlenmiş, ultrasonik hızlar arttıkça basınç dayanımlarının da arttığı belirlenmiştir (V_p için: $R^2=0.69$ ve V_s için: $R^2=0.79$). Ayrıca, sismik hızlardan hesaplanan ve ölçülen basınç dayanımları diğer parametrelerdeki karşılaştırmalardan farklı olarak birbirine yakın çıkmıştır. Bu durumda, P ve S dalga hızlarından ayrı ayrı beton dayanımının belirlenebilir. Ayrıca, her iki dalga hızının bir arada kullanılması ile betona ait elastik parametreler ve Poisson oranı da belirlenebilir (Sabbağ ve Uyanık, 2017).



Şekil 4. a) Yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve yoğunluktan hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between density and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from density)



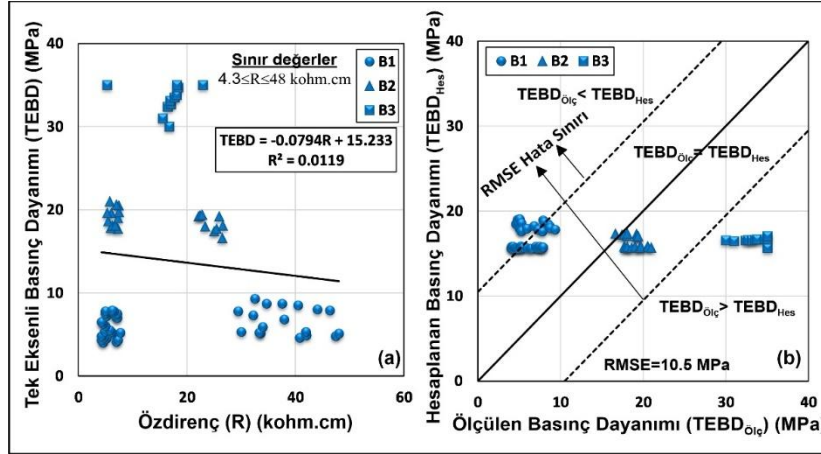
Şekil 5. a) P dalgı hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve P dalgı hızından hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between P wave velocity and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from P wave velocity)



Şekil 6. a) S dalgı hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve S dalgı hızından hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between S wave velocity and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from S wave velocity)

Şekil 7'de özdirenç yönteminden beton dayanımının elde edilmesi amacıyla kurulan ilişki grafiğı görölmektedir. Buna göre özdirenç değeri arttıkça dayanım değeri azaldığı gözlenmiştir. Bu şekilde bir ilişki kurulması doğrusallığın sağlanamaması nedeniyle doğru olmayacaktır. İlişki katsayısı da oldukça düşük bulunmuştur. Bu durumun asıl sebebi özdirenç betonlardaki gözenek doygunluğundan yani kür koşullarından oldukça etkilenmesidir. Suya doygunluk arttıkça özdirenç değeri azalırken, havaya doygunluk ile birlikte özdirenç değeri de artış göstermektedir. Dolayısıyla özdirenç yönteminde kür koşullarının etkisiyle suya doygun

betonlarda artan, havaya doymun betonlarda ise azalan bir eğri ortaya çıkması beklenmektedir (Sabbağ ve Uyanık, 2018c).



Şekil 7. a) Özdirenç ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve özdirençten hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between resistivity and compressive strength b) relationship between measured and compressive strengths calculated from resistivity)

ÇDR analizine başlamadan önce her bir bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasında ayrı ayrı İDR analizleri yapılarak ilişki katsayılarındaki (R^2) değişim irdelenmiştir (Tablo 2). Buna göre, TEBD ile diğer parametreler arasında ayrı ayrı yapılan ilişkilendirmelerde ilişki katsayılarının (R^2) 0.005-0.753 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda her bir parametrenin ayrı ayrı ilişkilendirmesi yerinde hepsinin bir arada kullanılarak ÇDR analizi yapılmıştır. Böylece bütün parametrelerin denklemdeki anlamlılık düzeyleri de belirlenerek basınç dayanımı daha doğru tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 2. İkili regresyon analizi ($y=ax+b$) ile bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki denklemleri (Relationship equations between dependent and independent variables with binary regression analysis ($y=ax+b$))

Bağımsız Değişken	İlişki Denklemi ($y=ax+b$)	İlişki Katsayısı (R^2)
T	TEBD= -0.0233*T+14.9	0.0074
D	TEBD= 0.2202*D+10.57	0.0085
A	TEBD= 0.0158*A-112.57	0.1708
Y	TEBD= 53.49*Y-112.66	0.1683
Vp	TEBD= 18.209*Vp-57.1	0.6933
Vs	TEBD= 42.274*Vs-75.025	0.7943
R	TEBD= -0.0794*R+15.233	0.0119

Tablo 3. Model 1 özeti^a (a: bağımlı değişken: TEBD; b: bağımsız değişken: Y, T, Vs, D, R, Vp, A) (Model 1 summary^a (a: dependent variable: TEBD; b: independent variable: Y, T, Vs, D, R, Vp, A))

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahminin Standart Hatası
1	0.964 ^a	0.929	0.921	2.803

Şekil 1-7' deki İDR analizi ile kullanılan bütün ikili ilişkilendirmelerin basınç dayanımının belirlenmesinde doğrudan kullanımı açısından bazı eksiklikler ya da yanlış değerlendirmelere yol açacağı ortaya konulmuştur. Örneğin sadece P hızı yerine P ve S hızlarının birlikte kullanımı ile elastik parametrelerin elde edilebilmesi mümkün olacaktır. Bunun yanı sıra özdirenç yönteminin de kullanımı ile gözeneklerdeki doygunluk durumunun beton dayanımına etkisi ortaya konulabilecektir. Dolayısıyla, oluşabilecek yanlış ya da eksik yorumlamaların önüne geçebilmek ve beton dayanımını yüksek doğrulukla belirleyebilmek amacıyla bütün parametreler bir arada değerlendirilerek basınç dayanımının çoklu regresyon analizi (ÇDR) ile tahmin edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda SPSS istatistik paket programında ÇDR analizi uygulanan 7 adet bağımsız değişken (Y, T, Vs, D, R, Vp, A) kullanılarak bir model oluşturulmuştur (Model 1). Burada modelin uygunluk göstergesi ilişki katsayısı (R^2) ile ifade edilmektedir ve R^2 değeri 1'e ne kadar yakın bulunursa modelin o kadar iyi olduğu sonucuna varılmaktadır (R^2 : 0.929). Düzeltilmiş R^2 değeri ise modeldeki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki varyansının yüzde kaçını açıklayabildiğini gösteren bir parametredir ve bu değer 1'e yakın bulunmuştur

(Düzeltilmiş R^2 : 0.921). Tablo 3'de Model 1 özeti verilmiştir. Buna göre ilişki katsayısı (R^2) değeri 0.929 olarak bulunmuştur.

Tablo 4'te ÇDR analizi yardımıyla TEBD bağımlı değişkeninin belirlenmesi amacıyla 7 adet bağımsız değişken (Y, T, Vs, D, R, Vp, A) kullanılarak oluşturulan modele ait denklem katsayıları sunulmuştur.

Tablo 4. ÇDR analizinde model 1 denkleminin katsayıları (Coefficients for model 1 equation in the CDR analysis)

Model	Birimler	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	t	α (Anlamlılık Düzeyi)
		B	Standart Hata	Beta		
Sabit		-125.527	23.216		-5.407	0.000
T	gün	-0.069	0.009	-0.256	-7.341	0.000
D	(mm)	0.029	0.145	0.012	0.197	0.844*
A	(gr)	0.033	0.025	0.861	1.312	0.194*
Y	(gr/cm ³)	-93.281	86.242	-0.715	-1.082	0.283*
Vp	(km/s)	11.709	2.741	0.535	4.273	0.000
Vs	(km/s)	23.338	5.223	0.492	4.468	0.000
R	(kohm.cm)	0.273	0.044	0.376	6.240	0.000

T: Zaman; D: Donatı çapı; A: Ağırlık; Y: Yoğunluk; Vp: Boyuna dalga hızı; Vs: Enine dalga hızı; R: Özdirenç
* işareti ile gösterilen parametrelerin anlamlılık düzeyleri $\alpha > 0.05$ olduğu için Model 1'den çıkarılarak Model 2 kurulmuştur.

Tablo 4'teki B değeri, kullanılan bağımsız değişkenlerdeki 1 birim artışının bağımlı değişken TEBD'deki artış veya azalış miktarını göstermektedir. Tablodaki standart hata, B değerinin standart hata miktarıdır. Beta değeri ise B değerinin standartlaştırılmış halidir. Beta değeri bağımsız değişkendeki bir standart sapma artış veya azalışın TEBD'nin standart sapmasındaki artış veya azalışının göstergesidir. Ayrıca, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etme aşamasındaki anlamlılık (önem) düzeyleri için t veya α değeri tercih edilebilmektedir. t değeri regresyon katsayılarının standart hatalara bölünmesi ile elde edilmektedir. Yapılan çalışmada anlamlılık düzeyi belirleme değeri olarak α değeri dikkate alınmıştır. Bu değer kurulan regresyon modelinin, rastgele bir dağılımdan anlamlı şekilde farklı olup olmadığını belirlemeye yararmaktadır. Eğer α değeri 0.05'ten küçükse, bağımsız değişkenlerden en az 1 tanesinin bağımlı değişken ile arasında anlamlı bir korelasyon ilişkisi var demektir. Örneğin, ağırlık (A) bağımsız değişkenindeki 1 birim artış TEBD üzerinde 0.033 birimlik bir artışa sebep olmaktadır. Bu değerinin standart hatası 0.025 olarak bulunmuştur. Yine ağırlık parametresinin standart sapmasındaki 1 birimlik artış TEBD değerinin standart sapmasında 0.861'lik bir artışa sebep olmaktadır. Ayrıca, t değeri kullanılarak yapılan hesaplamalarla belirlenen önem derecesi (anlamlılık düzeyi) 0.194 olarak bulunmuştur. Model 1 incelendiğinde T, Vp, Vs ve R bağımsız değişkenlerinin anlamlılık düzeyi $\alpha < 0.05$ olduğu için modele alınmıştır. Ancak, D, A, ve Y bağımsız değişkenlerinin anlamlılık düzeyi $\alpha > 0.05$ olduğu için bu değişkenlerin modele giremeyeceği anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda ikinci bir model (Model 2) kurulması sağlanmıştır. Tablo 5'te Model 2'nin özeti verilmiştir.

Tablo 5. Model 2 özeti^a (a: bağımlı değişken: TEBD; b: bağımsız değişken: T, Vp, Vs, R)
(Model 2 summary^a (a: dependent variable: TEBD; b: independent variable: T, Vp, Vs, R))

Model	R	R^2	Düzeltilmiş R^2	Tahminin Standart Hatası
2	0.957 ^a	0.915	0.911	2.98

Buna göre ilişki katsayısı (R^2) değeri 0.915 ve düzeltilmiş R^2 değeri 0.911 olarak bulunmuştur. Ölçülen ve hesaplanan TEBD değerleri kullanılarak Eşitlik 2, 3 ve 4 kullanılarak Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE) = 2.88 ve Hata Kareler Ortalaması (MSE) = 0.33, Ortalama Mutlak Hata (MAE) = 2.25 olarak hesaplanmıştır.

Model 2'de kullanılan bağımsız değişkenler ile elde edilen bağımlı değişken TEBD'nin kalıntı (rezidüel) analizinin istatistik sonuçları Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 7'de ÇDR analizi yardımıyla TEBD bağımlı değişkeninin belirlemek amacıyla 4 adet bağımsız değişken (T, Vp, Vs ve R) kullanılarak oluşturulan Model 2'ye ait denklem katsayıları sunulmuştur.

Tablo 6. Bağımlı değişken TEBD'nın kalıntı (rezidüel) analizinin istatistik sonuçları^a (a: bağımlı değişken: TEBD; b: bağımsız değişken: T, Vp, Vs, R) (Statistical results of residual analysis of dependent variable TEBD^a (a: dependent variable: TEBD; b: independent variable: T, Vp, Vs, R))

	Min.	Max.	Ort.	Std. Sapma	N
Tahmini değer	0.2585	34.6326	13.8311	9.5386	74
Rezidüel	-7.55075	7.14987	0.00000	2.89802	74
Std. Tahmini değer	-1.423	2.181	0.000	1.000	74
Std. Rezidüel	-2.533	2.399	0.000	0.972	74

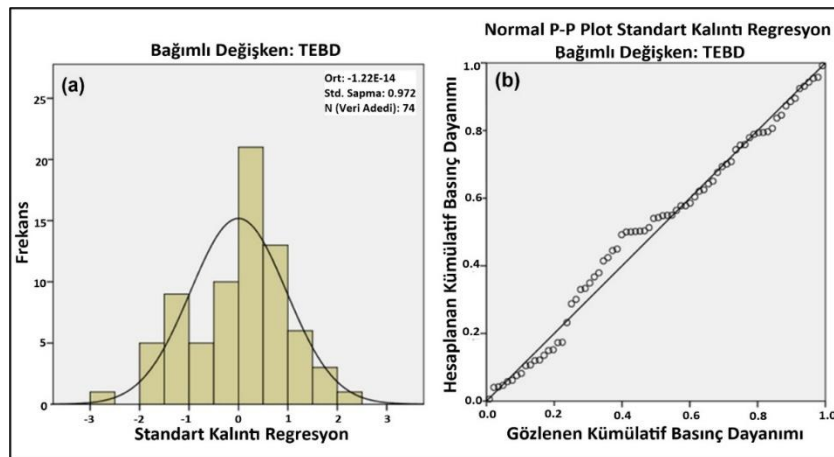
Tablo 7. ÇDR analizinde model 2 denkleminin katsayıları (Coefficients for model 2 equation in the CDR analysis)

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	t	α (Anlamlılık Düzeyi)
	B	Standart Hata	Beta		
Sabit	-85.888	3.880		-22.0136	0.000
T	-0.072	0.01	-0.266	-7.406	0.000
Vp	10.292	2.613	0.471	3.939	0.000
Vs	28.257	5.181	0.596	5.454	0.000
R	0.201	0.034	0.276	5.938	0.000

ÇDR analizi sonucunda bağımsız değişkenler kullanılarak bağımlı değişken TEBD değeri Eşitlik 6'dan hesaplanmıştır. Bu eşitliğin geçerli olduğu sınır değerler $3.2 \leq Vp \leq 4.9$ km/s; $1.8 \leq Vs \leq 2.6$ km/s; $4.3 \leq R \leq 48$ kohm.cm ve $7 \leq T \leq 90$ gün şeklindedir.

$$TEBD = -85.89 + 10.29 * Vp + 28.26 * Vs + 0.2 * R - 0.07 * T \quad (6)$$

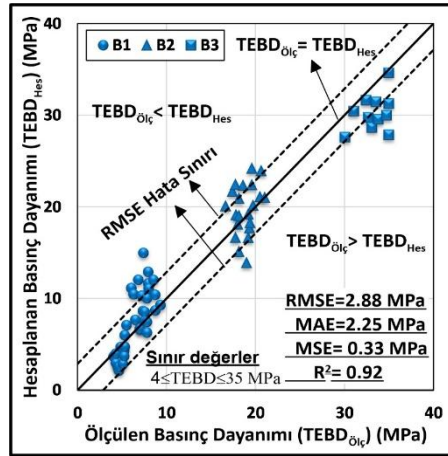
Normallik testi yapılması amacıyla bağımlı değişken olan tek eksenli basınç dayanımının frekans dağılımı Şekil 8'deki regresyon standartlaştırılmış kalıntı histogramında verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametreler arasındaki farklılık kalıntı olarak adlandırılmaktadır. Kalıntıların analizi, regresyon modelinin doğrulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Frekans dağılımı her dayanım türündeki toplam sayıyla birlikte verilerin türlerini veya aralıklarını göstermektedir. Frekans dağılımına ait histogram grafiği hataların normal dağılması ön koşulunun sağlanması amacıyla çan eğrisi şeklinde dağılmalıdır. Şekil 8a'daki frekans dağılımı incelendiğinde verilerin normal dağıldığı belirlenmiştir. Ek olarak, regresyon standartlaştırılmış kalıntının da normal dağıldığı, gözlemlenen ve hesaplanan değerlerin herhangi bir önemli sapma olmaksızın regresyon çizgisi boyunca dağıldığı bulunmuştur (Şekil 8b).



Şekil 8. Bağımlı değişken TEBD'nın normallik testi (Normality test of dependent variable UCS)

Eşitlik 6 kullanılarak ÇDR analizi ile oluşturulan modele ait %95 güven aralığında hesaplanan basınç dayanım değerleri ile tek eksenli basınç dayanım testi ile ölçülen basınç dayanım değerleri karşılaştırılması RMSE hata sınırları içerisinde Şekil 9'da gösterilmiştir.

Buna göre ölçülen ve bağımsız değişkenler olarak belirlenen T, Vp, Vs ve R parametreleri kullanılarak hesaplanan TEBD değerleri özellikle B2 (15-20 MPa) ve B3(25-35 MPa) tasarımlarında birbirine oldukça yakın bulunmuştur ($R^2=0.915$). Ölçülen ve hesaplanan verilerin karşılaştırılmasındaki en büyük sapmanın ise 4-10 MPa aralığında düşük dayanımlı B1 tasarımında olduğu gözlenmiştir. Bu farklılıkların özdirençin gözeneklerdeki sıvı dolgusundan etkilenmesi sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, veri sayısının B1 tasarımında en fazla olmasının da bu duruma yol açmış olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 9. Ölçülen ve hesaplanan basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması
(Comparison of measured and calculated compressive strength values)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yapılan çalışmada İDR ve ÇDR analizi ile farklı kür koşullarındaki düşük-orta dayanımlı donatılı betonların basınç dayanımları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle İDR analizi ile her bir bağımsız değişken (ultrasonik boyuna ve enine dalga hızları, özdirenç, ölçüm zamanı, donatı çapı, ağırlık ve yoğunluk) ile bağımlı değişken olan TEBD arasında ikili ilişkilendirmeler yapılmıştır. Bunun sonucunda ilişki katsayılarının (R^2) 0.0074-0.7943 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, betonlardaki doymunluk türünün beton dayanımına etkisi ve elastik parametrelerin belirlenmesi gibi durumların ortaya konulabilmesi amacıyla tahribatsız yöntemler bir arada kullanılarak beton dayanımı ÇDR analizinden yüksek doğrulukla tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında ÇDR analizinde oluşturulan Model 1’de kullanılan ağırlık, yoğunluk, donatı çapı parametrelerinin anlamlılık düzeyi düşük ($\alpha > 0.05$) bulunduğu için bu parametrelerin TEBD üzerinde etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (anlamlılık derecesi sırasıyla α : 0.194, 0.283, ve 0.844). Bu kapsamda bağımsız değişkenler olan ağırlık, yoğunluk, donatı çapı Model 1’den (R^2 : 0.921) daha sonra çıkartılarak yeni bir model (Model 2) oluşturulmuştur (R^2 : 0.911).

Anlamlılık düzeyinin iyi ($\alpha < 0.05$) olduğu belirlenen bağımsız değişkenlerin (T, Vp, Vs ve R) kullanılması ile (T, Vp, Vs ve R için anlamlılık dereceleri α : 0.000) tahribatsız bir şekilde elde edilen parametreler kullanılarak Model 2 oluşturulmuştur. Bu durumda kür süresi, Vp ve Vs hızı ile özdirenç parametrelerinin basınç dayanım üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Ölçülen ve Model 2’deki Eşitlik 5’ten hesaplanan tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması sonucunda başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür (RMSE: 2.88, MAE: 2.25, MSE: 0.33, ve R^2 : 0.92).

Ultrasonik P dalga hızının tek başına kullanımı yerine P ve S dalga hızlarının birlikte kullanımı beton dayanımının yanı sıra betona ait özellikler olan ve inşaat hesaplamalarında oldukça önemli olan elastik parametrelerin (elastisite modülü, kayma modülü, bulk modülü ve Poisson oranı) elde edilebilmesini sağlamaktadır.

Kür koşullarının özdirenç üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Kür koşullarının etkisiyle gözeneklerdeki doymunluk durumuna bağlı özdirenç değişmektedir ve bu durumun beton dayanımına etkisi ortaya konulmuştur. Yani betondaki gözeneklerin suya doymunluğu arttıkça özdirenç değerleri düşmekte, havaya doymunluk ile artmaktadır. Bu durumda sadece suya doymunluk göz önüne alındığında özdirenç arttıkça beton dayanımının da arttığı görülmektedir. Ancak betondaki gözeneklerin hava ile doymun olması durumunda özdirenç arttıkça beton dayanımının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 7a). Dolayısıyla, beton dayanımının özdirençten belirlenmesi esnasında gözeneklerin doymunluk türünün de göz önünde bulundurulması şarttır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Makalenin gelişmesine yaptığı katkılardan dolayı Prof. Dr. Osman UYANIK 'a çok teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Alpar, R., 2003. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş. 1. 2. Baskı, Nobel Basımevi, Ankara.
- Amini, K., Jalalpour, M., Delatte, N., 2016. Advancing Concrete Strength Prediction Using Nondestructive Testing: Development and Verification of A Generalizable Model. *Constr. Build. Mater.*, 102, Part 1 762-768.
- Amini, K., Wang, X., Delatte, N., 2018. Statistical Modeling of Hydraulic and Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Nondestructive Tests. *J. Mater. Civ. Eng.*, 30 (6), 04018077.
- Arora, H.C., Bhushan, B., Kumar, A., Kumar, P., Hadzima-Nyarko, M., Radu, D., Cazacu, C.E., Kapoor, N.R., 2024. Ensemble Learning Based Compressive Strength Prediction of Concrete Structures Through Real-Time Non-Destructive Testing. *Sci Rep* 14, 1824
- Azarsa, P., Gupta, R., 2017. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*. Article ID 8453095, 30 p.
- Babacan, A.E., Karşlı, H., Şenkaya, M. 2023. Picking of First Arrival Times on Noisy Ultrasonic S-Wave Signals for Concrete and Rock Materials. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 58(4), 631-648.
- Başığit, C., Akkaş, A.K., Kurtarıcı, M.N., 2012. Betonların Radyasyon Zırh Kalınlıklarının Yapay Sinir Ağları ve Çoklu Regresyon Metotları ile Tahmini. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(1): 77-81.
- Bhosale, N., Salunkhe. P.A., 2016. To Establish Relation between Destructive and Nondestructive Tests on Concrete. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci* 4(2): 634-644.
- Castillo, D., Hedjazi, S., 2024. Application of Electrical Resistivity for Estimating Compressive Strength of FRC at Early-Ages. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 9(1).
- Chu, H.Y., Chen, J.K., 2016. The Experimental Study on the Correlation of Resistivity and Damage for Conductive Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 67, 12-19.
- Çakır, D., Genç, O., Cansız, Ö.F., 2023. Beton Basınç Dayanımının Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Çok Değişkenli Regresyon Analizi ile Tahmin Edilmesi. *2nd International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, April 4-6, Konya, Turkey, 493-499.
- Durmuş G., Can, Ö., 2009. Yüksek Sıcaklık Uygulanmış Katkılı Betonun Bulanık Mantık ve Regresyon Yöntemiyle Basınç Dayanımın Tahmini. *Politeknik Dergisi*, 12(3): 195-200.
- Ekin, N., 2021a. Relationship between Amplitude Anisotropy and Compressive Strength of Reinforced Concrete Depending on Curing Conditions. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 28(3), 286-299.
- Ekin, N., 2021b. Concrete Anisotropy Estimated from Ultrasonic Signal Amplitudes. *Materials Testing*, 63(12), 1164-1173.
- Ekin, N., Uyanık, O., 2021a. Anisotropy of Reinforced Concrete from Geophysical Methods. *Science of Sintering*, 53(3), 323-345.
- Ekin, N., Uyanık, O., 2021b. Comparison of Static and Dynamic Elastic Moduli in Concrete: Effects of Compressive Strength, Curing Conditions and Reinforcement. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Eng.*, 45, 2327-2343.
- Hornbostel, K., Larsen, C.K., Geiker, M.R., 2013. Relationship between Concrete Resistivity and Corrosion Rate—A literature Review. *Cement and Concrete Composites*, 39, 60-72.
- Jain, A., Kathuriaa, A., Kumara, A., Vermaa, Y., Muraria, K., 2013. Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. *The 2nd Int. Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering, Procedia Engineering*, 54, 241-251.
- Jedidi, M., 2020. Determination of Concrete Characteristics Using Destructive and Non-Destructive Tests. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, ISSN: 2643-6876, DOI: 10.33552/CTCSE.2020.06.000627
- Kalaycı, Ş., 2008. SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri. Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 3. Baskı, Ankara, 426s.
- Kim, J.H., Yoon, H.-K., Cho, S.-H., Kim, Y.S., Lee, J.-S., 2011. Four Electrode Resistivity Probe for Porosity Evaluation. *ASTM International West Conshohocken, PA, USA*.
- Kouddane, B., Sbartai, Z.M., Alwash, M., Benyahia, K.A., Elachachi, S.M., Lamdouar, N., Kenai, S., 2022. Assessment of Concrete Strength Using the Combination of NDT—Review and Performance Analysis. *Applied Sciences*. 12. 12190. 10.3390/app122312190.
- Özicer, S., Uyanık, O., 2017. Beton Dayanımının Yerinde P Dalga Hızından Belirlenmesi ve İzmir Örneği. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 9(1), 1-16.
- Pucinotti, R., 2015. Reinforced Concrete Structure: Non-Destructive in Situ Strength Assessment of Concrete. *Construction and Building Materials* 75,331-341.
- Rashid, K., Waqas, R., 2017. Compressive Strength Evaluation by Non-Destructive Techniques: An automated Approach in Construction Industry. *Journal of Building Engineering*, 12, 147-154, ISSN 2352-7102.
- Sabbağ, N., 2016. Beton kalitesinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Müh. Anabilimdalı, Doktora Tezi*, 172.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2016. Time-Dependent Change of Seismic Velocities on Low Strength Concrete. *The Online Journal of Science and Technology*, 6(4), 49-57.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2017. Prediction of Reinforced Concrete Strength by Ultrasonic Velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23.

- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2018a. Determination of the Reinforced Concrete Strength by Apparent Resistivity Depending on The Curing Conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 155, 13- 25.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2018b. Doygun Betonların Statik ve Dinamik Elastik Parametrelerinin Karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(017201), 1181-1189.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2018c. Determination of Reinforced Dry Concrete Strength by Electrical Resistivity Method. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1230-1236.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2020. Özdirenç yöntemi kullanılarak donatılı betonların anizotropisinin belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 572-580.
- Sathiparan, N., Jeyanthan, P., Subramaniam, D.N., 2024. Surface Response Regression and Machine Learning Techniques to Predict the Characteristics of Previous Concrete Using Non-Destructive Measurement: Ultrasonic Pulse Velocity and Electrical Resistivity, *Measurement*, 225, 114006, ISSN 0263-2241.
- Sertçelik, I., Kurtuluş, C., Sertçelik, F., Pekşen, E., Aşçı, M., 2018. Investigation into Relations between Physical and Electrical Properties of Rocks and Concretes, *IOP Publishing, J. Geophys. Eng.* 15, 142–152.
- Shahmansouri, A., Bengar, H., Jahani, E., 2019. Predicting Compressive Strength and Electrical Resistivity of Eco-Friendly Concrete Containing Natural Zeolite Via GEP Algorithm. *Construction and Building Materials*, 229, 116883.
- Singh, S., Alhussainy, A.K., Panduri, B., Rajalakshmi, B., Gupta, M., Singh, H., Reddy, G.C., 2024. Compressive Strength Prediction Model of High Strength Concrete by Destructive and Nondestructive Technique, *E3S Web Conf. 16th International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2024)* 552 01111, DOI: 10.1051/e3sconf/202455201111
- Subaşı, S., Beycioğlu, A., Çullu, M., 2010. Bulanık Mantık ve İstatistiksel Analiz Yöntemleri ile Revibrasyon Uygulanmış Betonlarda Basınç Dayanımı Tahmini. *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 2(3): 46-52.
- Subaşı, S., Kap, T., Beycioğlu, A., Emiroğlu, M., 2008. Hafif Betonlarda Basınç Dayanımlarının Tahmin Edilmesinde Kullanılan Farklı Tahmin Metotlarının Karşılaştırılması. *Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu- BMYS'2008*, 15-17 Ekim 2008 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 1053-1062.
- TS EN 12390-2., 2019. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-3., 2019. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- Uyanık, O., 1999. Kayaçlarda Ultrasonik Hızlar ve Kayma Direncinin İncelenmesi. 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 63-70.
- Uyanık, O., 2012. Ultrasonik Hızlardan Beton Dayanımının Belirlenmesi. *Jeofizik Bülteni*, 23(70), 25-30.
- Uyanık, O., 2014. Jeofizik ve Klasik Yöntemlerle Yapı İncelemeleri (Yapı Jeofiziği). *JFMO Eğitim Yayınları*, No:19 ISBN:978-605-01-0643-5.
- Uyanık, O., Tezcan, S., 2012. Determination of Concrete Strength by Ultrasonic Method. *Geophysical Bulletin*, 41–45.
- Uyanık, O., Çatlıoğlu, B., Uyanık, N.A., Öncü, Z., Sabbağ, N., 2012a. Determination of Concrete Quality of Reinforced Concrete Structures from Seismic Ultrasonic Velocities in Urban Transformation Projects. 1st Earth Sciences Symposium, 18-20.
- Uyanık, O., Çatlıoğlu, B., Sabbağ, N., Öncü, Z., Uyanık, N.A., 2012b. Kayaçların Fiziksel Özellikleri ile Ultrasonik Ultrasonik Hızlar Arasındaki İlişkilendirmeler. 1. Yerbilimleri Sempozyumu, 165-169.
- Uyanık, O., Gülay, F.G., Tezcan S., 2012c. Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini. *Hazır Beton*, 82-85.
- Uyanık, O., Sabbağ, N., Uyanık, N.A., Öncü, Z., 2019. Prediction of Mechanical and Physical Properties of Some Sedimentary Rocks from Ultrasonic Velocities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 6003-6016.
- Uyanık, O., Şenli, G., Çatlıoğlu, B., 2013. Binaların Beton Kalitesinin Tahribatsız Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi, *SDÜ Uluslararası Teknoloji Bil. Dergisi*, 5(2), 156-165.
- Wei, X., Xiao, L., Li, Z., 2012. Prediction of Standard Compressive Strength of Cement by the Electrical Resistivity Measurement, *Constr. Build. Mater.*, 31, 341-346.
- Yoon, I.S., Chang, C., 2020. Effect of Chloride on Electrical Resistivity in Carbonated and Non-Carbonated Concrete. *Applied Sciences*. 10. 6272. 10.3390/app10186272.
- Yoon, G.L., Park, J.B., 2001. Sensitivity of Leachate and Fine Contents on Electrical Resistivity Variations of Sandy Soils. *J. Hazard. Mater.*, 84,147-161.
- Yörübulut, S., Doğan, O., Erdugan, F., Yörübulut, S., 2020. Tahribatsız Yöntem Verileri Kullanılarak Yapay Sinir Ağı ve Regresyon Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımının Tahmin Edilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2): 769-776.