

Yüksek Dayanımlı Betonlarda Uluslararası Standartlardaki Elastik Modüllerin Karşılaştırılması

Nevbahar EKİN*¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 04.03.2025, Kabul / Accepted: 02.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Yüksek dayanımlı beton,
Dinamik elastik modüller,
Statik elastik modüller,
Poisson oranı,
Ultrasonik yöntem,
Uluslararası standartlar

Öz: Betonun statik elastik modülü, betonarme yapıların tasarımı, güvenliği ve performansı açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu parametre, taşıyıcı sistemlerin deformasyonlarının hesaplanmasında, kesit tasarımı ve çatlak kontrolü gibi mühendislik hesaplarında, zemin oturması ve temel sistemi analizlerinde ve zamanla oluşacak rötre ve sünme etkileri fidsagfredwqnnin öngörülmesinde kullanılmaktadır. Statik elastisite modülü deneysel olarak silindirik veya prizmatik numuneler üzerinde uygulanan basınç deneylerinde genellikle yük-deformasyon eğrisi elde edilerek; ampirik olarak ise basınç dayanım değerlerinden hesaplanmaktadır. Betonun statik elastik modülleri belirlenirken farklı ülkelere ait uluslararası standartlara göre birbirinden farklı hesaplanmaktadır. Uluslararası standartların farklı sonuçlar vermesi teknik, jeolojik, iklimsel, kültürel ve politik temellere dayanmaktadır. Bu yüzden, bir ülkede geliştirilmiş bir standardın başka bir ülkede doğrudan kullanılmaması, ya da kullanılmadan önce uygunluk analizinin yapılması gerekmektedir. Uluslararası standartlardaki bu farklılığın doğurduğu sonuçların ortaya konulması, yapım aşamasındaki inşaat hesaplamaları açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı betonlarda uluslararası standartlardaki elastik modüllerin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Buna göre, 4 farklı yüksek dayanımlı beton tasarımı hazırlanmıştır. Hazırlanan tasarımların ultrasonik basınç (P) ve kayma (S) dalga ölçümleri ile Tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Buna göre, statik elastik parametreler Tek eksenli basınç dayanım (TEBD) sonuçlarına bağlı olarak ve dinamik elastik parametreler ise tahribatsız test tekniklerinden olan ultrasonik yöntem yardımıyla belirlenen basınç (Vp) ve kayma (Vs) dalga hızlarından hesaplanmıştır. Daha sonra Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), Avrupa Beton Komitesi (CEB), Türk Standartları Enstitüsü (TSE) ve Norveç standartlarına (NS) göre hesaplanan statik ve dinamik elastik modüllerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca, dinamik elastik parametreler ile statik elastik parametreler arasındaki yüzde (%) değişim oranları belirlenmiştir. Buna göre, birbirine en yakın statik ve dinamik elastik parametre değerleri sırasıyla CEB, TSE, ACI ve NS standartlarında bulunmuştur.

Comparison of Elastic Modules in High-Strength Concretes in International Standards

Keywords

High-strength concrete,
Dynamic elastic modules,
Static elastic modules,
Poisson's ratio,
Ultrasonic method,
International standards

Abstract: The static elastic modulus of concrete is a very important parameter in terms of the design, safety and performance of reinforced concrete structures. This parameter is used in the calculation of deformations of load-bearing systems, in engineering calculations such as section design and crack control, in soil settlement and foundation system analyses and in the prediction of shrinkage and creep effects that will occur over time. The static elastic modulus is generally calculated experimentally by obtaining the load-deformation curve in pressure tests applied on cylindrical or prismatic samples; and empirically from the compressive strength values. When determining the static elastic modules of concrete, they are calculated differently according to international standards belonging to different countries.

The fact that international standards give different results is based on technical, geological, climatic, cultural and political foundations. Therefore, a standard developed in one country should not be used directly in another country, or a conformity analysis should be performed before use. It is very important to reveal the consequences of this difference in international standards in terms of construction calculations during the construction phase. For this reason, the study aimed to compare the elastic modules in international standards in high-strength concretes. Accordingly, 4 different high-strength concrete designs were prepared. Uniaxial compressive strengths of the prepared designs were determined by ultrasonic pressure (P) and shear (S) wave measurements. Accordingly, static elastic parameters were calculated based on the Uniaxial Compressive Strength (UCS) results, and dynamic elastic parameters were calculated from the pressure (Vp) and shear (Vs) wave velocities determined by the ultrasonic method, which is one of the non-destructive testing techniques. Then, a comparison was made between the static and dynamic elastic modules calculated according to the American Concrete Institute (ACI), European Concrete Committee (CEB), Turkish Standards Institute (TSE), and Norwegian standards (NS). In addition, dynamic elastic parameters and percentage (%) change rates between static elastic parameters were determined. Accordingly, the closest static and dynamic elastic parameter values were found in CEB, TSE, ACI and NS standards, respectively.

1. Giriş

Betonarme elemanların tasarımı için betonun mekanik özellikleri, özellikle elastisite modülü, son derece önemlidir. Betonun elastisite modülü, betonarme yapıların performansını etkileyen kritik bir parametredir ve bu nedenle doğru bir şekilde belirlenmesi gereken bir özelliktir. Betonun elastisite modülü, betonun gerilme altındaki deformasyon özelliklerini tanımlar ve betonun mekanik davranışını anlamak için temel bir parametredir [1]. Bu parametrenin deneysel olarak tespiti zordur. Bu zorluk, hesaplamalarda kullanılan yöntem, betonu oluşturan bileşenlerin türü, ve betonun yapım aşamaları gibi işlemlerden kaynaklanmaktadır [2-4]. Betonun elastik modül hesaplamalarında bazı farklılıklar ile karşılaşmaktadır. Hesaplamalardaki bu farklılıkların başlıca nedeni, uluslararası standartlardaki tanımlamaların (betonun basınç dayanımı sınırı (düşük, normal, yüksek dayanımlı beton), su/çimento oranı, betonun yoğunluğu, agrega türü, agreganın mekanik özellikleri, beton numunesinin şekli ve boyutu, kür koşulları vb.) farklı olmasıdır. Ayrıca betondaki donatının etkisi de göz ardı edilmektedir. Donatının (yani betonarme içindeki çelik çubukların) betonun elastik modülüne olan etkisi, doğrudan olmasa da betonarme elemanın genel elastik davranışını etkilemektedir. Yani donatı ile aslında betonun elastik modülü değişmez ama betonarme elemanın (beton + çelik birlikte) rijitlik ve deformasyon özellikleri gibi elastik davranışı büyük ölçüde değişmektedir. Donatı oranı ve yerleşimi, yapı elemanının rijitliği, sehim davranışı ve çatlama kontrolü açısından çok önemlidir. Tüm bu etkenlerden dolayı betonun elastik parametreleri farklı değerler alabilmektedir [5-9].

Betonun elastik modülünü belirlemek için yaygın olarak kullanılan bazı denklemler ve standartlar

kullanılmaktadır. Türk Standartları Enstitüsü [10], Amerikan Beton Enstitüsü [11], Norveç Standartları [12] ve Avrupa Beton Komitesi [13] gibi kurumlar, betonun elastisite modülünü belirlemek için çeşitli deneysel bağıntılar önermiştir. Bu bağıntılar, normal betonlar için (yaklaşık silindirik dayanımı 16-30 MPa ve küp dayanımı 20-37 MPa olan C16-C30 sınıfındaki betonlar) benzer sonuçlar vermekte ve betonun dayanımına bağlı olarak elastisite modülünü hesaplamak için kullanılmaktadır [14].

Betonun elastisite modülü, malzemenin elastik özelliklerini tanımlayan bir parametredir ve genellikle dinamik elastik modül ve statik elastik modül olarak iki şekilde değerlendirilmektedir [15, 16]. Dinamik elastik modül, küçük gerilmeler altında yapılan testlerle elde edilmektedir. Bu modül, genellikle betonun elastik özelliklerinin başlangıç noktasındaki (gerilme-şekil değiştirme eğrisinin teğet çizgisi) davranışına yakın bir değeri temsil etmektedir. Betonun statik elastisite modülü, genellikle betonun basınç dayanımıyla ilişkili olan deneysel bir parametredir. Bunun temel nedeni, betonun elastik özelliklerinin genellikle dayanımıyla doğru orantılı olmasıdır. Bu ilişki, betonun karışım bileşenleri, kullanılan agregalar, bağlayıcı maddeler ve katkı maddelerinin özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Basınç dayanımını etkileyen faktörlerin çoğu elastik modülleri de benzer biçimde etkilemektedir [8, 17]. Elastisite modülü arttıkça malzeme daha rijit (sert) hale gelmektedir. Elastisite modülü küçüldüğünde ise malzeme daha esnek/elastik davranmaktadır [18]. Dinamik elastik modül ise, statik elastisite modülünden daha yüksek bir değere sahiptir. Bunun nedeni, dinamik yükleme koşullarının kısa süreli etkiler altında saf elastik davranış gösteren malzemenin daha rijit gözükmesidir. Bu modül, düşük yükleme seviyeleri ve kısa süreli yüklemeler altında, betonun elastik

tepkisini tanımlamaktadır [19]. Statik elastik modül ise, uzun süreli yüklemeler ve daha büyük gerilme seviyelerinde elde edilen modüldür. Statik elastik modül, dinamik elastik modülden %20-40 arasında daha küçüktür [20]. Bu nedenle yapı tasarımında deprem gibi titreşimli ve tekrarlı yüklere karşı direncin tanımlanmasında dinamik elastisite modülünün kullanılması daha uygundur. Çünkü statik testlerde, yükleme daha yavaş ve uzun süreli olduğunda betonun yapısal özellikleri farklı bir şekilde etkilenebilmektedir. Bu iki elastik modül arasındaki farklar, betonun zamanla değişen davranışlarını ve farklı yükleme koşullarındaki tepkilerini anlamada önemli bir rol oynamaktadır [2, 9, 21, 22].

Elastisite modülünün tespiti için farklı test metotları kullanılmaktadır. Statik elastisite modülü, dinamik elastisite modülüne göre daha yaygın olarak kullanılmasına rağmen, dinamik elastisite modülü yüksek değerler vermesi ve ölçme açısından daha kolay olması nedeniyle daha güvenilir ve üretken olarak kabul edilmektedir [9]. Beton heterojen ve anizotrop bir yapıya sahiptir [23-25]. Elastisite modülünün belirlenmesi için kullanılan test metotları ve standartlar, betonun homojen olmayan yapısına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle, betonun homojen olmayan yapısı elastisite modülünü etkileyebilmekte ve bu nedenle elastisite modülünün bir aralık olarak verilmesinin daha güvenli bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir [21]. Dinamik elastisite modülünün belirlenmesinde yalnızca P dalgasının kullanılması hem kolay olmamakta hemde P dalga hızı ile dinamik elastisite modülü arasında teorik ve pratik bir formülün olmaması nedeniyle oldukça zordur. Zira, bazı araştırmacılar P-dalga hızı yönteminin güvenilir olmadığını ve betonun dinamik elastik modülünü tahmin etmek için önerilmediğini savunmaktadır [26, 27]. Bazı araştırmacılar da laboratuvarındaki deneylerle S dalgalarının su ve/veya hava içeriğine karşı daha az hassas olduğunu ve erken yaştaki çimentolu malzemelerin sertlik (veya mukavemet) kazanımını değerlendirmek için etkili bir parametre olduğunu göstermiştir [27, 28].

Ayrıca, ultrasonik yöntem ile belirlenen betona ait basınç ve kayma dalga hızlarının birlikte kullanılması ile beton içerisindeki kırık, boşluk ve bozuşma durumunun yanı sıra betonların elastik parametreleri de (elastisite, kayma ve bulk modülleri ile Poisson oranı) elastisite teorisinden hesaplanabilmektedir [29-36].

Bu kapsamda, yapılan çalışmada 4 farklı yüksek dayanımlı beton tasarımı (beton sınıfı C35-C50) hazırlanmıştır. Ancak basınç dayanımları işçilik, şişleme vs. bir çok faktörden etkilenecek 38-70 MPa aralığında bulunmuştur. Çalışma kapsamında odak noktası belirli bir sınıftaki beton üretiminden ziyade mukavemeti yüksek bulunan numunelerdeki elastik parametrelerin değişimini gözlemlemek olmuştur. Uluslararası standartlarda genellikle silindirik

numune dayanımları kullanıldığı için bu dayanım değerleri literatürdeki bir eşitlik (Eşitlik 2) kullanılarak silindirik dayanım değerlerine dönüştürülmüştür [37]. Böylece elde edilen yeni dayanım değerlerinin 34-75 MPa aralığında değiştiği gözlenmiştir. Hazırlanan beton tasarımların ultrasonik hızların hesaplanması amacıyla dalga ölçümleri yapılmış ve ardından basınç dayanımları belirlenmiştir. Buna göre 4 farklı standartta yer alan statik elastik modüller, tek eksenli basınç dayanım sonuçlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Dinamik elastik parametreler ise tahribatsız test tekniklerinden olan ultrasonik yöntem yardımıyla belirlenen V_p ve V_s hızlardan hesaplanmıştır. Daha sonra bu sonuçlar karşılaştırılarak yüksek dayanımlı betonlarda dinamik elastik parametrelerden statik elastik parametrelere geçiş yapılması sağlanmıştır. Ayrıca standartlardaki sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak sonuçlar ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında dayanımları farklı 4 adet beton tasarımı hazırlanmıştır. Her bir tasarım için 27 adet olmak üzere toplam 108 adet 150x150x150 mm boyutunda küp numune hazırlanmıştır. Numune sayıları laboratuvar koşullarının izin verdiği doğrultuda, her bir tasarımdan olabildiğince çok sayıda numune üreterek sonuçların güvenilirliğini artırmak ve değişim aralığını geniş tutmak amacıyla hazırlanmıştır. Beton numunelerin kürlenmesi işlemi oda sıcaklığındaki ve genellikle 20 ± 2 °C sıcaklıklardaki kür havuzları kullanılarak yapılmaktadır [38]. Bunun yanı sıra, inşaat mühendisliğinde beton numunelerin 28 gün sonra kalıcı gücüne ulaştığı kabulü vardır. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan beton numuneler 28 gün boyunca 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilmiştir. 28. günde kür havuzundan çıkartılan numunelerin ağırlık ve yoğunlukları belirlendikten sonra basınç (P) ve kayma (S) dalga ölçümleri yapılarak aynı özelliklerdeki 3'er adet numunenin TEBD deneyi ile dayanımları belirlenmiş ve belirlenen değerlerin ortalamaları alınmıştır [39]. Bu işlem bütün tasarımlar için tekrar edilmiştir (Şekil 1).

2.1. Hazırlanan beton tasarımları

Beton numuneler hazırlanırken agregası olarak, iri çakıl, orta çakıl, kum (iri çakıl: %25, orta çakıl: %23, kum: %52) kullanılmış ve en büyük agregası tane boyutu (D_{max}) 63 mm olarak alınmıştır. Ayrıca, CEM II/B-LL Portland çimentosu ve içilebilir nitelikteki şebeke suyunun yanı sıra yine her bir tasarım için belli oranlarda kimyasal katkı maddeleri kullanılarak beton tasarımları hazırlanmıştır. Kimyasal katkı maddeleri (süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici) özellikle yüksek dayanımlı beton oluşturulurken betonun hızla sertleşmesinin önüne geçmek amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra CEM II/B-LL çimentosu da hem ekonomik ve kolay işlenebilir olması hem de yüksek dayanımlı betonlarda daha

kompakt, boşluksuz, pompalanabilir karışımlar elde etmeye katkı sağlaması nedeniyle teknik ve çevresel avantajlar sağlamaktadır. Beton tasarımları hazırlanırken su/çimento (s/ç) oranı ve agregası olarak kullanılan malzemelerin oranı değiştirilerek tasarımlar hazırlanmıştır. 4 adet beton tasarımının hazırlanmasında kullanılan bileşenlere ait ortalama değerler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışma kapsamındaki beton tasarımların ortalama karışım oranları (40 dm3 için)

Parametre	Birim	Miktar
Agrega (iri taneli çakıl)	(kg)	15.8
Agrega (orta boy çakıl)	(kg)	14.5
Agrega (kum)	(kg)	32.8
Portland Çimentosu (CEMII/B-LL))	(kg)	23
Su	(lt)	8.96
s/ç oranı		0.4
Hava	(%)	4.2
Süper akışkanlaştırıcı (Kimyasal katkı)	(g)	335
Hava Sürükleyici Katkı (Kimyasal katkı)	(g)	22.3

2.2. Tek eksenli basınç deneyi

Tek eksenli basınç testi, betonun basınca karşı dayanımını ölçmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Ancak, bu yöntem mevcut yapıya zarar vermektedir. Çünkü karot numunesi alındığında beton örneği, yapıya zarar vermeden çıkarılamamakta ve test için hazırlanan numune üzerine bir yük uygulanmaktadır. Uygulanan yük P ve numunenin taban alanı A olmak üzere tek eksenli basınç dayanımı Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$TEBD = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Laboratuvar ortamında doğrudan numunelerin kırılmasıyla elde edilen TEBD sonuçları ile hasarsız yöntemlerle dolaylı olarak tahmin edilen TEBD arasında genellikle ampirik, doğrusal olmayan ama korelasyonlu bir ilişki vardır. Malzeme özelliklerine ve koşullara bağlı olarak bu ilişkiler farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 1. Numune hazırlama ve ölçüm aşamaları

Yapının farklı bölgelerinden alınan karot örnekleri betonun genel kalitesini daha doğru bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Numune üzerine uygulanan yükün homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla, çapı ve yarıçapı doğru şekilde ayarlanan demir aparatlar kullanılmaktadır. Bu, testin doğruluğunu artıran bir faktördür. Kırılma anında uygulanan yükün, numunenin yüzey alanına oranı ile tek eksenli basınç dayanımı belirlenmektedir. Bu değer, yapının dayanıklılığı hakkında kritik bilgiler sunmaktadır. TEBD testi, mevcut ve yapım aşamasında olan yapıların yanı sıra özellikle eski yapılarla ilgili yapısal güvenliği değerlendirme açısından oldukça faydalıdır [25, 34, 36, 40, 41].

Çalışma kapsamında 28. günde TEBD deneyi uygulanarak bütün küp numunelerin dayanımları belirlenmiş ve üçer adet numunenin ortalamaları alınmıştır. Uluslararası standartlara göre elastik parametreler belirlenirken silindirik numuneler kullanılmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmada 150x150x150 mm’lik küp şeklindeki numunelerin dayanımları Eşitlik 2 kullanılarak 150x300 mm’lik silindirik numune dayanımında dönüştürülmüştür. Küp numunelerin basınç dayanımları silindirik

numunelerden yüksektir [37, 39]. Yüksek dayanımlı betonlarda silindir ve küp numuneler arasındaki dönüşüm katsayısının genellikle 0.91-1.07 arasında değiştiği kabul edilmiştir [37]. Bu durum, Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\frac{TEBD_{Silindir}}{TEBD_{Küp}} = 0.733 + \left(\frac{4.75TEBD_{Küp}}{1000} \right) \quad (2)$$

2.3. Ultrasonik yöntem

Betonda TEBD, yapının taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi açısından en kritik mekanik özelliklerden biridir. TEBD 'yi belirlemek bir amaç iken, bu amaca ulaşmak için kullanılan yöntemler hasarlı/hasarsız ya da yerinde/laboratuvarda olarak farklılık göstermektedir. Beton dayanımının belirlenmesi konusunda, geleneksel yöntemlere (karon alımı, TEBD) kıyasla alternatif olarak geliştirilen hasarsız tekniklerin (ultrasonik, radar, öz direnç vs.) kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Hasarsız yöntemler yapıya zarar vermeden, hızlı ve ekonomik çözüm sağlarken; genellikle dolaylı hesaplamalara ve ampirik bağıntılara dayanmaktadır [40]. Öte yandan, laboratuvar ortamında karot numunesiyle yapılan testler, çevresel etkilerden izole edildiği için daha tutarlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Ancak bu yöntem zaman alıcı ve maliyetlidir, ayrıca yapıdan numune alındığı için hasarlıdır. Hasarsız test yöntemleri, geleneksel karot alma işlemini tamamen ortadan kaldırmasa da özellikle ön tarama amacıyla, yapıya zarar verilmemesi istenen durumlarda, yaygın veya büyük alanların değerlendirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Böylece, hasarsız testler, karot testi ile desteklenerek kullanıldığında en güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Literatürde, laboratuvarda kırılan karot numunelerinin TEBD değerlerinin, yerinde yapılan testlere kıyasla daha doğru olduğu genel kabul gören bir görüştür [42]. Bu nedenle, değerlendirme yapılırken test yönteminin doğası, ölçüm ortamı, numune alma koşulları ve yorumlama gereklilikleri birlikte düşünülmeli; uygun yöntemin seçimi proje gereksinimlerine göre yapılmalıdır.

Ultrasonik ve elektrik öz direnç yöntemleri gibi dolaylı teknikler, betonun özellikleri hakkında bilgi vermektedir, ancak bu yöntemler bazen daha fazla yorumlama ve hesaplama gerektirebilmektedir. Dolayısıyla, beton dayanımının belirlenmesinde kullanılan her iki yöntemin de avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Tahribatlı yöntemler noktasal olarak daha kesin sonuçlar verebilirken, tahribatsız yöntemlerden ultrasonik hızlar dolaylı yaklaşımlar yapmakta ancak daha geniş alanlar hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca yapının oturduğu zeminde tahribatsız yöntemlerden sismik kırılma, öz direnç, mikrotremör ve bunun gibi hasarsız yöntemler, özellikle mevcut yapılar ve bu yapıların oturduğu zeminin kontrolü açısından, dolayısıyla da

insan sağlığı açısından önemli bir alternatif sunmaktadır [34, 43-54].

Ultrasonik yöntem, betonun içerisindeki ultrasonik dalgaların yayılma hızına dayanmaktadır. Betonun agrega, su/çimento oranı ve yoğunluk gibi faktörler, P ve S dalgalarını dalgaların hızını etkilemektedir. Böylece elde edilen ultrasonik hızlar, betonun basınç dayanımına yönelik önemli bilgiler verdiği için oldukça tercih edilmektedir [30, 33]. Ultrasonik yöntemin avantajları; betonun basınç dayanımı, iç yapısı ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, doğrudan kolon ve kirişlerde uygulanabilmesi, karot almayı gerektirmemesi, tamamen hasarsız bir yöntem olması, uygulanan bölgenin 2-boyutlu (2B) ve 3-boyutlu (3B) tomografik görüntüsünün elde edilmesine olanak sağlaması, noktasal değil de alansal bilgi sağlanması ve düşük maliyet ile hızlı sonuçlar vermesi şeklinde sıralanabilmektedir [34].

Laboratuvarda veya yerinde P ve S dalga hızlarını belirlenirken, numune yüzeyinin pürüzsüz ve düzgün olmasının, ölçüm doğruluğu üzerinde önemli etkisi vardır [34, 55, 56]. Ultrasonik cihaz, bir verici (Tx) ve alıcı (Rx) prob sistemine sahiptir. Bu cihaz, numunenin bir tarafından gönderilen dalganın diğer tarafta geliş zamanını kaydeder ve dalga hızı, Tx ile Rx arasındaki mesafenin bu geliş zamanına oranından hesaplanmaktadır [44, 55-57]. Bu ölçüm tekniği, çeşitli yapısal malzemelerde, özellikle beton, köprüler ve yollar gibi yerinde yapılan ölçümlerde kullanılabilmektedir.

Ultrasonik hızların analiz edilmesiyle, sadece betonun mekanik özellikleri değil, aynı zamanda beton içerisindeki kırıklar, boşluklar ve bozulmalar hakkında da bilgi edinilebilmekte dolayısıyla heterojenlikler kolayca ayırt edilebilmektedir. Ultrasonik dalgalar boşluklardan yansımakta veya kırılmaktadır. Bu durum dalgaların giriş hızında yavaşlamaya, sinyalin zayıflamasına veya hiç ulaşmaması gibi etkilere sebep olmaktadır. Dalgaların geçtikleri ortamlarda çatlakların varlığı söz konusu ise, dalgalar oradan geçerken sapma veya yayılma gecikmesi olmaktadır. Tekrarlanan ölçümlerde ani hız değişimleri, kırık veya çatlak belirtisi olabilmektedir [23-25]. Ancak, yerinde yapılan ölçümlerde, donatı üzerinde ölçüm yapıp yapılmadığının belirlenmesi, beton özelliklerinin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için önemlidir. Ultrasonik dalga donatı üzerinden geçtiğinde, ölçülen hız yüksek çıkmakta ve böylece gerçek beton kalitesi olduğundan iyi olarak yorumlanmaktadır [33, 58].

2.4. Betonun elastik modülleri

Elastik modüller; Elastisite modülü (E), Kayma modülü (G) ve Bulk modülünden (K) oluşmaktadır. Bu parametreler hesaplanma şekline göre statik ve dinamik modüller olarak ikiye ayrılmaktadır. Statik elastik modüller TEBD sonuçlarına bağlı olarak

belirlenebilirken; dinamik Elastik parametreler ise tahribatsız test tekniklerinden olan Ultrasonik yöntem yardımıyla belirlenen basınç (V_p) ve kayma (V_s) dalga hızlarından hesaplanabilmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda dinamik elastik modüller genel itibarıyla statik elastik modüllerden %20 daha yüksek değerlerde bulunurken bu değer orta dayanımlı betonlarda %30 ve düşük dayanımlı betonlarda ise %40 civarındadır [20].

2.5.1. Betonun statik ve dinamik elastisite modülleri

Elastisite modülü, bir malzemenin elastik davranışını tanımlayan ve onun deformasyona karşı gösterdiği direnç ile doğrudan ilişkili temel bir mekanik özelliktir. Özellikle beton gibi gevrek ve yapısal malzemelerde, elastisite modülü, malzemenin ne kadar sert olduğunu ve uygulanan yükler altında ne kadar şekil değiştireceğini belirlemede kritik rol oynamaktadır. Betonun elastisite modülünün bilinmesi, mühendislik tasarım ve analiz süreçleri açısından son derece önemlidir. Çünkü, betonarme yapılarda meydana gelen gerilmeler ve yer değiştirmeler, doğrudan yapı elemanlarının elastik deformasyon kapasitesine bağlıdır. Böylece, uygulanan yük altında betonun ne kadar gerileceği veya sıkışacağı önceden tahmin edilebilmektedir. Ayrıca, betonarme yapıların güvenli ve ekonomik şekilde tasarlanabilmesi için, elastisite modülünün doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer, yapı elemanlarının eğilme, burkulma ve yer değiştirme davranışlarını etkileyen en temel mekanik parametrelerden biridir [17].

Betonun elastik modülü orta ve yüksek dayanımlı, düşük gözenekli ve normal ağırlıklı betonlar için genellikle 25- 50 GPa arasında değişmektedir, ancak bu değer kullanılan malzeme türüne ve karışım oranlarına göre farklılık gösterebilmektedir. Literatürde bazı araştırmacılar ampirik bağıntılar ile $TEBD$ değerlerinden elastisite modülüne yaklaşım yapılabileceğini ortaya koymuşlardır [59-62].

Betonun elde edilmesinde kullanılan ve viskoz bir karışım olan çimento hamuru, beton malzemenin birim şekil değiştirmesinin betonu oluşturan katı malzemenin birim şekil değiştirmesinden farklı olmasını sağlamaktadır. Bu durumun temel sebepleri beton içerisindeki agregaların elastik ve rijit davranışlar sergilemesine karşılık çimento hamurunun elastik ve viskoz (zamana bağlı deformasyon) davranış sergilemesidir. Bu nedenle beton, yük altında iken homojen bir şekilde deformasyon gösteremediği için heterojen yapıdadır. Statik elastisite modülü tek eksenli basınç testi esnasında elde edilen gerilme-deformasyon eğrisi vasıtasıyla belirlenmektedir. Ancak, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesi zor ve uzun süren deneysel çalışmalar gerektirmektedir. Bundan dolayı kolay ve pratik bir yol olması açısından elastisite

modülünün beton basınç dayanımından elde edildiği bağıntılar kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar için statik elastisite modülü dünya çapındaki birçok standarda göre tanımlanan eşitlikler yardımıyla GPa cinsinden ampirik olarak hesaplanabilmektedir. TSE standartlarında [10] statik elastisite modülü Eşitlik 3'te tanımlanmıştır.

$$E_s(TSE) = 3.25(TEBD)^{0.5} + 14 \quad (3)$$

ACI (Amerika Beton Enstitüsü) standartlarında [11] statik elastisite modülü Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$E_s(ACI) = 3.32(TEBD)^{0.5} + 6.9 \quad (4)$$

Sadece yüksek dayanımlı betonlar için ise CEB (Avrupa Beton Komitesi) standartlarında [13] statik elastisite modülü Eşitlik 5'te gösterilmektedir.

$$E_s(CEB) = 10(TEBD + 8)^{1/3} \quad (5)$$

Statik elastisite modülü NS (Norveç) standartlarında [12] ise Eşitlik 6'daki gibi tanımlanmıştır.

$$E_s(NS) = 9.5(TEBD)^{0.3} \quad (6)$$

Basınç (P) dalga hızının (V_p) yanı sıra kayma (S) dalga hızlarının (V_s) da belirlenmesi ile elde edilen hız oranı yardımıyla ve dinamik kayma modülüne (G_d) bağlı olarak dinamik elastisite modülü (E_d) Eşitlik 7'den hesaplanabilmektedir [63, 64].

$$E_d = 3G_d \left[\frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - \frac{4}{3}}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \right] \quad (7)$$

Bu modül betonun esneme direnci ve sağlamlığı hakkında bilgi vermektedir [64].

2.5.2. Betonun statik ve dinamik kayma modülleri

Kayma modülü, bir malzemenin kayma gerilmesine karşı gösterdiği dirençtir ve bu, malzemenin elastik özelliklerinin bir ölçüsüdür. Yanal yönde bir kuvvet uygulandığında, malzeme kayma gerilmesi üretir ve bu gerilme, malzemenin kayma deformasyonuna oranlanarak kayma modülü elde edilmektedir.

Elastisite modülü ve Poisson oranına bağlı olarak statik kayma modülü (G_s) Eşitlik 8'den hesaplanmaktadır.

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)} \quad (8)$$

G_s , TSE standartlarında Poisson oranının 0.2 olarak kabul edilmesine bağlı olarak;

$$G_s = 0.4E_s \quad (9)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. G_d -ise yoğunluk (bha, γ) (gr/cm^3) ve S dalga hızı (km/s) ile hesaplanmaktadır.

$$G_d = \frac{\gamma V_s^2}{g} \quad (10)$$

Burada g yer çekim ivmesidir. Yoğunluk ise ultrasonik hızlar yardımıyla hesaplanabilmektedir [65].

$$\gamma = 0.7(V_p V_s)^{0.08} \quad (11)$$

Kayma modülü, betonun kayma kuvvetlerine karşı gösterdiği dirençle doğrudan ilgilidir. Betonun kayma modülü büyükse, beton daha fazla esneme gösterir ve bu da depremdeki S dalgası gibi etkilerle başa çıkabilmesine yardımcı olmaktadır. Kayma modülünün düşük olması ise, betonun kayma gerilmelerine karşı daha az direnç göstermesi anlamına gelmektedir. Bu durum, betonun daha az rijit, dolayısıyla daha fazla şekil değiştirebilen bir yapı sergilemesine yol açmaktadır. Ancak, betonun plastik deformasyon kapasitesi sınırlı olduğundan, bu şekil değişimi genellikle çatlak oluşumu ve kırılma ile sonuçlanmaktadır. Özellikle bağlantı bölgelerinde ve çekme etkisinin yoğun olduğu noktalarda, düşük kayma modülü; çatlak ilerlemesi, aderans kaybı ve yapısal zayıflıklara neden olabilmektedir. Bu nedenle, betonarme yapıların tasarımında kayma rijitliği göz önünde bulundurulmalıdır [66].

2.5.3. Betonun statik ve dinamik bulk modülleri

Sıkışmazlık (bulk) modülü, bir malzemenin, özellikle beton gibi, hacimsel deformasyonlara karşı gösterdiği dirençle ilgilidir. Sıkışmazlık modülü, hidrostatik basınç altındaki bir malzemenin hacimsel değişimini ölçen bir parametredir. Yani, belirli bir basınç uygulandığında, bu malzemenin hacminde ne kadar küçülme (ya da genellikle genişleme) olduğunu göstermektedir. Beton gibi sert malzemelerde, sıkışmazlık modülü yüksek olursa, malzeme daha az sıkışır ve hacminde daha az değişiklik olur. Elastisite modülü ve Poisson oranına bağlı olarak statik bulk modülü (K_s) Eşitlik 12'den hesaplanabilmektedir [67].

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2\mu_s)} \quad (12)$$

Dinamik bulk modülü (K_d) ise, betonun yoğunluğu ve ultrasonik hızlar yardımı ile;

$$K_d = G_d \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - \frac{4}{3} \right] \quad (13)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

2.5.4. Betonun statik ve dinamik Poisson oranı

Poisson oranı (ya da Poisson katsayısı), malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlayan bir parametredir ve

genellikle bir malzemenin elastik davranışını anlamada kullanılmaktadır. Bu oran, bir malzeme üzerine boyuna doğrultuda uygulanan bir yük sonucu oluşan boyuna deformasyon ile, aynı malzemenin enine doğrultuda oluşan deformasyon arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

Poisson oranı, genellikle μ ile gösterilerek aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\mu_s = \frac{\left(\frac{\Delta a}{a} \right)}{\left(\frac{\Delta L}{L} \right)} \quad (14)$$

Burada $\frac{\Delta a}{a}$: enine deformasyon; $\frac{\Delta L}{L}$: boyuna deformasyondur.

Poisson oranı, 0-0.5 arasında değerler alabilmektedir. Ancak, çoğu elastik katılar için ortalama Poisson oranı değeri 0.25 civarındadır [68]. Uluslararası standartlarda statik Poisson oranı (μ_s) için her ülke farklı kabuller yapmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar için Poisson oranı genellikle 0.2-0.3 aralığında değişmekle birlikte [9, 34-36, 69-71] TSE, ACI, CEB ve NS standardında 0.2 kabul edilmektedir [10-13]. Dinamik Poisson oranı (μ_d) olarak ultrasonik hızlardan hesaplanabilmektedir. Bir malzemedeki gözeneklerin su veya havaya doygunluğunun değerlendirilmesi açısından Poisson oranı önemlidir. Poisson oranı ultrasonik hız oranına (V_p/V_s) doğrudan bağlıdır [35, 36, 64, 72].

$$\mu_d = \left[\frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{2 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2} \right] \quad (15)$$

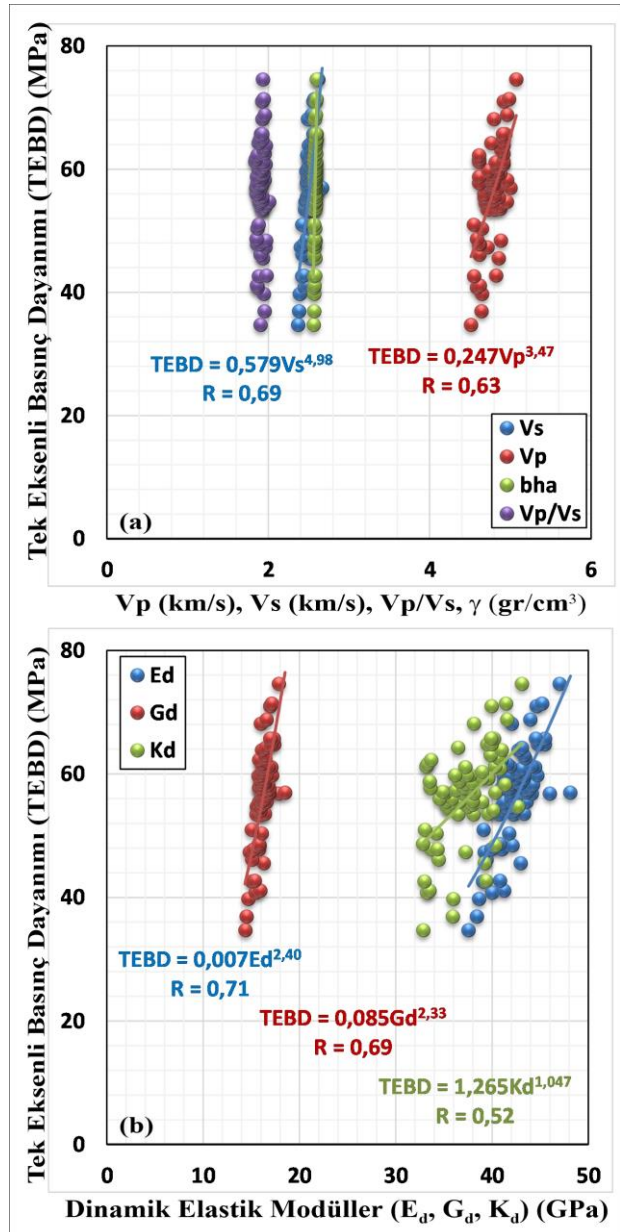
Betonda gözeneklerin su ya da havaya doygunluğu Poisson oranına bağlı olarak belirlenebilmektedir-[17, 36]. Özellikle beton gibi malzemelerde, Poisson oranının yüksek değerleri, betondaki gözeneklerin suyla doygun olduğunu gösterebilmektedir. Bu durum, betonun su emme kapasitesini ve dayanımını etkileyebilmektedir. Öte yandan, düşük Poisson oranı, malzemenin daha fazla hava dolayısıyla gözenekli olduğunu ve bu durumun betonun dayanıklılığını düşürebileceğini göstermektedir. P ve S dalga hızları ise, malzemenin elastik özelliklerini, özellikle dayanıklılığıyla ilgili daha net bilgiler sunabilmektedir. Bu dalga hızlarının incelenmesi, malzemenin iç yapısındaki özellikler (boşluk, kırık gibi) hakkında daha doğru bir değerlendirme yapmayı sağlamaktadır [36, 64].

3. Bulgular

Yapılan çalışmada yüksek dayanımlı betonlara ait dinamik ve statik elastik parametreler ile tek eksenli basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Buna göre, öncelikle Şekil 2a'da yüksek dayanımlı betonlara ait P ve S dalga hızları, hız oranı (V_p/V_s) ve yoğunluk değerleri ile tek eksenli beton basınç dayanımları arasındaki ilişkilendirmeler sunulmuştur.

Bunun yanı sıra yine Şekil 2b’de, yüksek dayanımlı betonların dinamik elastik parametreleri (E_d , G_d , K_d) ile tek eksenli beton basınç dayanımlarının değişimi araştırılmıştır. Buna göre V_p hızları 4.4-5.2 km/s, V_s hızları ise 2.3-2.8 km/s aralığında bulunmuştur. Yoğunluk değerleri genel itibarıyla 2.5 gr/cm³ olarak belirlenirken hız oranı V_p/V_s ise 1.7-2.1 aralığında bulunmuştur. Ayrıca, dinamik elastisite modülü 37-49 GPa, dinamik kayma modülü 14-19 GPa, dinamik bulk modülü 32-44 GPa ve dinamik Poisson oranı 0.28-0.35 aralığında bulunmuştur.

Ayrıca, küp numunelerin tek eksenli basınç dayanımları Eşitlik 2 kullanılarak 4 adet tasarım için (D1, D2, D3 ve D4) sırasıyla 38-54 MPa, 54-57 MPa, 57-60 MPa ve 60-70 MPa olarak bulunmuştur. Daha sonra, bu numunelerin dayanımları uluslararası standartlardaki elastik modüllerin karşılaştırılması amacıyla küp şeklindeki numunelerin dayanımları literatürdeki Eşitlik 2 yardımıyla [37] silindirik numune dayanımlarına dönüştürülmüştür. Buna göre D1 tasarımına ait betonları dayanımı 34.71-53.43 MPa, D2 tasarımı 53.56-57.09 MPa, D3 tasarımı 57.34-60.82 MPa ve D4 tasarımı 61.08-74.59 MPa silindirik numune dayanımlarına sahip bulunmuştur.



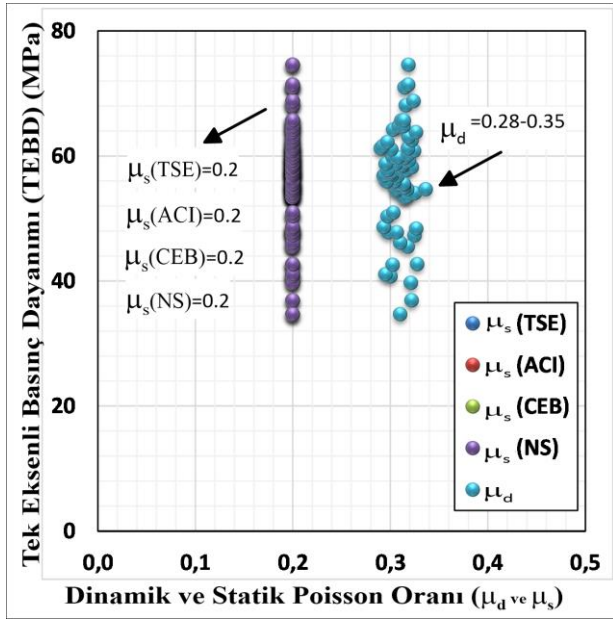
Şekil 2. Yüksek dayanımlı betonlara ait a) P ve S dalga hızları, V_p/V_s oranı ve yoğunluk (bha) değerleri ile b) dinamik elastik modüller (E_d , G_d , K_d) ve tek eksenli beton basınç dayanımları arasındaki ilişkilendirmeler

Yüksek dayanımlı betonlarda bağımlı değişkenler olan P ve S dalga hızları ile dinamik elastik modüller (E_d , G_d , K_d) ve bağımsız değişken TEBD arasındaki ilişki denklemleri Tablo 2’de verilmiştir. Buna göre, aralarında pozitif yönlü üstel ilişkiler olduğu ve dayanım değerlerinin geniş bir alanda yayılmasından dolayı ve ayrıca agrega tipi, nem oranı gibi parametrelerin mikroyapısal değişkenliğe sebep olası gibi nedenlerle korelasyon katsayılarının (R) 0.52-0.71 aralığında bulunduğu gözlenmiştir. Bu durumda ilişkilerin iyi bir lineerlik sergilememesi, yüksek dayanımlı betonlarda dinamik parametrelerin TEBD’yi tahmin etmede etkili olduğunu, ancak yapısal heterojenlik nedeniyle tek başına yeterli olmadığını göstermektedir.

Tablo 2. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki denklemleri

Bağımsız değişken	Birim	İlişki denklemi ($y=ax^b$)	R
V_p	km/s	$TEBD = 0.247 \cdot V_p^{3.47}$	0.63
V_s	km/s	$TEBD = 0.579 \cdot V_s^{4.98}$	0.69
E_d	GPa	$TEBD = 0.007 \cdot E_d^{2.4}$	0.71
G_d	GPa	$TEBD = 0.085 \cdot G_d^{2.33}$	0.69
K_d	GPa	$TEBD = 1.265 \cdot K_d^{1.047}$	0.52

Şekil 3'te Yüksek dayanımlı betonlarda elastik teoriden elde edilen μ_d ve farklı standartlarda kabul edilen μ_s ile TEBD karşılaştırılması sunulmuştur. Buna göre statik Poisson oranının sabit bir değer olarak 0.2 alınmasına karşın dinamik Poisson oranının 0.28-0.35 aralığında değiştiği belirlenmiştir.

**Şekil 3.** Yüksek dayanımlı betonların dinamik ve statik Poisson oranı (μ_d ve μ_s) ile tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4'te yüksek dayanımlı betonların farklı standartlardaki (TSE, ACI, CEB ve NS) statik elastik modülleri (elastisite, kayma ve bulk) ile tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması sunulmuştur.

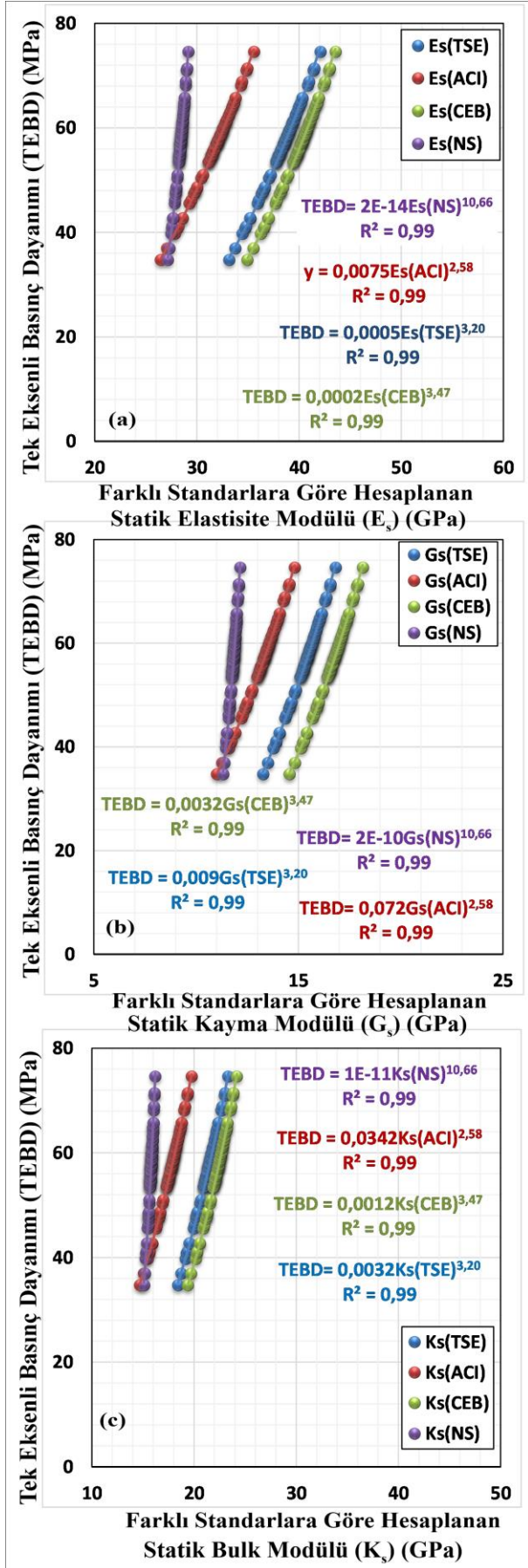
Buna göre, statik elastik parametrelerdeki değişim incelendiğinde NS standardına göre belirlenen elastik modüller daha dar bir aralıkta değişirken, ACI, CEB ve TSE standardında daha geniş bir aralıkta değişmektedir. Statik elastisite modülü NS, ACI, TSE ve CEB standardında sırasıyla 26-30 GPa, 26-36 GPa, 32-42 GPa ve 34-44 GPa aralığında değişmiştir. Buna karşın, kayma modülü sırasıyla 12-13 GPa, 11-16 GPa, 13-17 GPa ve 15-19 GPa aralığında bulunmuştur. Bulk modülü değerleri ise sırasıyla 12-14 GPa, 12-18 GPa, 16-22 GPa ve 18-24 GPa aralığında hesaplanmıştır. Ayrıca yine Şekil 4'te incelendiğinde, statik elastik modüller arttıkça tek eksenli basınç dayanımlarının da arttığı gözlenmiştir.

Genel itibarıyla nispeten TSE ile CEB standartları ve ACI ile NS standartlarından belirlenen statik elastik parametreler birbirine yakın değerlerde bulunmakla birlikte her bir uluslararası standartta farklı elastik modül değerleri bulunmuştur. Her bir standart için elastik parametrelerden TEBD değeri belirlenirken elde edilen eşitliklerde üs değeri aynı olmakla birlikte sadece katsayıdaki farklılık ile elastisite, kayma ve bulk modüllerinden TEBD değerlerine yüksek doğrulukla yaklaşım yapılabildiği gözlenmiştir. Bütün bağıntılarda belirlilik katsayısı (R^2) 0.99 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla aralarında pozitif yönde üstel bir ilişkinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Yüksek dayanımlı betonlarda bağımlı değişkenler olan statik elastik modüller (E_d , G_d , K_d) ve bağımsız değişken TEBD arasındaki ilişki denklemleri 4 ayrı uluslararası standart göz önünde bulundurularak Tablo 3'de ayrı ayrı verilmiştir. Buna göre, aralarında pozitif yönlü üstel ilişkiler olduğu ve belirlilik katsayılarının oldukça yüksek bulunduğu gözlenmiştir.

Tablo 3. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki denklemleri

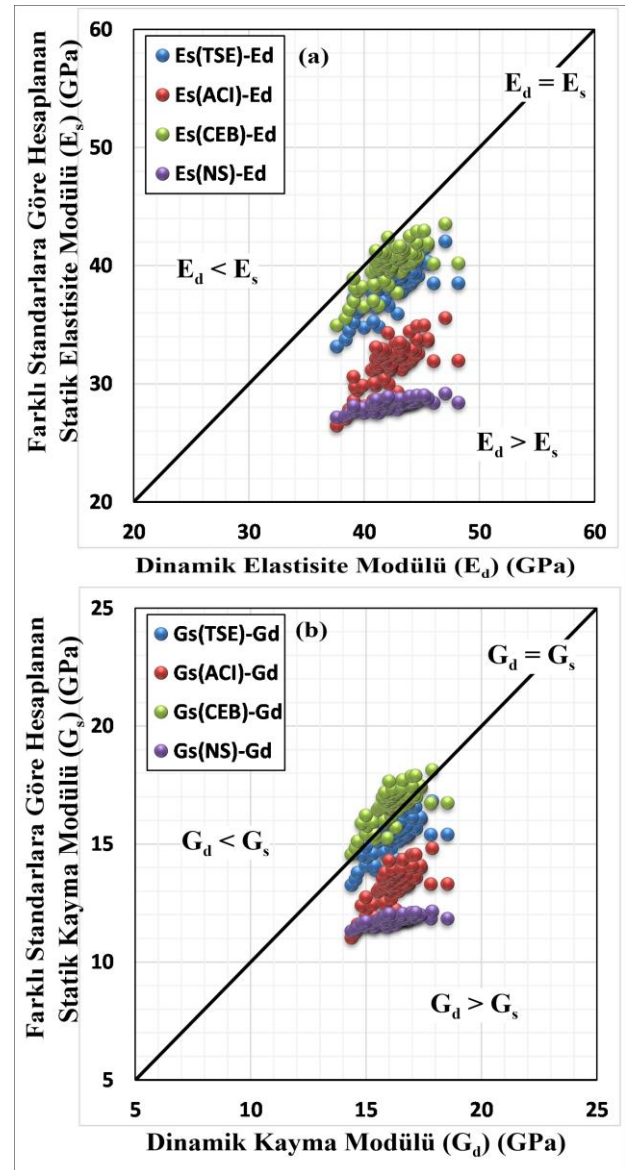
Bağımsız değişken (GPa)	İlişki denklemi ($y=ax^b$) (MPa)	Belirlilik katsayısı (R^2)
$E_s(TSE)$	$TEBD = 0.0005 \cdot E_s(TSE)^{3.2}$	0.99
$G_s(TSE)$	$TEBD = 0.009 \cdot G_s(TSE)^{3.2}$	0.99
$K_s(TSE)$	$TEBD = 0.0032 \cdot K_s(TSE)^{3.2}$	0.99
$E_s(ACI)$	$TEBD = 0.0075 \cdot E_s(ACI)^{2.58}$	0.99
$G_s(ACI)$	$TEBD = 0.072 \cdot G_s(ACI)^{2.58}$	0.99
$K_s(ACI)$	$TEBD = 0.0342 \cdot K_s(ACI)^{2.58}$	0.99
$E_s(CEB)$	$TEBD = 0.0002 \cdot E_s(CEB)^{3.47}$	0.99
$G_s(CEB)$	$TEBD = 0.0032 \cdot G_s(CEB)^{3.47}$	0.99
$K_s(CEB)$	$TEBD = 0.0012 \cdot K_s(CEB)^{3.47}$	0.99
$E_s(NS)$	$TEBD = 2 \cdot 10^{-14} \cdot E_s(NS)^{10.66}$	0.99
$G_s(NS)$	$TEBD = 2 \cdot 10^{-10} \cdot G_s(NS)^{10.66}$	0.99
$K_s(NS)$	$TEBD = 1 \cdot 10^{-11} \cdot K_s(NS)^{10.66}$	0.99



Şekil 4. Yüksek dayanımlı betonlarda a) E_s -TEBD b) G_s -TEBD-ve c) K_s -TEBD karşılaştırılması

Şekil 5 ve 6'da yüksek dayanımlı betonların farklı standartlardaki (TSE, ACI, CEB ve NS) statik ve dinamik elastisite, kayma ve bulk modülleri ile Poisson oranlarının karşılaştırılması sunulmuştur. Buna göre, genel itibariyle dinamik elastik parametreler statik elastik parametrelere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Dinamik ve statik elastisite modülü değeri CEB standardında birbirine en yakın değerlerde bulunurken, aralarındaki farklılığın en fazla NS standardında olduğu bulunmuştur.

Statik ve dinamik kayma modülü değerlerinin başta TSE ve CEB standartlarında olmak üzere birbirine oldukça yakın elde edildiği belirlenmiştir. Bulk modülü değerleri karşılaştırıldığında ise özellikle NS standartlarında aradaki farkın oldukça fazla olduğu ve dinamik bulk modülü değerinin statik modülden yüksek bulunduğu gözlenmiştir.

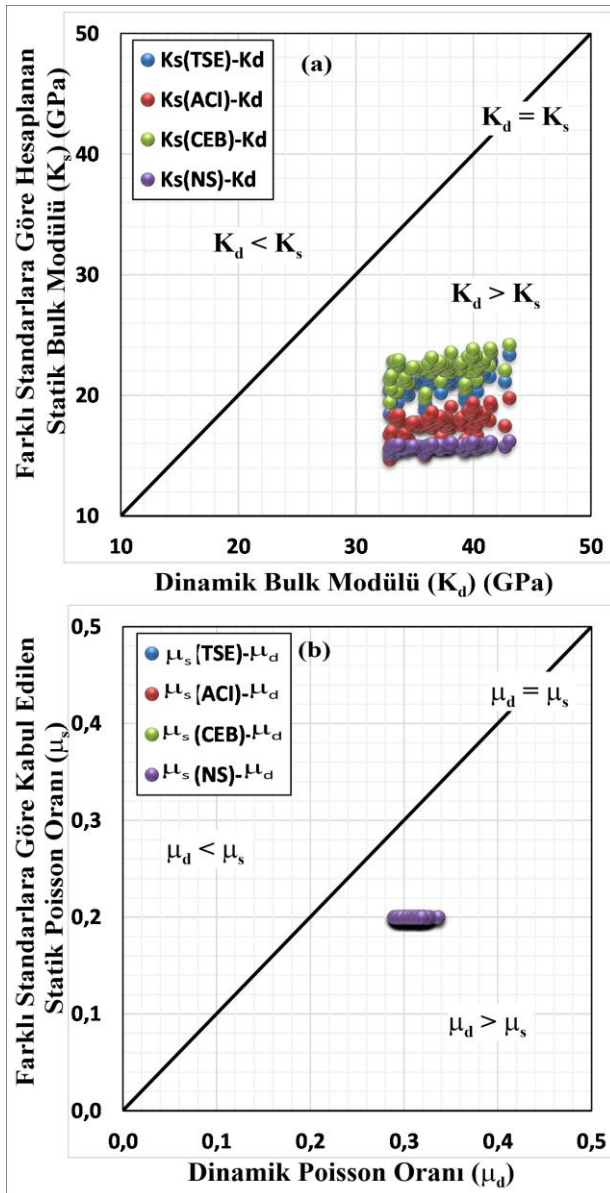


Şekil 5. Yüksek dayanımlı betonların statik ve dinamik a) elastisite ve b) kayma modüllerinin karşılaştırılması

Yüksek dayanımlı betonlar için NS standardında statik bulk modülü 12-14 GPa aralığında iken dinamik bulk

modülü 32-44 GPa aralığında bulunmuştur. Yüksek dayanımlı betonlarda dinamik Poisson oran değeri 0.28-0.35 aralığında değişirken, statik Poisson oranı TSE, ACI, CEB ve NS standartlarında sabit bir değer ve 0.2 olarak kabul edilmektedir.

Poisson oranının sabit alınması elastik modül hesaplamalarındaki farklılıklar üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Bu parametrenin sabit kabul edilmesi ile daha yüksek elastik modül değerleri elde edilmektedir. Bu durumda, Poisson oranının sabit kabul edilmeyip beton dayanımına bağlı olarak belirlenmesi güvenli yapılaşma açısından bir avantaj sağlamakla birlikte, maliyet açısından dezavantajlı bir durum ortaya koyabilmektedir [36].



Şekil 6. Yüksek dayanımlı betonların statik ve dinamik a) Bulk modülü ve b) Poisson oranlarının karşılaştırılması

Dinamik elastik parametre değerlerinin statik elastik parametrelerden hangi oranda daha yüksek bulunduğunu ortaya koymak amacıyla, Şekil 5 ve 6 birlikte değerlendirildiğinde statik ve dinamik elastik

parametreler arasındaki yüzde (%) değişim miktarları Eşitlik 16 yardımıyla hesaplanarak Tablo 4'te sunulmuştur.

$$\% \text{ Değişim} = \frac{|x_2 - x_1|}{x_1} \times 100 \quad (16)$$

Bu çalışma için Eşitlik 16'da gösterilen X₁ ve X₂ değişkenleri sırasıyla dinamik ve statik elastik parametreleri temsil etmektedir.

Tablo 4. Farklı standartlardan hesaplanan statik elastik parametreler ve dinamik elastik parametreler arasındaki yüzde (%) değişim

Uluslararası Standart	Elastik Parametreler			
	E	G	K	μ
NS	32.9	26.8	57.5	35.4
CEB	5.5	3.8	40	35.4
ACI	25	18.2	52.5	35.4
TSE	9.5	5.2	42.7	35.4

Tablo 4 değerlendirildiğinde statik ve dinamik elastik parametreler arasındaki değişim en az CEB standardında iken bunu sırasıyla TSE, ACI ve NS standartları izlemiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Jeofizik yöntemler, özellikle yapısal incelemelerde önemli avantajlar sunmaktadır. Klasik yöntemler, örnek olarak bir bölgedeki betonun durumunu analiz ederken, jeofizik yöntemler yapının tamamını taramaktadır. Bu sayede sadece belirli bir noktadan değil, tüm yapı boyunca betonun dayanıklılığı, boşluklar, çatlaklar veya diğer yapısal sorunlar tespit edilebilmektedir.

Özellikle ultrasonik testler, betonun içinde ses dalgalarını kullanarak, iç yapı hakkında bilgi vermektedir. Ultrasonik yöntemlerin en büyük avantajı, hasarsız olması ve noktasal değil alansal bilgi vermesidir. Dolayısıyla, her iki yöntemin de kullanım ve yöntemlerin kombinasyonu, yapının tüm durumu hakkında daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır.

Okul, hastane, nükleer santral vb. yüksek dayanımlı yapıların elastik modül değerlerinin bilinmesi oldukça önem taşımaktadır. Bu anlamda tahribatsız test teknikleri ile yapıya hasar vermeden oldukça ekonomik ve hızlı bir şekilde beton basınç dayanımlarının ve elastik modüllerinin tahmin edilmesi mümkündür. Ayrıca, tahribatsız elde edilen dinamik elastik parametrelerden, tahribatlı olarak elde edilen dayanım değerlerinden hesaplanan statik elastik modüllere yaklaşım yapılabileceği ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışmada yüksek dayanımlı betonlar için farklı standartlardaki elastik modül hesaplamalarının birbirinden farklı çıktığı görülmektedir. Her ülkenin standardı elastik modülü farklı katsayılar veya

ampirik formüller kullanarak hesaplamaktadır. Örneğin TEBD değeri 30 MPa olması durumunda statik elastik modüller karşılaştırıldığı zaman TSE, ACI, CEB ve NS standartlarında Elastisite modülü sırasıyla 31.80 GPa, 25.08 GPa, 33.62 GPa ve 26.82 GPa olarak hesaplanmaktadır. Aynı dayanım için statik elastik modüller arasında yaklaşık %34'e kadar farklar vardır. Ayrıca ACI ve TSE gibi formüllerde üs ifadesi 0.5 olduğu için daha hızlı artış gösterirken (daha düşük dayanımlarda daha düşük, yükseklerde daha yüksek değerler verir), CEB ve NS denklemlerinde üs ifadesi 0.3 olduğu için daha dengeli ve yatay bir artış göstermektedir. Bu nedenle her zaman kullanılan standartla uyumlu bir Elastisite modülü değeri seçilmelidir. Tasarım hassasiyeti gereken özel projelerde, özellikle yüksek dayanımlı beton kullanılıyorsa, doğrudan statik elastisite deneyi yapılmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Elastik modül hesaplamalarının birbirinden farklı sonuçlar üretmesinin bir sebebi de özellikle statik kayma ve bulk modüllerinin hesaplanmasında Poisson değerinin her standartta sabit kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, Poisson değerinin dayanım değerlerine göre değişebildiği ve bu nedenle de sabit alınmasının doğru olmayacağı düşünülmektedir. Aynı beton sınıfı için farklı standartlara göre farklı elastik modül değerleri elde edilmesi gerilme, sehim (sünek davranış), rijitlik ve çatlama kontrolü gibi hesaplamalarda farklı sonuçlar doğuracaktır.

Küreselleşen inşaat sektöründe aynı projede farklı ülkelerden mühendisler, firmalar ve ekipmanlar kullanılabiliyor. Bu durumda hangi standardın temel alınacağı ve betonun elastik modülü farklı ülkelerce farklı belirlendiğinde hesapların tutarlılığının nasıl sağlanacağı gibi konular ciddi koordinasyon ve iletişim sorunlarına yol açabilecektir. Elastik modül düşük alındığında, yapı daha esnek görülmekte ve daha büyük deformasyonlar, daha büyük kesitler gerekebilmektedir. Bu durum gereksiz maliyet artışına sebep olacaktır. Elastik modül yüksek alındığında ise yapı daha rijit gibi görülmekte ve gerçek davranışı yansıtmazsa çatlama, servis ömrü kısalması gibi riskler doğmaktadır. Bu nedenlerle betonun elastik modülünün hangi standarda göre hesaplandığı mutlaka belirtilmeli ve projedeki hesaplamalar buna göre uyumlu hale getirilmelidir. Aksi halde, yapının performansı ciddi biçimde etkilenebilecektir.

Teşekkür

Makalenin gelişmesine yaptıkları katkılardan dolayı sayın Editör, hakemler ve Prof. Dr. Osman UYANIK'a çok teşekkür ederim.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

Kaynakça

- [1] Sun, R. W., Fanourakis, G. C. 2022. An Assessment of Factors Affecting the Elastic Modulus of Concrete. Structural Concrete, 23, 593–603.
- [2] Demir, F. 2005. Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi İçin Bir Bulanık Yaklaşım. Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart, Kocaeli, 1353.
- [3] Emiroğlu, M., Yıldız S., Özgan, E. 2009. Lastik Agregalı Betonlarda Elastisite Modülünün Deneyisel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(3), 469-476.
- [4] Türk, K., Karataş, M., Tuğrul, P., Benli, A. 2010. Farklı Tip ve Miktarla Puzolan İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanımı ve Elastisite Modülü Arasındaki İlişki. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(3), 247-253.
- [5] Li, G., Zhao, Y., Pang, S., Li, Y. 1999. Effective Young's Modulus Estimation of Concrete. Cement and Concrete Research, 29(9), 1455-1462.
- [6] Huo, X. S., Al-Omaishi, N., Tadros, M. K. 2001. Creep, Shrinkage and Modulus of Elasticity of High-Performance Concrete. ACI Materials Journal, 98(6), 440-449.
- [7] Türkel, B. 2002. Betonda Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 79s.
- [8] Yılmaz, A. O., Arıoğlu, N., Arıoğlu, E. 2006. Investigation of Elastic Modulus/Compressive Strength Ratio in Normal and High Strength Concrete. Turkish Journal of Concrete Fabrication, 77-78.
- [9] Ekin, N., Uyanık, O. 2021. 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.

- [10] TS ISO 1920-10. 2015. Beton deneyleri-Bölüm 10: Basınç altında statik elastik modülünün belirlenmesi. TSE, Ankara.
- [11] ACI Committee 363. 2010. Report on High-Strength Concrete. ACI 363R-10. American Concrete Institute Committee 363, Farmington Hills, MI.
- [12] NS 3676. 1987. Concrete Testing, Hardened Concrete. Modules of Elasticity in Compression, Norway.
- [13] CEB-FIB. 1990. BullationD'Information. CEB, Laussane, Switzerland.
- [14] Shih, T. S., Lee, G. C., Chang, K. C. 1989. On Static Modulus of Elasticity of Normal-Weight Concrete. ASCE Journal of Structural Engineering, 115(10), 2579-2585.
- [15] Han, S. H., Kim, J. K. 2004. Effect of Temperature and Age on the Relationship Between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete. Cem. Concr. Res., 34(7), 1219-1227.
- [16] Ranchero, J. L. 2005. Analyzing and Determining Relationships in Elastic Properties of Concrete Using Wave Propagation and Vibration and Uniaxial Compression. University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, Illinois.
- [17] Zhou, Y., Gao, J., Sun, Z., Qu, W. 2015. A Fundamental Study on Compressive Strength, Static and Dynamic Elastic Moduli of Young Concrete. Construction and Building Materials, 98, 137-145.
- [18] Ersoy, U., Özcebe, G. 2001. Reinforced: Basic Principles TSI-500-2000 and Account According to Turkish Earthquake Code (1998). Expanded New Edition, Evrim Publ.
- [19] Lee, B. J., Kee, S. H., Oh, T., Kim, Y. Y. 2017. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 1651753, 13.
- [20] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. 2008. Concreto: Microestrutura. Propriedades e Materiais, 3 ed. São Paulo: IBRACON, 674s.
- [21] Lydon, F. D., Iacouou, M. 1995. Some Factors Affecting The Dynamic Modulus of Elasticity of High Strength Concrete. Cement and Concrete Research, 25(6), 1246-1256.
- [22] Nagy, A. 1997. Determination of E-Modulus of Young Concrete with Nondestructive Method. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 9(1), 15-20.
- [23] Ekin, N. 2021. 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.
- [24] Ekin, N. 2021. Concrete Anisotropy Estimated from Ultrasonic Signal Amplitudes. Materials Testing, 63(12), 1164-1173.
- [24] Ekin, N., Uyanık, O. 2021. Anisotropy of Reinforced Concrete from Geophysical Methods. Science of Sintering, 53(3), 323-345.
- [26] Popovics, J. S. 2008. A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete. in ACI-CRC Final Report.
- [27] Lee, B. J., Kee, S.-H., Oh, T., Kim, Y.-Y. 2015. Effect of Cylinder Size on The Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Concrete from Static and Dynamic Tests. Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 580638, 12s.
- [28] Carette J. Staquet, S. 2015. Monitoring The Setting Process of Mortars by Ultrasonic P and S-Wave Transmission Velocity Measurement. Construction and Building Materials, 94, 196-208.
- [29] Uyanık, O., Kaptan, K., Gülay, F. G., Tezcan, S. 2011. Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini. Yapı Dünyası, 184, 55-58.
- [30] Uyanık, O. 2012. Sismik Hızlardan Beton Dayanımının Belirlenmesi. Jeofizik Bülteni, 23(70), 25-30.
- [31] Uyanık, O., Tezcan, S. 2012. Beton Dayanımının Ultrasonik Yöntemle Tayini. Jeofizik Bülteni, 23(70), 41-45.
- [32] Uyanık, O., Gülay, F. G., Tezcan, S. 2012. Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini. Hazır Beton, 436, 82-85.
- [33] Sabbağ, N. 2016. Beton Kalitesinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 172s.
- [34] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2017. Prediction of Reinforced Concrete Strength by Ultrasonic Velocities. Journal of Applied Geophysics, 141, 13-23.
- [35] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2018. Doygun Betonların Statik ve Dinamik Elastik Parametrelerinin Karşılaştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(017201), 1181-1189.
- [36] Ekin, N. 2020. Betonların Elastik Modül Hesabında Poisson Oranının Önemi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6, 239-252.
- [37] Arıoğlu, E., Arıoğlu, N., Girgin, C. 1999. Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Şekil-Boyut Etkisi. Hazır Beton Dergisi, Ocak-Şubat, 40-50.

- [38] TS EN 12390-3. 2019. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- [39] Neville A.M. 1997. Properties of Concrete. John Wiley&Sons, New York.
- [40] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2018. Determination of the Reinforced Concrete Strength by Apparent Resistivity depending on the Curing Conditions. Journal of Applied Geophysics, 155, 13-25.
- [41] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2020. Determination of Anisotropy of Reinforced Concretes by Using the Resistivity Method. Pamukkale Univ. Journal of Engineering Sciences, 26(3), 570-578.
- [42] Neville, A.M. 2011. Properties of Concrete. Pearson Education Limited, Essex.
- [43] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2018. Determination of Reinforced Dry Concrete Strength by Electrical Resistivity Method. Pamukkale Univ. Muh. Bilim. Derg. 24(6), 1230-1236.
- [44] Öziçer S., Uyanık O. 2017. Beton Dayanımının Yerinde P Dalga Hızından Belirlenmesi ve İzmir Örneği. SDU International Journal of Technological Sciences, 9(1), 1-16.
- [45] Ateş E., Uyanık O. 2019. Jeofizik Yöntemler ile Yer ve Yapı Etkileşimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23, 46-60.
- [46] Ateş E., Uyanık, O. 2025. Comparison of soil-Structure Interaction Obtained from Spectral Ratio Methods Applied to Earthquake and Microtremor Records. Journal of Applied Geophysics, 234, 105645.
- [47] Uyanık, O., Gördesli, F. 2013. Sismik Hızlardan Taşıma Gücünün İncelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 5(2), 78-86.
- [48] Uyanık, O., Ekin, N., Çoşkun O. 2021. Attenuation Relationship for Peak Horizontal Acceleration From Ground and Earthquake Parameters. Dokuz Eylül University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering, 23(68), 575-593.
- [49] Uyanık, O., Çatlıoğlu, B. 2014. Determination of Landslide Geometry by Using Electrical Resistivity and Seismic Refraction Methods. Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 18(3), 22-29.
- [50] Ates, E., Uyanık, O., 2023. Comparison of Acceleration Records Measured at Different Depths. Turk Deprem Arastirma Dergisi, 5(2), 215-232.
- [51] Uyanık, O., Öncü, Z., Uyanık, N.A., Ekin, N. 2024. Seismic Microzonation and Geotechnical Modeling Studies Considering Local Site Effects for İnegöl Plain (Bursa-Turkey). Earth and Space Science, 11(11), e2023EA003460.
- [52] Uyanık, N., Öncü, Z., Uyanık, O., Bozcu, M., Akkurt, İ., Günoğlu, K., Yağmurlu, F. 2015. Distribution of Natural Radioactivity from Radioelement in Volcanics of Sandıklı-Şuhut (Afyon) Area. Acta Physica Polonica A, 128(2B), B438-440.
- [53] Uyanık, N., Öncü, Z., Uyanık, O., Akkurt, İ. 2015. Determination of Natural Radioactivity from with Gamma-Ray Spectrometer in Dereköy-Yazır (Southwestern Anatolia). Acta Physica Polonica A, 128(2B), B441-442.
- [54] Uyanık, A.N., Uyanık, O., Akkurt, İ. 2013. Micro-Zoning of the Natural Radioactivity Levels and Seismic Velocities of Potential Residential Areas in Volcanic Fields: The Case of Isparta (Turkey). Journal of Applied Geophysics, 98, 191-204.
- [55] 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(8), 6003-6016.
- [56] Ekin N., Uyanık N. A., Uyanık O. 2023. The Effect of Reinforcement on Seismic Velocities in Low Strength Reinforced Concrete. Türk Deprem Arastirma Dergisi, 5(1), 33-47.
- [57] Hongyu, S., Zhang, J., Fan, T., Li, Z. 2015. Electrical Method to Evaluate Elastic Modulus of Early Age Concrete, Construction and Building Materials, 101(1), 661-666
- [58] Malhotra, V.M., Carino, N.J. 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. CRC Press.
- [59] Najjar, M.F. Soliman, A.M. Nehdi, M.L. 2014. Critical Overview of Two-Stage Concrete: Properties and Applications. Constr. Build. Mater. 62, 47-58.
- [60] Saud, A. F., Abdelgader, H. S., El-Baden, A. S. 2014. Compressive and Tensile Strength of Two-Stage Concrete. Adv. Mater. Res., 893, 585-592.
- [61] He, S., Chen, C., Zhou, H., Jin, F. 2017. Current Research on Comprehensive Properties of Rock Filled Concrete. J. Hydroelectr. Eng., 36, 10-18.
- [62] Wang, H., M., J., Zhou, H., He, S., Jin, F. 2021. Mechanical Behavior of Rock-Filled Concrete With Uniaxial Compression. J Tsinghua Univ. (Sci Technol.), 6.
- [63] Telford, W. M., Geldart, L. P., Scheriff, R. E. 1993. Applied Geophysics. Cambridge University Press, London, 225s.
- [64] Uyanık, O., Şenli, G., Çatlıoğlu, B. 2013. Binaların Beton Kalitesinin Tahribatsız Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi. SDÜ Uluslararası Teknoloji Bilimler Dergisi, 5(2), 156-165.
- [65] Uyanık, O., Çatlıoğlu, B. 2015. Determination of Density from Seismic Velocities. Jeofizik, 17, 3-15.

- [66] Uyanık, O. 2014. Klasik ve Jeofizik Yöntemlerle Yapı İncelemeleri (Yapı Jeofiziği). TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, JFMO Eğitim Yayınları No:19., ISBN:978-605-01-0643-5, 80s.
- [67] Uyanık, O. 2015. Deprem Ağır Hasar Alanlarının Önceden Belirlenmesi ve Şehir Planlaması için Makro ve Mikro Bölgelendirmelerin Önemi. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(2), 24-38.
- [68] Doğangün, A. 2002. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul. 17. Basım., 768s.
- [69] Chia, K.S., Zhang, M.H. 2002. Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete. Cement and Concrete Research, 32, 639-645.
- [70] Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. 2003. Concrete, 2nd Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- [71] Mehta P.K., Monteiro, P.J.M. 2014. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill.
- [72] Tezcan, S.S., Keçeli, A., Özdemir, Z. 2010. Zemin ve Kayaçlarda Emniyet Gerilmesinin Sismik Yöntem ile Belirlenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi. 3(1), 1-10.