

Betonların Elastik Modül Hesabında Poisson Oranının Önemi

Nevbahar EKİN^{1,*}

¹Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 17.02.2020

Kabul: 02.09.2020

Yayın: 15.12.2020

Araştırma Makalesi

Öz – Betonarme yapıların tasarımında elastik parametreler hesaplanırken betonun esneme direnci ve sağlamlığını göstermesi açısından elastisite modülünün; makaslama direncine karşı betonun gösterdiği mukavemet açısından kayma modülünün ve özellikle betonun suya doygunluk derecesinin belirlenmesi açısından ise Poisson oranının doğru bir şekilde tanımlanması oldukça önemlidir. Betonun elastik parametrelerinin hesaplamaları ulusal veya uluslararası standartlarda bazı kabullere göre yapılırken, dinamik yöntemlerle tahribatsız bir şekilde belirlenen P ve S dalga hızlarından da bu elastik parametreler hesaplanabilmektedir. Bu kapsamda, dinamik yöntemle belirlenen Poisson oran değerleri değişkenlik gösterirken, standartlardaki gibi Poisson oranının 0.20 şeklinde sabit bir değer alınmasının elastik parametre hesaplamalarındaki avantaj ve dezavantajlarının ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, dayanımları farklı 12 beton tasarımına ait 108 adet 150x150x150 mm³ ebatlarındaki küp numuneler hazırlanarak P ve S dalga hızları ile Tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Daha sonra, dinamik yöntemlerden elde edilen parametreler kullanılarak hesaplanan elastik parametreler Poisson oranının sabit alınması ile elde edilen parametreler ile karşılaştırılmıştır. Belirli zaman aralıklarında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar, beton dayanımı ve zamana bağlı olarak elastik parametrelerin değişimini ortaya koymuştur. Ayrıca, Poisson oranının sabit ya da dinamik yöntemle belirlendiği şekilde değişken olması arasındaki değişimin elastisite ve kayma modülüne etkisi incelenmiştir. Buna göre, Poisson oranının hesaplamalarda sabit bir değer olarak alınması doğru değildir.

Anahtar Kelimeler – Poisson oranı, beton, elastisite modülü, kayma modülü, P ve S dalga hızları

The Importance of Poisson Ratio in the Calculation of Elastic Modulus of Concrete

¹Department of Geophysical Engineering, Faculty of Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

Article History

Received: 17.02.2020


Accepted: 02.09.2020

Published: 15.12.2020

Research Article

Abstract – When calculating elastic parameters in design of reinforced concrete structures, it is very important to correctly define elasticity modulus in terms of showing concrete flexibility resistance and strength; shear modulus in terms of the resistance of concrete against shear resistance; and especially the Poisson ratio in terms of determining the degree of water saturation of concrete. While the calculations of the elastic parameters of concrete are made according to some assumptions at national or international standards, these elastic parameters can be calculated from the P and S wave velocities determined non-destructively by dynamic methods. In this context, while Poisson ratio values determined by dynamic method are variable, it is aimed to reveal advantages and disadvantages of Poisson ratio in elastic parameter calculations obtained by obtaining a fixed value of 0.20 as in the standards. For this purpose, 108 samples of 150x150x150mm³ cubes of 12 concrete designs with different strengths were prepared and P and S wave velocities and uniaxial compressive strengths were determined. Then, elastic parameters calculated using parameters obtained from dynamic methods were compared with parameters obtained by taking Poisson ratio constant. The results obtained from measurements made in certain time intervals revealed change of elastic parameters depending on concrete strength and time. In addition, effect of change between Poisson ratio being constant or being variable as determined by dynamic method on elasticity and shear modulus was investigated. Accordingly, it is not correct to take Poisson ratio as a fixed value in calculations.

Keywords – Poisson ratio, concrete, elasticity module, shear module, P and S wave velocities

¹  nevbaharsabbag@sdu.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

Poisson oranı ile elastisite ve kayma modülü gibi betonun elastik parametreleri betonarme yapıların mühendislik tasarımı ve analizinde öncelikli olarak kullanılan parametrelerdir. Bu parametreler statik veya dinamik yöntemlerle belirlenebilmektedir (Fei vd., 2016). Basınç altındaki bir beton numunesinin deformasyonu ölçülerek statik elastik parametreler, beton içerisinde yayılan elastik dalgalar kullanılarak ise dinamik elastik parametreler belirlenmektedir. Ancak statik testlerde, sıkıştırma kuvvetleri numunenin hacminde bir azalmaya neden olan deformasyonlar üretirken, dinamik testler çok az deformasyona neden olmakta veya hiç deformasyona neden olmamaktadır (Anson ve Newman, 1966; Öziçer ve Uyanık, 2017; Ahmed, 2018; Sabbağ ve Uyanık, 2018a). Mühendislik hesaplamalarda genellikle statik elastik parametreler kullanılmaktadır. Bu nedenle betonarme yapının güvenilir bir şekilde değerlendirilmesinde statik ve dinamik mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi belirlemek oldukça önemlidir. Ancak, statik testlerde iyi sonuçlar elde edilebilmesi için çalışılan alandan karot numune alınması, özel test aparatlarının kullanılması ve ileri teknoloji gerekmektedir (Hongkui vd., 2001). Dinamik yöntemler ise basit, hızlı ve daha ekonomik olması nedeniyle oldukça avantajlıdır. Ayrıca, sismik hızların numune şeklinden etkilenmemesi nedeniyle küp ve silindirik numunelerde veya yerinde ölçü alınabilme imkânına da sahiptir (Uyanık vd., 2011; Uyanık vd., 2012; Uyanık vd., 2013; Uyanık, 2012; Uyanık ve Tezcan, 2012; Öziçer ve Uyanık, 2017). Ek olarak, aynı numune üzerinde tekrarlı ölçümler alınarak zamana bağlı bu parametrelerdeki değişimin takip edilebilmesi açısından da oldukça avantajlıdır.

Laboratuvarda veya yerinde ölçü alınma olanağı sağlayan dinamik ultrasonik yöntem, P ve S dalga hızlarının beton içerisinde geçiş sürelerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır (Sabbağ ve Uyanık, 2016; Sabbağ ve Uyanık, 2017; Özçelik ve Gelişli, 2018; Sabbağ ve Uyanık, 2018b; Uyanık vd., 2019). Bu iki hızın bir arada kullanılması ile dinamik elastik parametreler ve Poisson oranı kolaylıkla belirlenebilmektedir. Ancak, statik yöntemlerle hesaplanan elastisite modülü homojen malzemeler için geçerli olduğundan dolayı, dinamik yöntemlerle hesaplanan değerlerden farklılıklarının olduğu bilinmektedir (Krech vd., 1974; Eissa ve Kazi, 1988; Atıcı ve Yünsel, 2011). Aynı durumun Poisson oranı içinde geçerli olması beklenmektedir (Gerçek, 2004; Atıcı ve Yünsel, 2011). Çünkü, dinamik Poisson oranı deneysel olarak belirlenirken uygulanan testlerin fiziksel durumu statik yüklemekten tamamen farklıdır. Statik ve/veya dinamik Poisson oranlarının kayaç veya betonlarda belirlenmesi üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Naus, 2006; Atıcı ve Yünsel, 2011; Kodur, 2014; Akkaya vd., 2017; Kee vd., 2019). Genellikle her iki yöntemle belirlenen Poisson oranları arasında belirgin bir ilişki gözlenmemiştir (Elsadig vd., 2014). Araştırmacılara göre, dinamik olarak belirlenen Poisson oranının, statik testlerden belirlenen orandan biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Brooks, 2015).

Çoğunlukla yol, tünel ve baraj gibi yapıların sayısal gerilme analizlerinde kullanılan Poisson oranı malzemenin elastik özelliklerini etkilemektedir (Timoshenko, 1970; Akkaya vd., 2017). Çok çeşitli agregalar kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda, normal ağırlıklı betonlarda statik Poisson oranının 0.18 (mermer agregalı) ve 0.36 (yuvarlak kuvars agregalı) arasında değiştiği belirlenmiştir (Brooks, 2015). Doğrusal bir elastik ve izotropik malzeme için Poisson'un oranı sabittir, ancak betonda Poisson oranı bazı özel koşullardan etkilenmektedir. Lydon ve Balendran (1986), sıkıştırma yükü altındaki gerilme ölçümlerinden belirlendiğinde betonun Poisson oranının 0.15 ile 0.22 arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Benzer Poisson oranı aralığı gerilme yükü altında da elde edilmiştir. Chao (2002) ve Wang (2004), çimentolu malzemelerdeki Poisson oran değerlerinin genel olarak 0.15 ile 0.3 arasında değiştiğini, Klink (1985) ise bu oranın 0.20-0.37 aralığında değiştiğini belirtmiştir. Yapısal beton tasarımı için BS EN 1992-1-1 (2004) standartlarında, çatlak içermeyen beton için Poisson oranının 0.2 ve çatlaklı beton için ise sıfır olması önerilmiştir. TSE standartlarında da beton için yine bu oran değeri 0.20 olarak kabul edilmektedir (TS ISO 1920-10, 2015).

Bu kapsamda yapılan çalışmada, farklı mukavemet özellikleri gösteren beton numuneler üzerinde, dinamik Poisson oranının sabit (tüm dayanım değerleri için 0.20 gibi bir değer) alınması veya değişken (ultrasonik yöntemle hız oranları kullanılarak hesaplanan gerçek değerler) alınmasının elastik modüller üzerindeki etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Her iki durum için ayrı ayrı elastisite ve kayma modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular karşılaştırılarak Poisson oranındaki farklılığa göre elastik modüllerdeki görecel hata miktarı dayanım (düşük, orta veya yüksek) türüne ve kür süresine bağlı olarak tanımlanmıştır. Düşük, orta ve yüksek dayanımdaki beton numuneleri kullanılarak geniş bir yelpazede hazırlanan bu çalışma, mühendislik hesaplamalarında oldukça önemli olan elastik parametre hesaplamalarının her iki durumda elde edilen sonuçlara göre aralarında oluşan farkı ortaya koyması açısından önemlidir. Ayrıca, Poisson oran değerinin

sabit alınmasının hatalı sonuçlar üretebileceği düşünülerek yapılan bu çalışma, standartların hazırlanmasında ve yapılacak bilimsel çalışmalarda bu durumun göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında, dayanımları farklı 12 beton tasarımına ait 108 adet 150x150x150mm ebatlarındaki küp numune hazırlanarak yoğunluklarının yanı sıra dinamik ultrasonik yöntemle P ve S dalga hızları ve tek eksenli basınç testi ile dayanımları belirlenmiştir. Ardından, sabit ve değişken Poisson oranlarının alınması ile elastik parametreler hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

2.1. Numunelerin Hazırlanması

Çalışmada, agrega türü olarak kırmataş agrega (%25 iri kırmataş, %23 orta kırmataş, %52 kum) ile birlikte Portland kompoze çimento (CEM II/B-LL), kimyasal katkıları (süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici) ve içilebilir su kullanılarak farklı dayanım özellikleri gösteren 12 farklı beton tasarımı (2.3-69.7MPa) hazırlanmıştır. Çok sayıda tasarım olduğu için makalede sadece 3 tane tasarıma ait parametreler Tablo 1’de gösterilmiştir. Her tasarımdan 9’ar adet numune olmak üzere toplamda 108 adet numune üzerinde ölçümler yapılmıştır. 3., 7. ve 28. günlerde ağırlık ve yoğunlukları belirlenen küp şeklindeki betonların üzerinde ultrasonik P ve S dalga ölçümleri yapıldıktan sonra her bir tasarımdaki 3’er tane numunenin tek eksenli basınç deneyi sonucunda dayanım değerleri belirlenerek ortalamaları alınmıştır. Numuneler ölçümlerinin yapılacağı zamana kadar laboratuvarında $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’deki kür havuzlarında bekletilmiştir.

Tablo 1

Çalışma kapsamında hazırlanan beton tasarımlarına ait örnek karışım oranları

Ölçülen Parametreler	40 dm ³ için kullanılan miktarlar (kg)		
	Düşük Dayanımlı Tasarım (T1)	Orta Dayanımlı Tasarım (T4)	Yüksek Dayanımlı Tasarım (T10)
Çimento (CEM II/B-LL)	3.2	8.0	32.0
Su (lt)	6.496	6.930	9.780
Su/çimento oranı (w/c)	2.03	0.87	0.31
Agrega (İri çakıl)	20.665	19.583	14.172
Agrega (Orta çakıl)	12.019	18.016	13.038
Agrega (Kum)	42.983	40.732	29.478
Kimyasal Katkı (Süper akışkanlaştırıcı)	48 g	120 g	480 g
Kimyasal Katkı (Hava sürükleyici)	3.2 g	8 g	32 g
Slump (Çökme)	12 cm	12.5 cm	12 cm
Hava	% 3.4	%4.6	%3.4

2.2. Ultrasonik Yöntem

Yapılan çalışmada, OYO SonicViewer SX (XP) cihazı yardımı ile 3., 7. ve 28. günlerde Ultrasonik ölçümler yapılmıştır. Yöntem uygulanırken, sırasıyla 200 kHz ve 100 kHz frekanslarına sahip P ve S problemleri arasında sıkıştırılan 150x150x150 mm ebatlarında küp şeklindeki numunelere P ya da S dalga darbesi gönderilerek karşılıklı ölçüm yöntemiyle numunenin P ya da S dalga seyahat zamanları ölçülmüştür. Ultrasonik cihazı ile ölçüme başlamadan önce cihazda P ve S dalgaları için ayrı ayrı sıfır ayarı yapılmalıdır. Böylece, elektrik pulsunun alınışı ile bunun bir sismik pulsa çevrilmesi işlemi esnasında ortaya çıkan gecikme giderilmektedir. Sıfır ayarı bittikten sonra dalgaların ölçümüne geçilebilmektedir. Numune yüzeyinin düzgün ve pürüzsüz olması da ölçümü etkileyen önemli faktörlerden biridir. Ultrasonik enerji hava boşluğu tarafından gecikmeye uğramaktadır. Bu yüzden numune ile alıcı-verici problemler arasında çok iyi bir iletimin sağlanması gereklidir. İletimin tam olarak sağlanabilmesi için P dalga ölçümlerinde gres yağı vb. iletimi artırıcı maddeler kullanılırken, S dalgası sadece katılarda yayıldığı için ölçümde bu gibi maddeler kullanılmamaktadır. Numune boyunun seyahat süresine oranlanması ile P ve S dalga hızları belirlenmiştir. Bu hızlar kullanılarak ilgili bağıntılar vasıtasıyla elastik modüller hesaplanmıştır.

2.3. Tek Eksenli Basınç Dayanım Testi

Hazırlanan küp şeklindeki suya doymun beton numuneler TS EN 12390-2 standardına göre ve her tasarımdan 3'er adet olmak üzere 3., 7. ve 28. günlerde, Form + Test Alpha marka tek eksenli basınç cihazı vasıtasıyla üniform basınç yükü altında kırılmıştır. Daha sonra elde edilen dayanım değerlerinin ortalamaları alınarak her bir tasarımın dayanım değeri belirlenmiştir. Numunelere uygulanan yükleme hızı TS EN 12390-3'e uygun olarak ortalama 13.5 kN/s (0.6 ± 0.2 MPa/s) olarak belirlenmiştir.

2.4. Poisson Oranına Bağlı Elastik Modüllerin Değişimi

Poisson oranı çoğu mühendislik alanında malzeme yapısının ortaya konulması amacıyla kullanılan parametrelerden biridir (Uyanık ve Ulugergerli, 2008; Uyanık, 2015; Akkaya vd., 2017). Bu oran özellikle betonun suya doymunluk derecesinin belirlenmesi açısından önemli bir parametredir ve bu nedenle betonun gözeneklerini yorumlamada kullanılabilir. Poisson oranı statik ve dinamik yöntemler kullanılarak belirlenebilir. Statik Poisson oranı (μ_s) pratikte tek eksenli basınç dayanım testi ile belirlenmektedir. Betonun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan temel deneylerden biri olan tek eksenli basınç dayanım testi sırasında hidrolik prese bağlanan elektro balans yardımıyla numuneye yük uygulandığında oluşan enine ve boyuna birim deformasyon değerleri belirlenmektedir (TS ISO 1920-10, 2015). Geleneksel bir üç eksenli basınç testinde ise, karot numunesi, sabit basınç altında eksenel olarak cihaza yerleştirilmektedir. Kavramsal olarak, eksenel gerilmenin tepe değeri numunenin basınç dayanım sınırı olarak alınmaktadır. Eksenel gerilmeye ek olarak, bu test sırasında temel elastik sabitleri belirlemek amacıyla eksenel ve radyal gerilmeler de görüntülenebilmektedir. Eksenel ve radyal gerilmeler, konsol tipi gerilim dönüştürücüleri kullanılarak ölçülmektedir (Elsadig vd., 2014). Statik Poisson oranı, yük uygulanan beton numunesinde oluşan enine birim deformasyonun, boyuna birim deformasyona oranından hesaplanmaktadır.

$$\mu_s = \frac{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)}{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)} \quad (2.1)$$

Burada, $\frac{\Delta a}{a}$: enine deformasyon ; $\frac{\Delta L}{L}$: boyuna deformasyonu göstermektedir.

Dinamik Poisson oranı (μ_d) ise tahribatsız bir şekilde dinamik yöntemlerden olan ultrasonik yöntemle belirlenen P (V_p) ve S (V_s) dalga hızlarının oranından hesaplanabilmektedir.

$$\mu_d = \frac{\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2\right]}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2\right]} \quad (2.2)$$

Betonlarda Poisson oran değerinin sifira yakın olması sıklığı ve kompaktlığı, 0.5 e yakın değerler ise gözeneklerin suya doymunluğunu göstermektedir. Bu oran, izotrop malzemelerde [-1, 0.5] arasında değerler alabilmekte ve 0.5 değerine yaklaştıkça suya doymunluğu artmakta, sıkıştırılabilirliği azalmaktadır (Green ve Zerna, 2012). Sıvıların Poisson oranı teorik olarak 0.5'tir. Çünkü sıvılar sıkıştırılmazlar. Bu nedenle hiçbir katı malzemenin Poisson oranı 0.5 olamamaktadır. Çoğu elastik katılar için bu oranın ortalama değeri 0.25 civarındadır.

Poisson oranına bağlı olarak dinamik Elastisite (E_d) ve kayma modülü (G_d) ise Eşitlik 2.3 ve 2.4'te tanımlanmıştır.

$$E_d = \frac{(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{(1-\mu_d)} \gamma V_p^2 \quad (2.3)$$

$$G_d = \frac{E}{2(1+\mu_d)} \quad (2.4)$$

Burada, γ : yoğunluktur (gr/cm^3). Yoğunluk değerinin bilinmediği durumlarda P ve S dalga hızlarından Uyanık ve Çatlıoğlu (2015) ilişkisi kullanılarak hesaplanabilir. Elastisite modülünün yüksek olması malzemenin rijit olduğu ya da uygulanan bir gerilme sonucu oluşan elastik birim şekil değişiminin küçük olacağı anlamına gelmektedir. Beton karışımında kullanılan agrega özellikleri, hidrasyon ısı, çimento hamurunun gözenekliliği ve kür koşulları elastisite modülünü etkilemektedir.

Yapılan çalışmada, mühendislik yapılarının analizlerinde kullanılan Poisson oranının ulusal ve uluslararası standartlardaki statik elastik parametre hesaplarında da belirtildiği şekilde sabit alınmasının doğru olup olmayacağı tartışılmıştır. Bu kapsamda, düşük, orta veya yüksek mukavemet özellikleri gösteren 12 tasarım için dinamik Poisson oranının 0.20 gibi sabit bir değer alması veya sismik hız oranlarından hesaplandığı şekilde değişken (0.14-0.34) değerler alması durumundaki elastik modüllerin değişimi incelenerek karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Hazırlanan beton numunelerinin zamana bağlı ortalama P ve S dalga hızları, hız oranı (V_p/V_s), Poisson oranı, dayanım ve yoğunluk değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Teller (1956) Poisson oran değerini ortalama olarak 0.24 bulmuştur. Leslie ve Cheesman (1949) ise, betonlardaki kırık ve çatlak durumunu gözlemlemek amacıyla yaptıkları çalışmada yoğunluğu 2.24 gr/cm^3 ’ü aşan betonlar için 0.24 Poisson oran değerini kullanarak ultrasonik hızın daha düşük olduğu bölgelerde kırık ya da çatlak varlığından söz edilebileceğini ortaya koymuştur. Yapılan bu çalışmada ise, dayanımları yaklaşık olarak 2-70 MPa ve yoğunlukları $2.07\text{-}2.39 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişen suya doymuş betonlar bir arada değerlendirildiğinde dinamik Poisson oranlarının 0.14-0.34 aralığında değiştiği ve ortalama olarak 0.30 değerini aldığı belirlenmiştir.

Tablo 2

Hazırlanan 12 beton tasarımına ait zamana bağlı ortalama P ve S dalga hızları, Poisson oranı, dayanım ve yoğunluk değerleri

Zaman	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_s oranı	Dinamik Poisson oranı (μ_d)	Dayanım (MPa)	Yoğunluk (γ) (gr/cm^3)
3. gün	2694-4668	1589-2374	1.54-2.01	0.14-0.34	2.3-57.0	2.07-2.33
7. gün	2525-4787	1627-2645	1.59-2.03	0.17-0.34	2.5-62.9	2.09-2.39
28. gün	3461-4852	1810-2459	1.81-1.94	0.28-0.32	3.5-69.7	2.09-2.39

3., 7. ve 28. günlerde 12 tasarımındaki 3’er adet numunenin özelliklerinin ortalaması ayrı ayrı zamana bağlı olarak Tablo 3, 4 ve 5’te sunulmuştur. Buna göre, dayanımları farklı olarak hazırlanan 108 adet numunenin yoğunlukları $2.07\text{-}2.39 \text{ gr/cm}^3$, dayanımları 2.3-69.7 MPa aralığında değişirken, P ve S dalga hızları sırasıyla 2525-4852 m/s ve 1589-2645 m/s aralığında değişmektedir. V_p/V_s oranları ise 1.54-2.03 aralığında iken, Poisson oranları 0.14-0.34 aralığında değişmektedir. Kür süresine bağlı olarak ise, 3 günlük betonlarda yoğunlukları $2.12\text{-}2.31 \text{ gr/cm}^3$, dayanımları 2.3-56.15 MPa, P ve S dalga hızları sırasıyla 2796-4494 m/s ve 1733.8-2339 m/s aralığında değişmektedir. V_p/V_s oranları 1.62-1.98 aralığında iken, Poisson oranları 0.19-0.33 aralığında değişmektedir.

Tablo 3

3 günlük 12 beton tasarımının ortalama özellikleri

Beton Tasarımı	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P /V _S oranı	Dinamik Poisson oranı (μ_d)	Dayanım (MPa)	Yoğunluk (γ) (gr/cm ³)
T1	2796.0	1733.8	1.62	0.19	2.30	2.20
T2	3104.0	1760.5	1.76	0.26	3.00	2.19
T3	3613.0	2038.3	1.78	0.26	5.75	2.16
T4	3964.0	2165.0	1.83	0.29	8.80	2.12
T5	4051.8	2243.8	1.81	0.28	22.70	2.18
T6	4311.5	2314.0	1.86	0.30	30.60	2.29
T7	4494.0	2326.8	1.93	0.32	39.90	2.31
T8	4336.3	2309.5	1.88	0.30	38.30	2.22
T9	4330.8	2339.0	1.85	0.29	56.15	2.30
T10	4372.8	2304.0	1.90	0.31	47.40	2.31
T11	4448.3	2241.5	1.98	0.33	23.85	2.31
T12	4100.3	2089.3	1.96	0.32	39.00	2.17

Benzer şekilde, 7 günlük betonlarda yoğunlukları 2.09-2.47 gr/cm³, dayanımları 2.73-61.23 MPa aralığında değişirken, P ve S dalga hızları sırasıyla 2922.7-4711.8 m/s ve 1650.8-2402 m/s aralığında değişmektedir. V_P/V_S oranları 1.70-2.01 aralığında iken, Poisson oranları 0.23-0.34 aralığında değişmektedir.

Tablo 4

7 günlük 12 beton tasarımının ortalama özellikleri

Beton Tasarımı	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P /V _S oranı	Dinamik Poisson oranı (μ_d)	Dayanım (MPa)	Yoğunluk (γ) (gr/cm ³)
T1	2922.7	1650.8	1.77	0.27	2.73	2.22
T2	3078.0	1715.2	1.80	0.26	3.97	2.22
T3	3618.8	1976.0	1.83	0.29	7.87	2.13
T4	3838.5	2086.0	1.84	0.29	12.4	2.12
T5	4015.5	2376.8	1.70	0.23	28.17	2.17
T6	4556.2	2266.8	2.01	0.34	35.93	2.26
T7	4711.8	2357.8	2.00	0.33	51.40	2.47
T8	4482.5	2280.0	1.97	0.33	45.27	2.33
T9	4489.8	2375.0	1.89	0.31	61.23	2.37
T10	4417.2	2339.7	1.89	0.31	55.73	2.30
T11	4587.3	2402.2	1.91	0.31	27.20	2.27
T12	3901.2	2065.3	1.89	0.31	47.07	2.09

Tablo 5

28 günlük 12 beton tasarımının özellikleri

Beton Tasarımı	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P /V _S oranı	Dinamik Poisson oranı (μ_d)	Dayanım (MPa)	Yoğunluk (γ) (gr/cm ³)
T1	3507.8	1848.8	1.90	0.31	3.73	2.23
T2	3601.8	1977.5	1.82	0.28	5.03	2.23
T3	3882.7	2060.2	1.88	0.30	10.27	2.16
T4	4123.0	2175.8	1.89	0.31	15.27	2.13
T5	4412.7	2354.2	1.87	0.30	33.10	2.21
T6	4500.5	2389.3	1.88	0.30	43.83	2.29
T7	4687.8	2500.0	1.88	0.30	53.00	2.34
T8	4640.8	2432.8	1.91	0.31	51.20	2.31
T9	4706.0	2477.0	1.90	0.31	61.07	2.38
T10	4603.0	2460.2	1.87	0.30	58.40	2.34
T11	4500.3	2372.0	1.90	0.31	37.40	2.31
T12	4186.3	2234.7	1.87	0.30	55.97	2.09

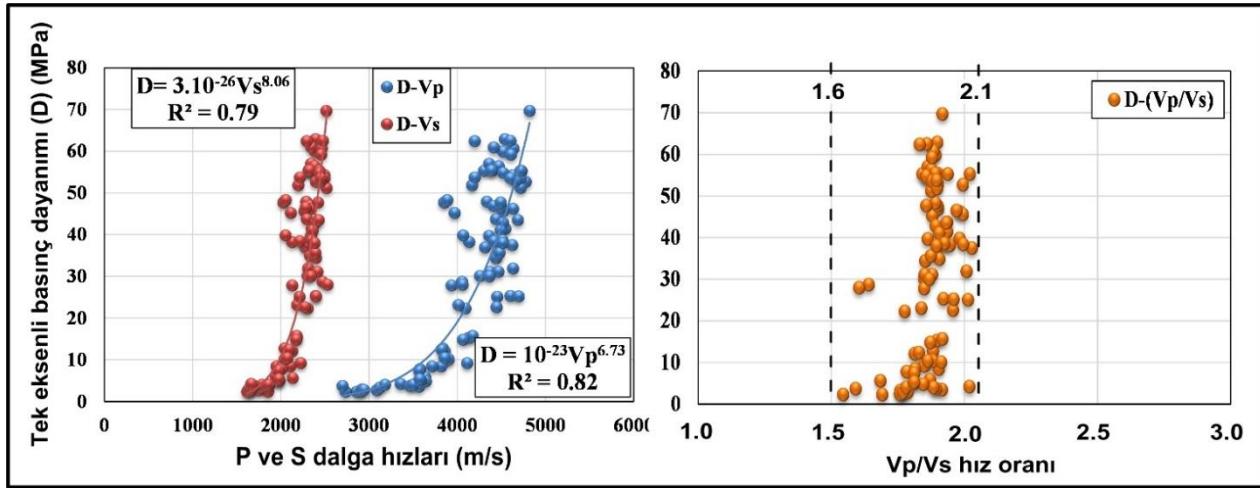
28 günlük betonlarda ise, yoğunlukları 2.09-2.34 gr/cm³, dayanımları 3.73-61.07 MPa aralığında değişirken, P ve S dalga hızları sırasıyla 3507.8-4706 m/s ve 1848.8-2500 m/s aralığında değişmektedir. V_p/V_s oranları 1.82-1.91 aralığında iken, Poisson oranları 0.28-0.31 aralığında değişmektedir.

Ultrasonik P ve S dalga hızları ile hız oranının (V_p/V_s) basınç dayanımıyla olan ilişkisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Buna göre, P (V_p) ve S (V_s) dalga hızları ile basınç dayanımları (D) arasında pozitif yönde ve üstel iyi ilişkiler olduğu, fakat sismik hız oranı ile bir ilişkinin belirlenemediği de gözlenmektedir (P ve S dalga hızları için ilişki katsayısı (R^2) sırasıyla 0.82 ve 0.79). İlişki katsayısı 1 değerine yaklaştıkça elde edilen bağıntıların güvenilirliği artmaktadır. Dalga hızlarının artışı ile basınç dayanımlarında da artış gözlenmiştir.

$$D = 10^{-23}V_p^{6.73} \quad R^2 = 0.82 \quad (3.1)$$

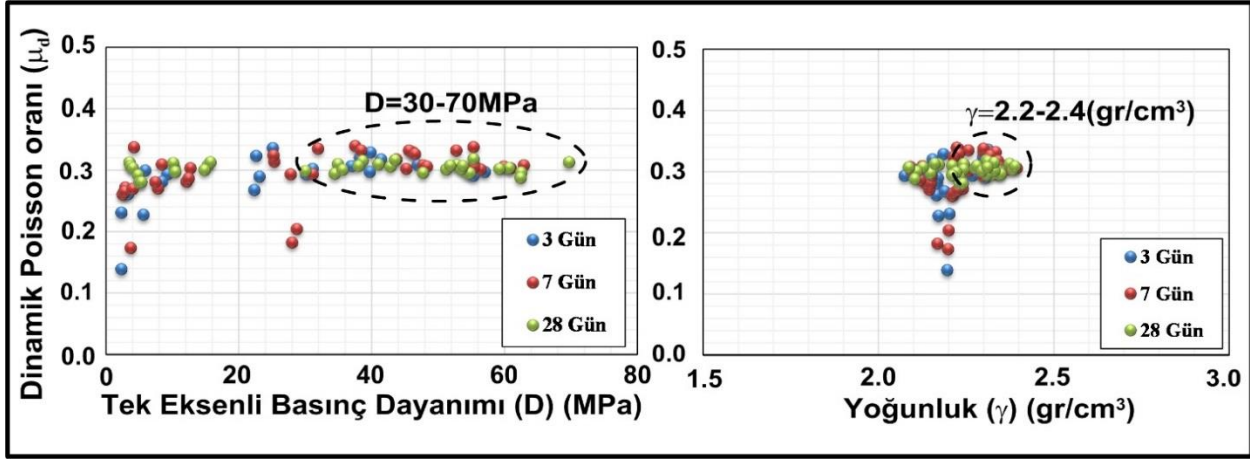
$$D = 3.10^{-26}V_s^{8.06} \quad R^2 = 0.79 \quad (3.2)$$

Basınç dayanımları 2.3-69.7 MPa aralığında değişirken, V_p/V_s oranı da 1.6-2.1 aralığında değişmektedir. Şekil 1’de görülen hız oranındaki bu farklılık dinamik elastik parametrelerin sabit olmayıp belirli bir aralıkta değişmesine sebep olmaktadır.



Şekil 1. P ve S dalga hızları ile hız oranının basınç dayanımı ile ilişkisi

Krenchel (1965) sadece bir beton tasarımı kullanarak yaptığı çalışmada Poisson oranını zayıf betonlarda 0.15-0.18 aralığında, sağlam betonlarda 0.17-0.25 aralığında bulmuştur. Pal (2019) ise pozzolan portland çimento kullanarak 20-45 MPa aralığında dayanıma ve 0.40-0.60 aralığında w/c oranına göre hazırladığı betonlarda dinamik Poisson oranının beton dayanımının artmasına bağlı olarak azaldığını gözlemlemiştir. Simmons (1955) ve Pal (2019) yaptıkları çalışma ile tasarım sayısındaki artışın bu ilişkide saçılmaya yol açtığını belirlemişlerdir. Bu çalışmada ise, farklı dayanımlardaki beton basınç dayanımı ve yoğunluk değerleri ile Poisson oranı arasındaki ilişkiler Şekil 2’de verilmiştir. Buna göre yoğunluk değerleri 2.07-2.39 gr/cm³ aralığında değişirken, dinamik Poisson oranının genellikle 0.3 civarında olduğu gözlenmiştir. Dinamik Poisson oranı dayanım ve yoğunluk artışından neredeyse hiç etkilenmemiştir. Özellikle dayanımı 30 MPa ve yoğunluğu 2.2 gr/cm³ değerinden yüksek olan betonlarda (Şekil 2’de kesikli çizgi ile gösterilen alanlar) dinamik Poisson oranının 0.3 civarında sabit bir değer aldığı ve ayrıca kür süresinin de bu betonlarda etkisinin ortadan kalktığı gözlenmiştir. Buna göre, dayanımı 30 MPa ve yoğunluğu 2.2 gr/cm³ değerinden düşük olan betonlarda Poisson oranının sabit olmadığı ortaya konulmuştur. 30 MPa dayanım ve 2.2 gr/cm³ yoğunluk değerinden düşük olan betonlardaki Poisson oranı değerindeki bir miktar saçılmanın ise 3. ve 7. günlerde hidratasyon sürecini tam olarak tamamlamamış ve gözenek miktarı daha fazla olan numunelerden kaynaklandığı belirlenmiştir.



Şekil 2. Basınç dayanımı ve yoğunluk değerlerinin dinamik Poisson oranı ile ilişkisi

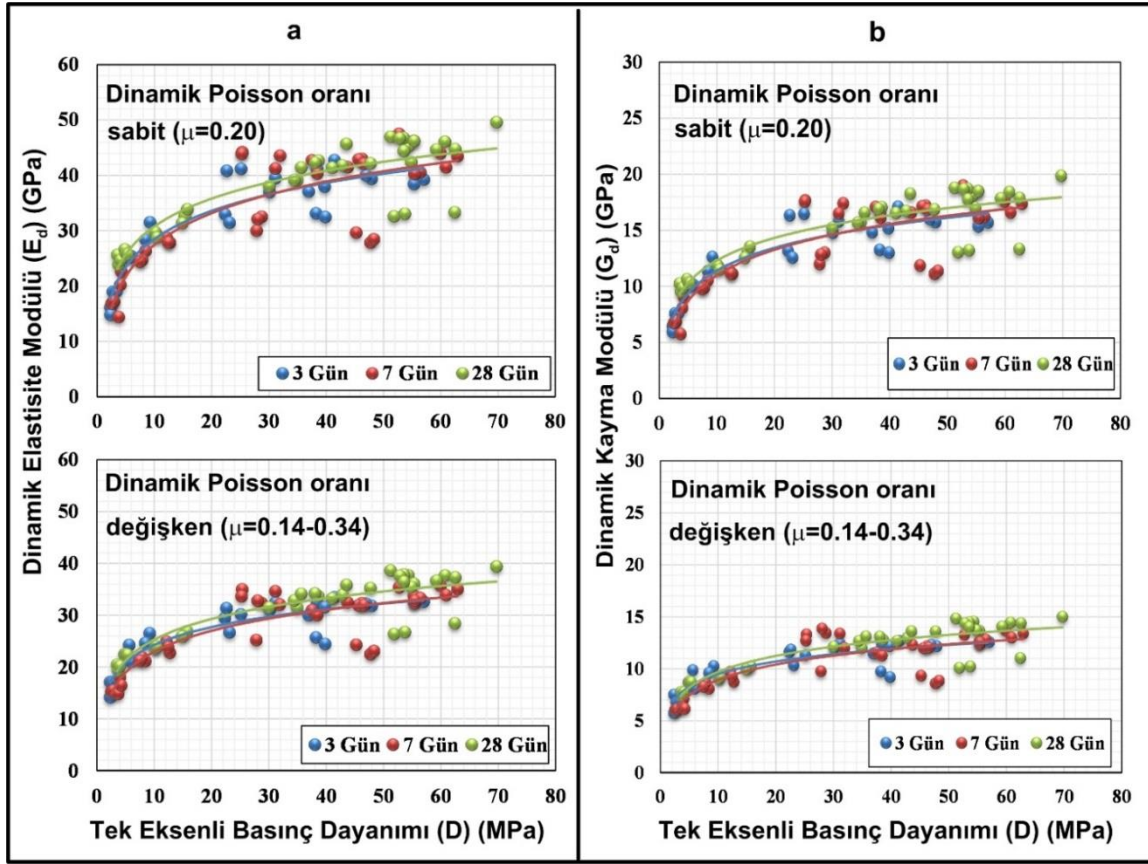
12 beton tasarımının $\mu_d = 0.20$ olarak sabit veya $\mu_d = 0.14-0.34$ aralığında alınmasına bağlı olarak hesaplanan her bir tasarımdaki 9'ar adet numunenin ortalama elastisite ve kayma modülü değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Elastisite modülü değerleri Poisson oranının 0.20 veya 0.14-0.34 alınmasına bağlı olarak sırasıyla ve ortalama olarak 19.55-44.98 GPa ve 17.15-35.57 GPa aralığında değiştiği gözlenmiştir. Benzer şekilde, kayma modülü değerlerinin de Poisson oranının bu iki farklı şekilde alınmasına bağlı olarak ortalama 7.82-17.98 GPa ve 6.79-13.64 GPa aralıklarında değiştiği gözlenmiştir.

Tablo 6

12 beton tasarımının ortalama elastisite ve kayma modülü değerleri

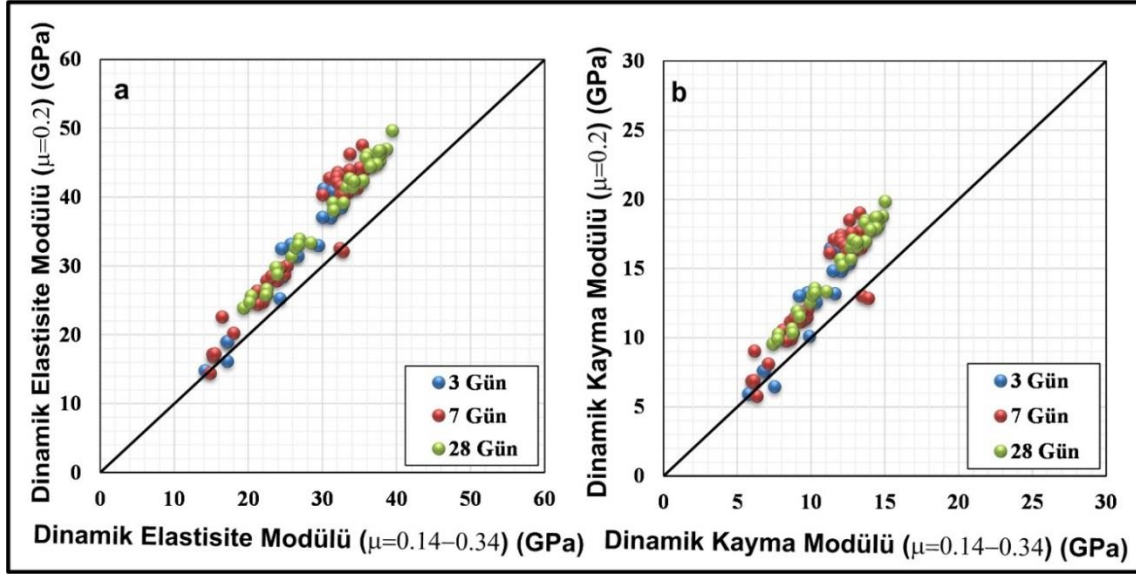
Beton Tasarımı	Elastisite Modülü (GPa)		Kayma Modülü (GPa)	
	$\mu_d = 0.20$	$\mu_d = 0.14-0.34$	$\mu_d = 0.20$	$\mu_d = 0.14-0.34$
T1	19.55	17.15	7.82	6.79
T2	21.68	18.86	8.67	7.42
T3	26.75	22.66	10.70	8.81
T4	30.28	25.23	12.11	9.73
T5	34.43	30.29	13.77	11.98
T6	41.06	32.37	16.43	12.32
T7	44.98	35.18	17.98	13.37
T8	41.98	33.17	16.79	12.63
T9	43.63	35.57	17.45	13.64
T10	41.78	34.12	16.71	13.09
T11	42.22	33.37	16.89	12.70
T12	31.33	25.20	12.53	9.63

Basınç dayanımı ile elastisite ve kayma modülü arasındaki ilişkilerin Poisson oranına ve zamana bağlı değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. ACI 363 (1984), Noguchi vd. (2009) ve ACI 318 (2014) basınç dayanımı ile elastik modüller arasında negatif yönde artan bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışmada da benzer durum ortaya çıkmıştır. Yaklaşık 10 MPa değerine kadar doğrusal olarak elastik modüllerin artışına bağlı basınç dayanımlarında da artış gözlenmiştir. Özellikle 20-70 MPa dayanım aralığında ise, dinamik Poisson oranının 0.20 alındığı durumda Elastisite modülü yaklaşık olarak 28-50 GPa aralığında değişirken, Poisson oranının 0.14-0.34 aralığında olması durumunda ise 20-40 GPa aralığında değiştiği gözlenmiştir. Benzer durum kayma modülü için de geçerlidir. 20-70 MPa dayanıma sahip betonlarda Poisson oranının 0.20 alınması halinde kayma modülü değeri yaklaşık olarak 10-20 GPa aralığında değiştiği, yine Poisson oranının 0.14-0.34 aralığında olması durumunda ise 8-15 GPa aralığında değiştiği gözlenmiştir. Şekil incelendiğinde, elastisite ve kayma modülü değerlerinin 3 ve 7. günlerdeki ölçüm sonuçlarına göre birbirine yakın değerlerde olduğu, 28. günde ise daha yüksek değerler elde edildiği gözlenmiştir.



Şekil 3. Basınç dayanımı ile elastisite (a) ve kayma (b) modülü arasındaki ilişkilerin Poisson oranına bağlı değişimi

Şekil 4'te Poisson oranına bağlı olarak hesaplanan elastisite ve kayma modüllerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil incelendiğinde Poisson oranının sabit veya değişken olması durumlarında hesaplanan elastik modüller arasındaki farklılık bariz şekilde gözlenebilmektedir. Buna göre, Poisson oranının 0.20 alınması ile daha yüksek elastisite ve kayma modülü değerlerinin elde edildiği ortaya konulmuştur. Elastisite modülünün kısmen daha yüksek olması betonun elastik sınırlar içerisinde daha büyük gerilme altında daha küçük şekil değiştirme yapmasını sağlayacaktır.



Şekil 4. Poisson oranına bağlı olarak hesaplanan Elastisite (a) ve Kayma (b) modüllerinin karşılaştırılması

Herhangi 2 değişken (X_i ve X_t) arasındaki görecel hata miktarının yüzdesi Eşitlik 3.3'teki şekli ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Görecel Hata (\%)} = \frac{X_i - X_t}{X_t} \times 100 \quad (3.3)$$

Buna göre, dayanım türü ve zamana bağlı olarak hesaplanan elastisite ve kayma modülleri ve Poisson oranları arasındaki görecel hata (%) Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7

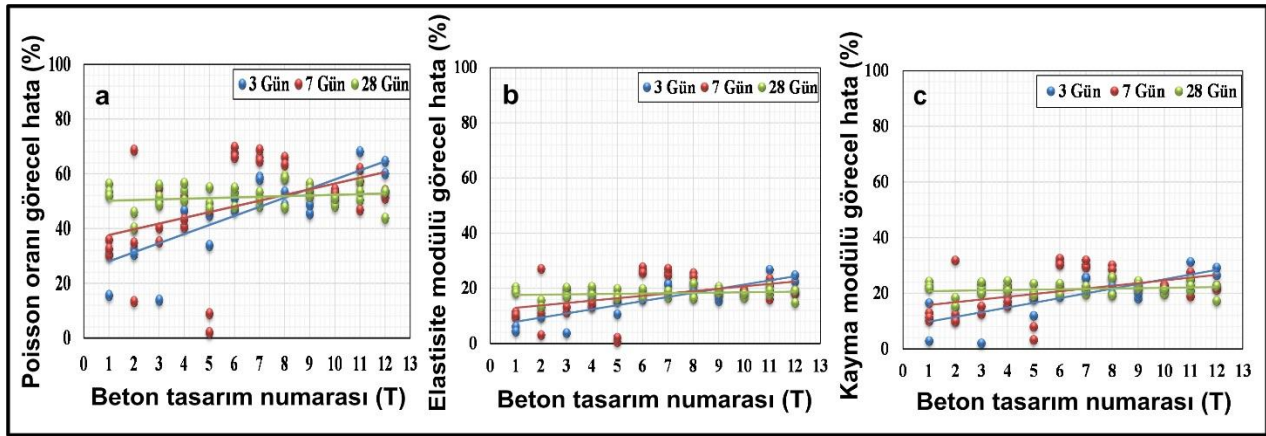
Dayanım türü ve zamana bağlı olarak hesaplanan ortalama elastisite ve kayma modülleri ile Poisson oranlarının görecel hata miktarı (T: Beton tasarımı, ds: dinamik sabit (0.2), dd: dinamik değişken (0.14-0.34) değerler)

T	Görecel Hata (%)								
	3 gün			7 gün			28 gün		
	$\mu_{ds} - \mu_{dd}$	$E_{ds} - E_{dd}$	$G_{ds} - G_{dd}$	$\mu_{ds} - \mu_{dd}$	$E_{ds} - E_{dd}$	$G_{ds} - G_{dd}$	$\mu_{ds} - \mu_{dd}$	$E_{ds} - E_{dd}$	$G_{ds} - G_{dd}$
T1	23.04	5.23	9.67	32.85	10.26	11.37	53.81	19.27	22.82
T2	31.44	9.73	10.65	38.91	13.68	17.97	42.07	13.97	16.25
T3	31.84	10.60	11.30	43.34	14.66	17.04	51.98	18.41	21.78
T4	42.58	14.61	17.07	45.13	15.32	17.95	53.44	19.10	22.62
T5	39.35	12.89	14.82	19.16	6.17	9.98	50.48	17.71	20.92
T6	48.80	16.92	19.96	67.72	26.52	31.22	51.83	18.34	21.70
T7	58.44	21.55	25.54	66.46	25.82	30.43	50.60	17.75	20.99
T8	50.99	17.93	21.21	42.68	23.78	28.11	55.03	19.93	23.58
T9	47.02	16.11	18.96	52.85	18.80	22.27	54.15	19.43	23.02
T10	53.92	19.31	22.88	52.51	18.64	22.07	50.02	17.47	20.65
T11	64.86	24.96	29.37	55.23	20.06	23.71	53.78	19.27	22.82
T12	62.32	23.58	27.88	52.65	18.71	22.15	50.29	17.65	20.83

Tablo 7'ye göre, 3 günlük numunelerde Poisson oranları arasındaki görecel hata %23.04-64.86 aralığında, elastisite modülleri arasında %5.23-24.96 ve kayma modülleri arasındaki görecel hata ise %9.67-29.37 aralığında değişmektedir. Benzer şekilde, 7 günlük numunelerde Poisson oranları arasındaki görecel hata %19.16-67.72 aralığında, elastisite modülleri arasında %6.17-26.52 ve kayma modülleri arasındaki görecel hata ise

%9.98-31.22 aralığında değişmektedir. 28 günlük numunelerde ise, Poisson oranları arasındaki görecel hata %42.07-55.03 aralığında, elastisite modülleri arasında %13.97-19.93 ve kayma modülleri arasındaki görecel hata ise %16.25-23.58 aralığında değişmektedir.

Poisson oranının 0.2 veya 0.14-0.34 alınmasına bağlı olarak 12 beton tasarımındaki elastik parametrelerdeki yüzde farklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5b ve 5c'de ayrı ayrı sunulmuştur. Genellikle Poisson oranının sabit (0.2) ve değişken (0.14-0.34) alınmasına bağlı olarak hesaplanan Poisson oranı, elastisite ve kayma modülü değerlerindeki görecel hatanın 1.-8. tasarımlarda (T1-T8) zamana bağlı olarak arttığı, 9.-12. tasarımlarda (T9-T12) ise bu hata oranının zamanla azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, düşük ve orta dayanımlı betonlarda sertleşme süresi ve dayanımlardaki artışa bağlı olarak Poisson oranının sabit ve değişken değerlerde olmasına göre elde edilen elastik parametreler arasındaki farkın arttığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, standartlardaki şekilde Poisson oranının sabit alınmasının hesaplamalarda hatalara yol açacağı düşünülmektedir.



Şekil 5. Poisson oranının 0.2 veya 0.14-0.34 alınmasına bağlı olarak 12 beton tasarımındaki elastik parametrelerdeki görecel hatanın (%) zamana bağlı değişimi

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada dayanımları yaklaşık olarak 2-70 MPa ve yoğunlukları 2.07-2.80 gr/cm³ arasında değişen betonlar bir arada değerlendirildiğinde dinamik Poisson oranlarının 0.14-0.34 aralığında değiştiği ve ortalama olarak 0.30 değerini aldığı belirlenmiştir. Farklı dayanımlardaki betonlar için dinamik olarak hesaplanan Poisson oranı ile sabit olarak alınan dinamik Poisson oranı (0.20) arasında yaklaşık olarak %48 fark olduğu ve bu nedenle de Poisson oranının yapı ile ilgili hesaplamalarda sabit bir değer olarak alınmasının doğru olmadığı ortaya konulmuştur. Aynı durumun statik elastik modüllerin hesaplanmasında da geçerli olacağı düşünülmektedir.

Değişken Poisson oranları ile hesaplanan elastik modüller, sabit olarak alınan Poisson oranı ile hesaplanan elastik modüllere göre daha küçük değerlerde bulunmuştur. Bu durum güvenli yapı oluşturulması açısından avantajlı olmasına karşın, maliyet artışına sebep olacağından ekonomik olmayacağı düşünülmektedir. Dayanım değerlerine bağlı olarak hesaplanan bu iki durumdaki elastisite ve kayma modülü değerlerinin 3 ve 7. günlerdeki ölçüm sonuçlarına göre birbirine yakın olduğu, 28. günde ise daha yüksek değerler elde edildiği gözlenmiştir.

Dinamik Poisson oranı ile beton yaşı arasında anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Farklı dayanımlardaki 3 günlük numunelerde Poisson oranları, elastisite ve kayma modülleri arasındaki görecel hata yaklaşık olarak sırasıyla %23-65, %5-25 ve %9-30 aralığında değişmektedir. Benzer şekilde, 7 günlük numunelerde Poisson oranları, elastisite ve kayma modülleri arasındaki görecel hata yaklaşık olarak sırasıyla %19-68, %6-27 ve %10-31 aralığında değişmektedir. 28 günlük numunelerde ise, Poisson oranları, elastisite ve kayma modülleri arasındaki görecel hata yaklaşık olarak sırasıyla %42-55, %14-20 ve %16-24 aralığında değişmektedir. Yapılan çalışmada, özellikle 30 MPa ve 2.2 gr/cm³ yoğunluk değerinden yüksek betonlarda dinamik Poisson oranının 0.3 civarında sabit bir değer aldığı ve ayrıca kür süresinin de bu betonlarda etkisinin ortadan kalktığı gözlenmiştir. Poisson oranının sabit veya değişken alınmasına bağlı olarak hesaplanan elastisite ve kayma

modülü değerlerindeki görecel hatanın genellikle ilk sekiz tasarımda zamana bağlı olarak arttığı, diğer tasarımlarda ise zamanla azaldığı belirlenmiştir.

Teşekkür

Çalışmaya yaptığı eleştiri, yorum ve katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Osman UYANIK' a teşekkür ederim.

Yazar Katkıları

Nevbahar EKİN: Analizi planlamış ve tasarlamıştır, veri toplamış ve analizini yapmıştır, çalışmanın istatistiksel analizlerini yapmış ve makaleyi yazmıştır.

Çıkar Çatışması

Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

Kaynaklar

- ACI Committee 363. (1984). *State-of-the-art report on high-strength concrete*. ACI J. Proc., 81, 364–411.
- ACI Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 503.
- Ahmed, L. (2018). Dynamic measurements for determining poisson's ratio of young concrete. *Nordic Concrete Research – Publ.*, No. NCR 58 – 1(6) 95-106. <https://doi.org/10.2478/ncr-2018-0006>
- Akkaya, İ., Özvan, A., Tapan, M., Bor, M., Özvan, E.E. (2017). Farklı kayalarda ultrasonik yöntem ile belirlenen poisson oranının kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerle ilişkisinin belirlenmesi. *MÜHJEO'2017: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu*, 208-215, 12-14 Ekim 2017, ÇÜ, Adana.
- Anson M. ve Newman K. (1966). The effect of mix proportions and method of testing on poisson's ratio for mortars and concretes. *Magazine of Concrete Research*, 18(56), 115-130. <https://doi.org/10.1680/mac.1966.18.56.115>
- Atıcı, Ü. ve Yünel, T.Y. (2011). Granitlerde kuru ve suya doymun numuneler için dinamik ve statik elastisite modülünün değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1), 1-10. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/211393>
- Brooks, J.J. (2015). *Elasticity of concrete*, Concrete and Masonry Movements, Chapter 4, Elsevier, 61-93.
- BS EN 1992-1-1. (2004). *General rules and rules for buildings*. Eurocode 2: Design of concrete structures, (incorporating corrigendum January 2008, November 2010 and February 2014).
- Chao, H.C. (2002). *An experimental model for non-destructive evaluation on pile foundations using guided wave approach*. Northwestern University, Ph.D. Dissertation, Evanston, Illinois, U.S.A.
- Eissa, E.A. ve Kazi, A. (1988). Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 25, 479-482. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)90987-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)90987-4)
- Elsadig, A.D.Y., Elfaki, H.O.A., Ali, H.O.M., Idress, K.E.H. (2014). *Calibration of wire-line mechanical properties using core measurements results for heglig oilfield - case study*. Sudan University of Science and Technology Department of Petroleum Engineering, Bsc. thesis, Sudan, 37p.
- Fei, W., Huiyuan, B., Jun, Y., Yonghao, Z. (2016). Correlation of dynamic and static elastic parameters of rock. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(04), 1551-1560. Erişim adresi: <http://www.ejge.com/2016/Ppr2016.0136ma.pdf>
- Gerçek, H. (2004). Kayaçların poisson oranına göre sınıflandırılması. *Kayamek'2004-VII Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, A. Ceylanoğlu ve B. Erdem (ed.), TUKMD ve CÜ Maden Müh. Bölümü,

Sivas, s. 9-17.

- Green, A.E. ve Zerna, W. (2012) *Theoretical elasticity*, Second edition, Dover, Newyork.
- Hongkui, G., Yingsong, L., Shanzhou, M., Lili, S. (2001). Difference of rock elastic parameters under static and dynamic loading. *Frontiers of Rock Mechanics and Sustainable Development in the 21st Century*, Proceeding of the 2001 ISRM International Symposium, 11-14 September, Beijing, China.
- Kee, S.H., Kang, J.W., Choi, B.J., Kwon, J., Candelaria, M.D. (2019). Evaluation of static and dynamic residual mechanical properties of heat-damaged concrete for nuclear reactor auxiliary buildings in korea using elastic wave velocity measurements. *Materials*, 12(17), 2695. <https://doi.org/10.3390/ma12172695>
- Klink, S.A. (1985). Actual Poisson ratio of concrete. *Journal of The American Concrete Institute*, 82(6), 813-817. Erişim adresi: <https://www.concrete.org/publications/10392>
- Kodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *International Scholarly Research Notices*, Article ID 468510, 15 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/468510>
- Krech, W.W. Henderson, F.A. and Hjelmstad, K.E. (1974). *A Standard rock suite for rapid excavation research*. USBM Report of Investigations, RI 7865.
- Krenchel, H.E. (1965). Structure concrete and its behavior under Load. *Proc. International Conference, September 1965*,160.
- Lydon F.D. ve Balendran R.V. (1986). Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(3), 314-324. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90106-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90106-7)
- Leslie J.R. ve Cheesman, W.J. (1949) An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures. *American Concrete Institute Proceedings*, 46(9), 17-36. <https://doi.org/10.14359/12041>
- Naus, D.J. (2006). The effect of elevated temperatures on concrete materials and structures. *A Literature Review at ORNL*, Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge, TN, USA. <https://doi.org/10.2172/974590>
- Noguchi, T., Tomosawa, F., Nemati, K.M., Chiaia, B.M., Fantilli, A.P. (2009). A practical equation for elastic modulus of concrete. *ACI Materials. Journal*, 106, 690–696.
- Özçelik, E., ve Gelişli, K. (2018). Betonarme yapılarda jeofizik yöntemlerle beton kalitesi ve yapı donatı durumunun araştırılması. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 17(1), 1-11. <https://doi.org/10.30706/uybd.433735>
- Öziçer, S. ve Uyanık O. (2017). Beton dayanımının yerinde P dalga hızından belirlenmesi ve İzmir örneği. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 9(1), 1-16. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/441583>
- Pal, P. (2019). Dynamic Poisson's Ratio and Modulus of Elasticity of Pozzolana Portland Cement Concrete. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 9(2), 131-144. Erişim adresi: <http://ojs.imeti.org/index.php/IJETI/article/view/3132>
- Sabbağ, N. ve Uyanık, O. (2016). Time-dependent change of seismic velocities on low-strength concrete. *The Online Journal of Science and Technology (TOJSAT)*, 6(4). Erişim adresi: <https://www.tojsat.net/journals/tojsat/articles/v06i04/v06i04-09.pdf>
- Sabbağ N. ve Uyanık O. (2017). Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.04.005>
- Sabbağ N. ve Uyanık O. (2018a). Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 155, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>
- Sabbağ, N. ve Uyanık, O. (2018b). Doymun betonların statik ve dinamik elastik parametrelerinin karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18, 1181-1189. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/44157/544753>

- Simmons, J.C. (1955). Poisson's ratio of concrete: a comparison of dynamic and static measurements. *Magazine of Concrete Research*, 7(21), 61-68. <https://doi.org/10.1680/mac.1955.7.20.61>
- Teller, L.W. (1956). *Elastic properties, in significance of tests and properties of concrete and concrete aggregates*. ASTM Special Technical Publication, 169, 94-103.
- Timoshenko, S.P. (1970). *Theory of elasticity*. 3rd ed., New York, McGraw-Hill Book Company.
- TS EN 12390-2. (2019). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabii tutulması*. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-3. (2019). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*. TSE, Ankara.
- TS ISO 1920-10. (2015). *Beton deneyleri-Bölüm 10: Basınç altında statik elastik modülünün belirlenmesi*. TSE, Ankara.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01501-6>
- Uyanık, O. Şenli G., Çatlıoğlu B. (2013). Binaların beton kalitesinin tahribatsız jeofizik yöntemlerle belirlenmesi. *SDÜ Uluslararası Teknoloji Bilimler Dergisi*, 5(2), 156-165. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/utbd/issue/26208/275933>
- Uyanık, O., Gülay, F.G., Tezcan, S. (2012). Beton dayanımının tahribatsız ultrasonik yöntemle tayini. *Hazır Beton*, 82-85. Erişim adresi: <https://www.thbb.org/media/2160/makale109.pdf>
- Uyanık, O. ve Tezcan, S. (2012). Beton dayanımının ultrasonik yöntemle tayini. *Jeofizik Bülteni*, 23(70), 41-45.
- Uyanık, O. (2012). Sismik hızlardan beton dayanımının belirlenmesi. *Jeofizik Bülteni*, 23(70), 25-30.
- 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. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/194047>
- Uyanık, O. ve Çatlıoğlu, B. (2015). Sismik hızlardan yoğunluğun belirlenmesi. *Jeofizik*, 17(1-2), 3-15.
- Uyanık, O., Kaptan, K., Gülay, F.G., Tezcan, S. (2011). Beton dayanımının tahribatsız ultrasonik yöntemle tayini. *Yapı Dünyası*, 184, 55-58. Erişim adresi: http://www.yapidunyasi.com.tr/arsiv/184_TEM_2011.pdf
- Uyanık, O. ve Ulugergerli, E.U. (2008). Quality control of compacted grounds using seismic velocities. *Near Surface Geophysics*, 6(5), 299-306. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2008004>
- Wang, H. (2004). *Theoretical evaluations of embedded plate-like and solid cylindrical concrete structures with guided waves*. Northwestern University, PhD Dissertation, Evanston, Illinois, U.S.A, 318 p.