

Lifli betonlar için elastisite modülü tahmini Elastic modulus prediction for fiber-reinforced concretes

Eren YAĞMUR* 

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Abdullah Gül Üniversitesi, Kayseri.
eren.yagmur@agu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.06.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 16.10.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 23.09.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.34017
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, farklı ayrıık lif tiplerinin betonun elastisite modülü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla 260 adet silindirik basınç deney numunesi derlenmiştir. Dikkate alınan lif tipleri çelik, PVA, polipropilen, polyolefin, bazalt ve olefin'dir. Çalışma sonuçları tüm lif tipleri için kaba agrega miktarını ince agrega miktarına oranının 1.5'i aşması durumunda beton basınç dayanımının azaldığını göstermiştir. Çelik lifli karışımların lif narinlik oranının 60'dan küçük ve eşit olduğu durumlarda elastisite modülü artış gösterirken 60'dan büyük değerler için elastisite modülünün azaldığı görülmüştür. Dikkate alınan tüm lif tipleri için geçerli olan bir elastisite modülü denklemi önerilmiştir. Önerilen denklem deney sonuçları ile ve literatürde yer alan diğer formüllerle karşılaştırılmış ve farklı durumlar için denklemlerin geçerlilikleri sorgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Elastisite modülü, Basınç dayanımı, Çelik lif, PVA, Polipropilen, Polyolefin.

Abstract

In this study, the effects of different discrete fiber types on the elastic modulus of concrete are investigated. For this purpose, 260 cylindrical pressure test specimens are compiled. The fiber types considered are steel, PVA, polypropylene, polyolefin, basalt and olefin. The results of the study are showed that if the ratio of coarse aggregate to fine aggregate exceeds 1.5 for all fiber types, the compressive strength of concrete decreases. It has been observed that the elastic modulus increases in cases where the fiber aspect ratio of the steel fibers is less than and equal to 60, while the elastic modulus decreases for values greater than 60. An elastic modulus equation, which applies to all fiber types considered, is proposed. The proposed equation is compared with the experimental results and the other formulas in the literature and the validity of the equations for different cases are questioned.

Keywords: Elastic modulus, Compressive strength, Steel fiber, PVA, Polypropylene, Polyolefin.

1 Giriş

Beton, dünyada en çok tercih edilen yapı malzemesi olma özelliğine sahiptir. Artan ihtiyaçlarla paralel olarak beton teknolojisi de gelişim göstermektedir. Son yıllarda, betonun bilinen en zayıf özelliği olan çekme gerilmeleri altında gevrek davranmasını önlemek amacı ile beton içinde lif kullanımına yönelme olmuştur. Lif kullanımının öncelikli sebebi çatlayan beton içindeki çekme gerilmelerinin aktarımını sağlamak olsa da, bu uygulamanın betonun diğer pek çok mekanik özelliğini etkilediği bilinmektedir. Özellikle sentetik, cam, çelik ve karbon liflerin kullanımının betonun çeşitli özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir [1]-[3]. Bu özellikler arasında betonun çekme, eğilme, darbe (patlama), yorulma dayanımlarını; deformasyonunu, taşıma kapasitesini ve tokluk düzeyini artırması sayılabilir [4]-[11]. Bu bulgular neticesinde, lifli betonun kullanım alanları artmış ve pek çok yeraltı ve yerüstü yapıda tercih edilir hale gelmiştir. Lifli betonlar; depreme dayanıklı yapı inşasında, yol döşemelerinde, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, büyük sıcaklık farklarına maruz kalan yapılarda, hidrolik yapılarda, beton borular ve altyapı malzemelerinde, endüstriyel döşemelerde, havaalanı ve liman kaplamalarında, püskürtme beton uygulamalarında, ince kabuk yapılarda, fabrika inşaatlarında, şev stabilizesinin sağlanmasında, yüksek dayanımlı beton üretiminde ve patlamaya karşı dayanıklı yapılarda tercih edilmektedir [12]. Lifli betonun bu geniş kullanım yelpazesine paralel olarak hem tasarım aşamasında hem de mevcut yapıların değerlendirilebilmesi için elastisite modülü önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Elastisite modülü

betonda meydana gelecek şekil ve yer değiştirmelerin belirlenebilmesi için gereklidir ve bu bağlamda da betonun en önemli mekanik özelliklerinden biri olarak sayılabilir. Beton için elastisite modülü farklı yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bu yöntemler deneysel olabildiği gibi, farklı araştırmacılar ve standartlar tarafından önerilen denklemlerin kullanılması şeklinde de olabilir. Bilindiği gibi, tasarım aşamasında deney sonuçlarından ziyade denklemlerin kullanımı tercih edilmektedir.

Elastisite modülü doğrudan beton basınç dayanımına bağlıdır. Literatürde yer alan çalışmalar, lif katkısının beton basınç dayanımı üzerinde çok küçük bir değişikliğe sebep olduğunu rapor etmektedir [13]-[15]. Betona ilave edilen lifin tipi, narinlik oranı, yüzdesel oranı, kimyasal yapısı, çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi pek çok özelliği lifli beton karışımının davranışını etkileyebilir [16]. Ancak beton basınç dayanımının değişimi sadece lif özelliklerine değil, aynı zamanda da lifin dağılımını ve beton basınç dayanımını etkileyen diğer parametrelere de bağlıdır.

Söz konusu çalışmada, kaba/ince agrega oranının (K/I) lifli betonların basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır ve dikkate alınan tüm lif tipleri için optimum K/I değeri 1.5 olarak belirlenmiştir. Çelik lifli betonların elastisite modülünün %1'lik lif katkısına kadar arttığı ve bundan sonraki değerler için azaldığı görülmüştür. Ayrıca çelik liflerin narinlik oranının 60'ı aştığı durumlarda elastisite modülünün azaldığı belirlenmiştir. Buradan yola çıkılarak, farklı lif tipleri için geçerli olan ve değişkenlere bağlı bir adet temel elastisite modülü denklemi önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deney sonuçları ve

*Yazışılan yazar/Eren Yağmur

literatürde yer alan farklı denklemlerin sonuçları ile karşılaştırmalı şekilde sunulmuştur. Bu amaçla, literatürde yer alan 260 adet lifli betonun üretilmiş silindirik basınç deneyi numunesinin özellikleri ve deney sonuçları derlenmiştir. Dikkate alınan lif tipleri: çelik, PVA, polipropilen, polyolefin, bazalt ve olefindir.

2 Deneysel veri tabanı

Lif katkılı betonların elastisite modülleri üzerinde etkili olan parametreleri belirlemek amacı ile literatürde yer alan 260 adet lifli betonun üretilmiş silindirik deneyi numune sonucu derlenmiştir ([13],[16],[18]-[35]). Yönetmeliklerde normal betonların silindirik basınç dayanımları arasında bir dönüşüm katsayısı mevcut olmasına karşın lifli betonlar için bu amaçla kullanılacak sabit bir katsayı literatürde yer almamaktadır. Graybeal ve Davis [36], ultra yüksek dayanımlı lifli betonlar için küp ve silindirik numuneler üretmişler ve elde ettikleri deney sonuçlarını karşılaştırdıklarında, lifli betonların karışım dizaynına bağlı olarak küp ve silindirik deneylerinden elde edilen basınç dayanımı dönüşüm katsayılarının değişebileceğini bildirmişlerdir. Hamad [37], cam lif ve hafif agrega katkılı beton numunelerin basınç dayanımlarını karşılaştırdığı farklı boyutlardaki silindirik ve küp numunelerden elde ettiği sonuçların numune şekli, boyutu ve lif oranına bağlı olarak değiştiğini belirtmiş ve göz önüne alınan her durum için farklı dönüşüm katsayıları elde etmiştir.

Çalışma kapsamında dikkate alınan lif tipleri: çelik (Ç), PVA, polipropilen (PP), polyolefin (P), bazalt (B) ve olefindir (O).

Çelik liflerin pek çok çeşidi mevcut olmasına karşın literatürde yer alan bazı çalışmalarda çelik lifin çeşidi belirtilmemiştir ([16],[21],[24],[35]), bu sebeple çelik lifler çeşitlerine göre kategorize edilmemiştir. Deney verileri içerdikleri lif miktarı ve tipine göre iki gruba ayrılmıştır. Bunlar: Karışım A (çelik lif içeren karışımlar) ve Karışım B'dir (çelik lif dışındaki lifleri içeren karışımlar). Çelik liflerin diğer liflerden ayrılmasının sebebi, bu tip liflerin çalışma kapsamında yer alan diğer liflerden daha rijit bir yapıya sahip olması ve bu sebeple de beton içindeki dağılım şeklinin farklılık göstermesidir. Dikkate alınan parametreler: lif oranı (V_f), lif boyunun çapına oranı (L/d), kaba agreganın ince agregaya oranı (K/I), beton basınç dayanımı (f_c), elastisite modülü tipi (E^* ; S: sekant elastisite modülü; B: başlangıç elastisite modülü) ve elastisite modülüdür (E). Lifli numune özellikleri ve deney sonuçları Tablo 1'de özet olarak verilmiştir.

3 Basınç dayanımı

Agrega, sertleşmiş beton hacminin %60-70'ini oluşturmaktadır [38]. Beton karışımlarında kullanılan agreganın granülometrisi betonun işlenebilirliğini, geçirimsizliğini ve basınç mukavemetini etkileyen en önemli faktördür. Şekil 1'de verilen $K/I - f_c$ grafiklerine bakıldığında, Karışım A ve B için optimum değerlerin 1.5 alınmasının uygun olacağı görülmektedir.

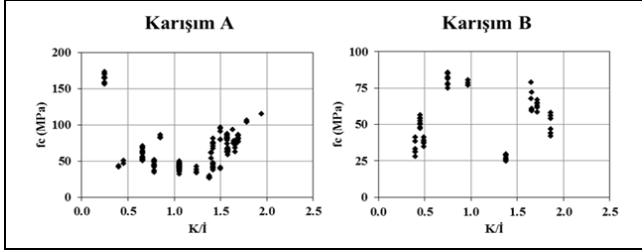
Her iki karışım için de K/I 'nin 1-1.5 aralığı için veri tabanında yeterli numune olmadığı dikkati çekmektedir. Bu sebeple karışımlar için daha net bir fikir veren 1.5 sınırının dikkate alınması gerekmektedir.

Tablo 1. Lifli numune özellikleri ve deney sonuçları.

Table 1. Properties of fibrous concrete specimens and test results.

Referans	Numune sayısı	Lif tipi	V_f	L/d	K/I	f_c (MPa)	E^*	E (MPa)
[13]	2	Ç	0.3 - 0.5	63.6 - 63.6	0.4 - 0.4	41.7 - 43.0	S	31900.0 - 33700.0
	2	P	0.5 - 0.7	66 - 66	0.4 - 0.4	38.5 - 41.4	S	31200.0 - 31600.0
	2	Ç + P	0.8 - 0.9	63.6 - 66	0.4 - 0.4	36.5 - 36.9	S	31800.0 - 33000.0
[16]	16	Ç	0.4 - 0.7	60 - 100	1.4 - 1.4	38.0 - 81.4	S	31457.1 - 42918.0
[18]	9	P	0.3 - 1.1	65 - 65	0.4 - 0.5	28.0 - 41.4	S	28000.0 - 36000.0
[19]	8	PVA	0.1 - 0.1	533 - 1267	1.4 - 1.4	24.9 - 29.6	S	23908.0 - 26314.0
	6	Ç	0.5 - 1.0	60 - 82	1.4 - 1.4	26.0 - 29.2	S	25281.0 - 27981.0
[20]	16	Ç + PVA	0.3 - 0.7	60 - 1000	1.4 - 1.4	24.8 - 30.7	S	24436.0 - 28462.0
	2	O	0.2 - 0.4	67 - 67	0.5 - 0.5	52.3 - 56.6	S	29000.0 - 33000.0
	6	PP	0.2 - 0.4	75 - 90	0.5 - 0.5	47.2 - 54.5	S	28800.0 - 32600.0
[21]	2	Ç	0.4 - 1.2	55 - 55	0.5 - 0.5	46.3 - 50.3	S	30800.0 - 32000.0
[22]	16	Ç	0.5 - 2.0	45 - 80	0.8 - 0.9	34.5 - 85.7	S	20640.0 - 33855.0
[22]	16	Ç	1.0 - 2.5	120 - 120	0.7 - 0.7	50.3 - 70.5	S	28682.2 - 33232.7
[23]	39	Ç	0.4 - 3.4	50 - 100	1.1 - 1.1	32.0 - 48.0	S	19662.0 - 48897.0
[24]	7	Ç	0.5 - 1.5	60 - 60	1.5 - 1.9	79.7 - 115.0	B	41000.0 - 47600.0
[25]	10	Ç	1.0 - 6.0	40 - 80	0.3 - 0.3	151.0 - 173.0	B	42100.0 - 43400.0
[26]	3	P	0.1 - 0.3	66 - 66	1.0 - 1.0	77.0 - 80.5	B	38961.0 - 39473.0
[27]	2	PP	0.1 - 0.2	333 - 333	1.7 - 1.7	67.8 - 78.9	B	45700.0 - 49500.0
	2	Ç	0.4 - 0.5	79 - 79	1.6 - 1.6	74.7 - 77.9	B	44900.0 - 45300.0
	4	Ç + PP	0.5 - 0.7	79 - 333	1.6 - 1.6	72.9 - 79.6	B	41400.0 - 44900.0
[28]	6	PVA	0.2 - 0.6	800 - 800	1.9 - 1.9	42.0 - 58.0	B	41400.0 - 49500.0
[29]	9	B	1.0 - 3.0	1389 - 1389	0.8 - 0.8	75.0 - 85.8	B	22200.0 - 29900.0
[30]	19	Ç	0.5 - 1.0	60 - 60	1.6 - 1.6	62.9 - 88.0	B	43084.0 - 44609.5
[31]	26	Ç	0.5 - 2.0	20 - 40	1.6 - 1.7	58.4 - 86.3	B	27603.0 - 29330.8
[32]	4	PP	0.3 - 0.5	100 - 500	1.7 - 1.7	59.4 - 71.9	B	29600.0 - 33200.0
	2	Ç	0.3 - 0.5	50 - 50	1.7 - 1.7	68.0 - 75.1	B	36800.0 - 41700.0
[33]	6	Ç	0.5 - 2.0	60 - 60	1.5 - 1.5	39.1 - 96.5	B	28640.0 - 38950.0
[34]	6	PVA	0.1 - 0.5	428 - 857	1.7 - 1.7	58.5 - 67.0	B	36000.0 - 40000.0
[35]	12	Ç	0.5 - 1.5	75 - 75	1.2 - 1.7	33.7 - 72.8	B	22471.2 - 44140.4

Karışım A'da K/I 'nin 1.5'i aşması durumunda birkaç numune haricinde beton basınç dayanımında azalma olduğu görülürken, Karışım B'de 1.5 sınırından sonra dayanımdaki azalma daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 1'de verilen $K/I - f_c$ grafiklerine bakıldığında, Karışım A ve B için optimum değerlerin 1.5 alınmasının uygun olacağı anlaşılmaktadır.

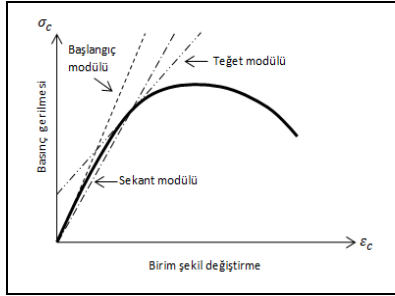


Şekil 1. Farklı karışımlar için K/I 'nin f_c üzerindeki etkisi.

Figure 1. The influence of K/I on f_c for different mixtures.

4 Elastisite Modülü

Elastisite modülü, malzemeye uygulanan kuvvet ile açığa çıkan şekil değiştirme arasındaki bağıntı olarak tanımlanabilir. Yük oranı arttıkça, basınç gerilmesi-birim şekil değiştirme ($\sigma_c - \epsilon_c$) ilişkisi elastik davranıştan uzaklaşmaktadır. Bu sebeple beton elemanlar için üç farklı elastisite modülü tanımlanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Beton için tanımlanan elastisite modülleri.

Figure 2. Defined elastic modulus types for concrete.

Başlangıç elastisite modülü, $\sigma_c - \epsilon_c$ eğrisinin doğrusal olduğu kabul edilen başlangıç kısmına çizilen teğetin eğimidir. Sekant modülü grafiğin orijininden başlayan ve eğri üzerinde belirlenen bir gerilme noktasından geçen sekantın eğimi iken, eğrinin üzerinde herhangi bir noktadan geçen teğetin eğimi de teğet modülü olarak adlandırılmaktadır. Yönetmelikler sekant modülünün hesabında $0.4 - 0.5 f_c$ 'yi kullanmaktadır [39]. Düşük gerilme değerlerine maruz kalan betonlar için başlangıç modülü kullanılabilirken, emniyet gerilmesi değerine yakın gerilmeler söz konusu olduğunda sekant modülünün kullanımı tercih edilmektedir [40]. Basınç dayanımında olduğu gibi elastisite modülü de lif içeriğinin artmasıyla liflerin karışım içindeki yönelim ve dağılımlarındaki farklılıklardan dolayı lifsiz karışımlara göre $\pm\%25$ oranları arasında değerler alabilmektedir [41].

Lif kullanımının elastisite modülü üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Nanni ve Johari [42] çelik lif katkısının elastisite modülünü artırdığını ileri sürerken, Muscalu ve diğ. [43] düşürdüğünü bildirmişlerdir. Ezeldin ve diğ. [16] çelik lif kullanımının sekant elastisite modülünü önemli miktarda artırdığını rapor etmiştir.

Alberti [17], polyolefin ve çelik lif kullandığı çalışmada iki lif tipinin de elastisite modülü üzerinde önemli bir etki yapmadığı sonucuna varmıştır. Diğer bir çalışmada, polipropilen lif miktarının artırılması sonucunda elastisite modülünün lifsiz betona göre yaklaşık %10 oranında azaldığı gözlemlenmiştir [44]. Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında lifli betonun başlangıç ve sekant elastisite modülleri üzerine farklı çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu sebeple, çalışma kapsamında bu iki tip elastisite modülü de göz önüne alınmıştır.

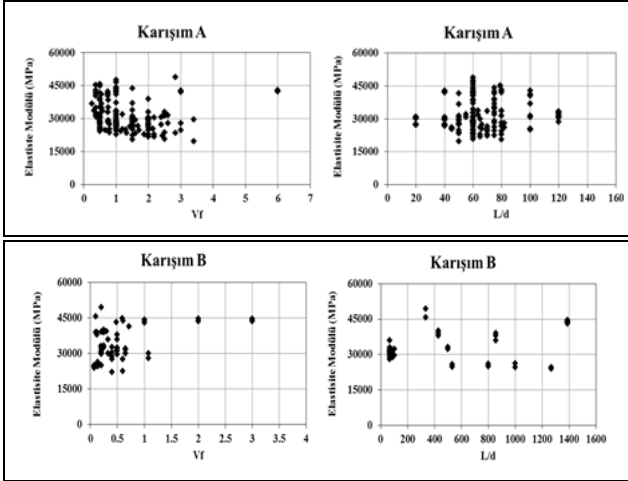
4.1 Elastisite modülü için önerilen denklem

Elastisite modülü, betonun dayanımına bağlı olduğu için beton dayanımını etkileyen tüm faktörlerden de etkilenmektedir. Ancak, herhangi bir hesap formülü oluşturulurken bu faktörlerin tümünün dikkate alınması pratik bir yaklaşım olmayacaktır [45]. Elastisite modülü formülleri oluşturulurken beton basınç dayanımı genellikle tek değişken olarak kabul edilmiştir. Betonun dayanım ve şekil değiştirmesi üzerinde etkili pek çok parametre olmasına rağmen sadece basınç dayanımının dikkate alınmasından dolayı farklı dayanım aralıkları için farklı elastisite modülü formülleri önerilmesi gerekmiştir. Bazı çalışmalarda lif etkisi göz ardı edilmekte ve yönetmeliklerde normal betonlar için önerilen formüller lifli betonların elastisite modülünün hesaplanmasında da kullanılmaktadır; ancak bu kullanımın her durum için geçerli olmasını beklemek doğru bir yaklaşım değildir. Bu noktadan yola çıkılarak çalışma kapsamında dikkate alınan tüm lif tipleri için bir adet temel elastisite modülü hesap formülü önerilmiştir (Denklem 1).

$$E = 8100f_c^{1/3}X_1X_2X_3 \quad (1)$$

Denklem 1'in sabit bölümü ($8100f_c^{1/3}$) regresyon analizi kullanılarak belirlenmiştir. Denklem 1'de yer alan X_1 değişkeni karışımın K/I oranına bağlı bir değişkendir. Suksawang ve diğ. [46] yaptıkları çalışmada K/I oranının 1'den büyük olduğu durumlarda liflerin elastisite modülünü etkilemediğini öne sürmüşlerdir. Ancak Şekil 1'e bakıldığında elde olan datalar 1-1.5 aralığı için yeterli fikri vermese de, 1.5 sınırından sonra birkaç numune haricinde dayanımda düşüş olduğu görülebilmektedir. Bu sebeple mevcut çalışmada K/I oranının 1.5'ten küçük ve eşit olduğu durumlarda elastisite modülünün arttığı, aksi durumda ise azaldığı kabulü yapılmıştır. Bilindiği üzere sekant modülü başlangıç modülünden küçük olmaktadır, ancak çelik lif dışındaki liflerin kullanıldığı numunelerde $0.4 - 0.5 f_c$ aralığı için birim şekil değiştirmenin dikkate değer derecede artmadığı görülmüştür. Bu sebeple PVA, polipropilen, polyolefin, bazalt ve olefin kullanılan numunelerin sekant elastisite modülü ile başlangıç elastisite modüllerinin aynı denklemlerle hesaplanabileceği sonucuna varılmıştır. Bu durumda söz konusu liflerin başlangıç ve sekant elastisite modüllerinin hesabı için sadece Denklem 2'deki $X_{1,b}$ değeri kullanılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde çelik lifli betonların başlangıç ve sekant elastisite modülleri üzerinde en etkili parametrenin K/I oranı olduğu belirlenmiştir. Çelik lifli betonlarda başlangıç ve sekant modüllerinin hesabı için Denklem 2'de verilen $X_{1,b}$ (başlangıç elastisite modülü için) ve $X_{1,s}$ (sekant elastisite modülü için) kullanılmıştır. X_2 değişkeni karışımında yer alan lif oranının etkisini yansıtmak amacı ile kullanılmıştır (Denklem 3). Fanella ve Naaman [41] çelik, cam ve polipropilen liflerinden sadece çelik lif kullanımının basınç dayanımını artırdığını, tüm lif tiplerinin maksimum gerilmeye açığa çıkan birim şekil değiştirmeyi artırmasının yanı sıra lif

narınlık oranı ve hacimsel oranı ile basınç dayanımının artabileceğini, ancak elastisite modülünün azalacağını öne sürmüşlerdir. Neves ve Almeida [47] farklı narınlık oranına sahip çelik lifleri maksimum %1.5 oranında kattıkları beton silindirik numuneler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada lif katkısının artmasının elastisite modülü üzerinde önemli bir etki yapmadığını bildirmişlerdir. Şekil 3'te Karışım A için $V_f \leq 1$ olduğu durumlarda lif kullanımının elastisite modülünü artırdığı, 1'den büyük olması durumunda ise elastisite modülünü düşürdüğü görülmektedir. Karışım B için ise $V_f \leq 0.6$ için elastisite modülünün arttığı, $V_f > 0.6$ için ise bir değişim olmadığı söylenebilir ancak veritabanı üzerinde yapılan hesaplamalar bu sınırlamanın sonuçları önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Bu sebeple çelik lif dışındaki lifler için X_2 değişkeni 1 olarak alınmıştır. Denklem 1'de yer alan son değişken ise L/d 'ye bağlı olan X_3 değişkenidir (Denklem 4). Jo ve diğ. [35], çelik lifler için narınlık oranının 50'yi aşmadığı durumlarda elastisite modülünün arttığını, bu değerden büyük değerler için elastisite modülünün azaldığını rapor etmiştir. Şekil 3'te Karışım A için $L/d \leq 60$ olduğu durumlarda elastisite modülünün arttığı, $L/d > 60$ için ise azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Lif narınlık ve hacimsel oranlarına göre karışımların elastisite modülü değişimleri.

Figure 3. Elastic modulus variations of mixtures according to aspect and volumetric ratios of fiber.

Karışım B için ise L/d 'nin 200-400 aralığında yer alan 2 adet numune göz ardı edilecek olursa belirgin bir sınır olmadığı görülmektedir. Bu sebeple X_3 değeri Karışım B için dikkate alınmamıştır.

$$X_{1,b} = \begin{cases} \text{Eğer } K/I \leq 1.5 & ; 1 + \frac{(K/I)}{10} \\ \text{Eğer } K/I > 1.5 & ; 1 - \frac{(K/I)}{10} \end{cases} \quad (2)$$

$$X_{1,s} = \begin{cases} \text{Eğer } K/I \leq 1.5 & ; 0.85 + \frac{(K/I)}{10} \\ \text{Eğer } K/I > 1.5 & ; 0.85 - \frac{(K/I)}{10} \end{cases}$$

$$X_2 = \begin{cases} \text{Eğer } V_f > 1 & ; (1 - 0.01V_f) \\ \text{Eğer } V_f \leq 1 & ; (1 + 0.01V_f) \end{cases} \quad (3)$$

$$X_3 = \begin{cases} \text{Eğer } L/d \leq 60 & ; 1 + \frac{1}{(L/d)} \\ \text{Eğer } L/d > 60 & ; 1 - \frac{1}{(L/d)} \end{cases} \quad (4)$$

4.2 Karşılaştırmalarda kullanılan elastisite modülü denklemleri

Önerilen denklemin (Denklem 1) kullanılabilirlik durumunu belirleyebilmek amacı ile deney sonuçları ve literatürden derlenen denklemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken yüzdesel ortalama mutlak hata (ORT. M. H. (%)) (Denklem 5), ortalama (ORT.) (Denklem 6), E_H/E_D için dağılımlardan elde edilen minimum (MİN.) ve maksimum (MAKS.) değerler kullanılmıştır.

$$ORT. M. H. (\%) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (E_D - E_H)}{E_D} \right| \times 100 \quad (5)$$

$$ORT. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_D}{E_H} \quad (6)$$

Burada, E_D ve E_H sırasıyla deneysel ve hesaplanan elastisite modülleridir. n , veritabanında yer alan numune sayısını göstermektedir. Karşılaştırmalarda kullanılacak denklemler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de yer alan denklemlerden Mansur ve diğ.'nin [24] önermiş olduğu denklem sadece $V_f \leq 1.5$ olan çelik lif katkılı betonlar için başlangıç elastisite modülünü hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır. Suksawang ve diğ.'nin [46] önermiş olduğu denklem ise farklı lif tipleri için başlangıç, sekant ve tanjant elastisite modüllerinin hesabı için kullanılmaktadır. Diğer denklemler ise sadece sekant elastisite modülünün hesabı için önerilmişlerdir.

4.3 Başlangıç elastisite modüllerinin karşılaştırılması

4.3.1 Çelik lifli karışımlar

Çelik lif katkılı betonların başlangıç elastisite modüllerinin hesabı için Tablo 2'de yer alan Mansur ve diğ. [24] ve Saksawang ve diğ. [46]'nin denklemleri ile önerilen denklem (Denklem 1) kullanılmıştır. Denklem 1'in hesabı için sırasıyla Denklem 2, 3 ve 4'te yer alan $X_{1,b}$, X_2 ve X_3 değişkenleri kullanılmıştır. Karşılaştırmalar için kullanılacak değerler Tablo 3'te, dağılımlar ise Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'teki dağılımların V_f 'ye bağlı olarak verilmesinin sebebi, Mansur ve diğ. [24]'nin önermiş olduğu denklemin bu değere göre sınırlandırılmasıdır. Şekil 4'ten de anlaşılacağı üzere Mansur ve diğ. [24] ve Suksawang ve diğ. [46]'nin sonuçlarının büyük çoğunluğu deney sonuçlarından çok yüksek değerler vermiştir. Tablo 3'te de söz konusu denklemlerin MAKS. değerleri sırası ile 1.59 ve 1.56 olarak çıkmıştır. MİN. Değerleri her ne kadar önerilen denklemin sonucuna nazaran daha kabul edilebilir olsa da (0.93, 0.80, 0.62) önerilen denklem için dağılımların genel sonuçlarını yansıtan ORT. M.H. (%) ve ORT. değerleri 8.97 ve 0.99 ile diğer denklemlerin sonuçlarından daha kabul edilebilir sonuçlar vermektedir.

Tablo 2. Karşılaştırmalarda kullanılan elastisite modülü denklemleri.

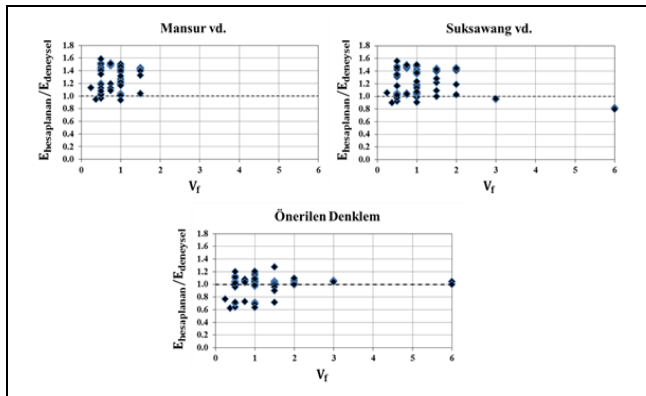
Table 2. Elastic modulus equations used in comparisons.

Referans	Denklem	Kısıtlamalar
ACI 318-14 [48]	$E_c = 4700\sqrt{f_c}$ (MPa)	$f_c \leq 41$ (MPa)
NS 3473 [49]	$E_c = 9.5(f_c)^{0.3}$ (GPa)	
EN 2004 [50]	$E_c = 22\left(\frac{f_c + 8}{10}\right)^{0.3}$ (GPa)	
TS500 [51]	$E_c = 3250\sqrt{f_c} + 14000$ (MPa)	$f_c \leq 50$ (MPa)
Iravani [52]	$E_c = 3800\sqrt{f_c}$	$55 < f_c < 125$ (MPa)
Thomas ve Ramaswamy [53]	$E_c = 4200\sqrt{f_c}$	$30 < f_c < 75$ (MPa)
ACI 363 R-10 [54]	$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6900$	$41 < f_c \leq 82$ (MPa)
KCI [55]	$E_c = 8500^3\sqrt{f_c + 8}$	
Mansur ve diğ. [24]	$E_c = (10300 - 400 \times V_f)f_c^{1/3}$	$V_f \leq 1.5$
Suksawang ve diğ. [46]	$E_c = 4700\Lambda_{V_f}\sqrt{f_c}$ $\Lambda_{V_f} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \frac{K}{I} > 1 \\ \frac{1 + 0.7V_f}{2} & \text{eğer } \frac{K}{I} \leq 1 \end{cases}$	

Tablo 3. Çelik lifli karışımlar için başlangıç elastisite modülü hesaplarından elde edilen sonuçlar.

Table 3. Results of initial elastic modulus calculations for mixtures with steel fibers.

Denklem	ORT. M. H. (%)	ORT.	MİN.	MAKS.
Mansur ve diğ. [24]	31.57	1.31	0.93	1.59
Suksawang ve diğ. [46]	27.15	1.25	0.80	1.56
Önerilen denklem	8.97	0.99	0.62	1.27



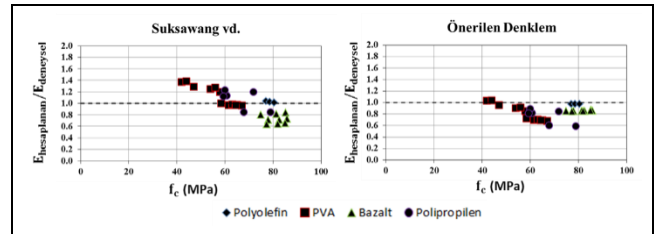
Şekil 4. Çelik lifli karışımların başlangıç elastisite modülü dağılımları.

Figure 4. Initial elastic modulus distributions of mixtures with steel fibers.

Bu durumda önerilen denklemin, çelik lifli karışımların başlangıç elastisite modülü için literatürde yer alan ve aynı amaçla kullanılan denklemlerden daha kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmektedir.

4.3.2 Çelik lif dışındaki liflerin kullanıldığı karışımlar

Çelik lif dışında dikkate alınan diğer lif tiplerinin (Polyolefin, PVA, bazalt, polipropilen) kullanıldığı karışımların başlangıç elastisite modüllerinin karşılaştırılması için Tablo 2'de yer alan denklemlerden sadece Suksawang ve diğ.'nin [46] önermiş olduğu denklem ve önerilen denklem (Denklem 1) kullanıma uygundur. Denklem 1'in hesabı için sadece Denklem 2'de yer alan $X_{1,b}$ değişkeni kullanılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Tablo 4'te ve dağılımlar Şekil 5'te verildiği gibidir.



Şekil 5. Çelik lif dışındaki liflerin kullanıldığı karışımların başlangıç elastisite modülü dağılımları.

Figure 5. Initial elastic modulus distributions of mixtures using fibers other than steel fiber.

Tablo 4'te yer alan sonuçlar polyolefin için her iki denklemin de kullanılabilceğini göstermektedir. Ancak, hesaplanan değerlerin deney sonuçlarından kabul edilebilir düzeyde küçük olması, büyük olmasından daha kabul edilebilir bir durum olduğundan polyolefin için önerilen denklemin kullanımı daha uygundur. PVA için ise ORT. M. H. (%)'ya ve MİN. değerlerine bakıldığında Suksawang ve diğ.'nin [46] sonuçlarının önerilen denklemden daha iyi olduğu görülse de dağılımlara ve ORT. ve MİN. değerlerine bakıldığında Suksawang ve diğ.'nin [46] sonuçlarının deney sonuçlarını büyük tahmin ettiği görülmektedir. Sonuçlar bazalt için önerilen denklemin uygunluğunu gösterirken polipropilen için de PVA ile aynı durumun ortaya çıktığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre söz konusu lif tipleri için önerilen denklemin kullanılması Suksawang ve diğ.'nin [46] önermiş olduğu denklemden daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

4.4 Sekant elastisite modüllerinin karşılaştırılması

4.4.1 Çelik lifli karışımlar

Çelik lif katkılı betonların sekant elastisite modüllerinin hesabı için Tablo 2'deki Mansur ve diğ.'nin [24] önermiş olduğu denklem haricindeki tüm denklemler ve önerilen denklem (Denklem 1) kullanılmıştır. Denklem 1'in hesabı için sırasıyla Denklem 2, 3 ve 4'te yer alan $X_{1,s}$, X_2 ve X_3 değişkenleri kullanılmıştır.

Karşılaştırmalar için kullanılacak değerler Tablo 5'te, dağılımlar ise Şekil 6'da verilmiştir. MAKS. ve ORT. M. H. (%) sonuçlarına bakıldığında EN 2004 [50] (1.81, 29.24) ve TS 500 [51] (1.78, 30.60) denklemlerinin deney sonuçlarına en uzak sonuçları verdikleri görülmektedir. ACI 318-14 [48] denkleminin $f_c \leq 41$ (MPa) aralığı için kullanılabilirdiği göz önüne alındığında, Şekil 6'da önerilen denklemin (Denklem 1) sonuçlarının söz konusu aralık için deney sonuçlarına daha yakın çıktığı görülmektedir. ACI 363 R-10 [54] denkleminin

ilgili yönetmelikçe önerilen kullanım aralığı $41 < f_c \leq 82$ (MPa)'dir. Şekil 6'da verilen dağılımlara bakıldığında dikkate alınan aralık için önerilen denklemin deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, önerilen denklem (Denklem 1) $30 < f_c < 75$ (MPa) aralığı için Thomas ve Ramaswamy'nin [53] denkleminde daha iyi sonuçlar vermektedir (Şekil 6). Her ne kadar Tablo 5'te Iravani'nin [52] sonuçları deney sonuçları ile önerilen denklemden daha iyi sonuçlar verdiği anlaşılırsa, Iravani'nin [52] önermiş olduğu denklem $55 < f_c < 125$ (MPa) için geçerlidir ve Şekil 6'daki dağılımlar önerilen denklemin (Denklem 1) söz konusu denkleme kıyasla deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. NS 3473 [49], KCI [55], Suksawang ve diğ. [46] ve önerilen denklem (Denklem 1) Tablo 5'e göre kıyaslandığında önerilen denklemin MİN. değeri 0.57 ile diğerlerinden küçüktür. Ancak MAKS. değerleri ve Şekil 6'da verilen dağılımlar diğer denklemlerin deney sonuçlarını önerilen denklemden daha büyük tahmin ettiğini göstermektedir. ORT. M. H. (%) ve ORT. değerleri de bu durumu kanıtlamaktadır. Buradan yola çıkılarak önerilen denklemin (Denklem 1) çelik lifli karışımların sekant elastisite modülü için dikkate alınan diğer denklemlerden daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

4.4.2 Çelik lif dışındaki liflerin kullanıldığı karışımlar

Çelik lif dışındaki liflerin sekant elastisite modüllerinin hesaplanabilmesi için veriler lif tipine göre dört gruba ayrılmıştır (Polyolefin, PVA, olefin, polipropilen). Hesaplarda kullanılan denklemler ACI 318-14 [48], NS 3473 [49], EN 2004 [50], TS 500 [51], Thomas ve Ramaswamy [53], Suksawang ve diğ. [46] ve önerilen denklemdir (Denklem 1). Denklem 1'in hesabı için sadece Denklem 2'de yer alan $X_{1,b}$ değişkeni kullanılmıştır.

Tablo 4. Çelik lif dışındaki liflerin kullanıldığı karışımlar için başlangıç elastisite modülü hesaplarından elde edilen sonuçlar.

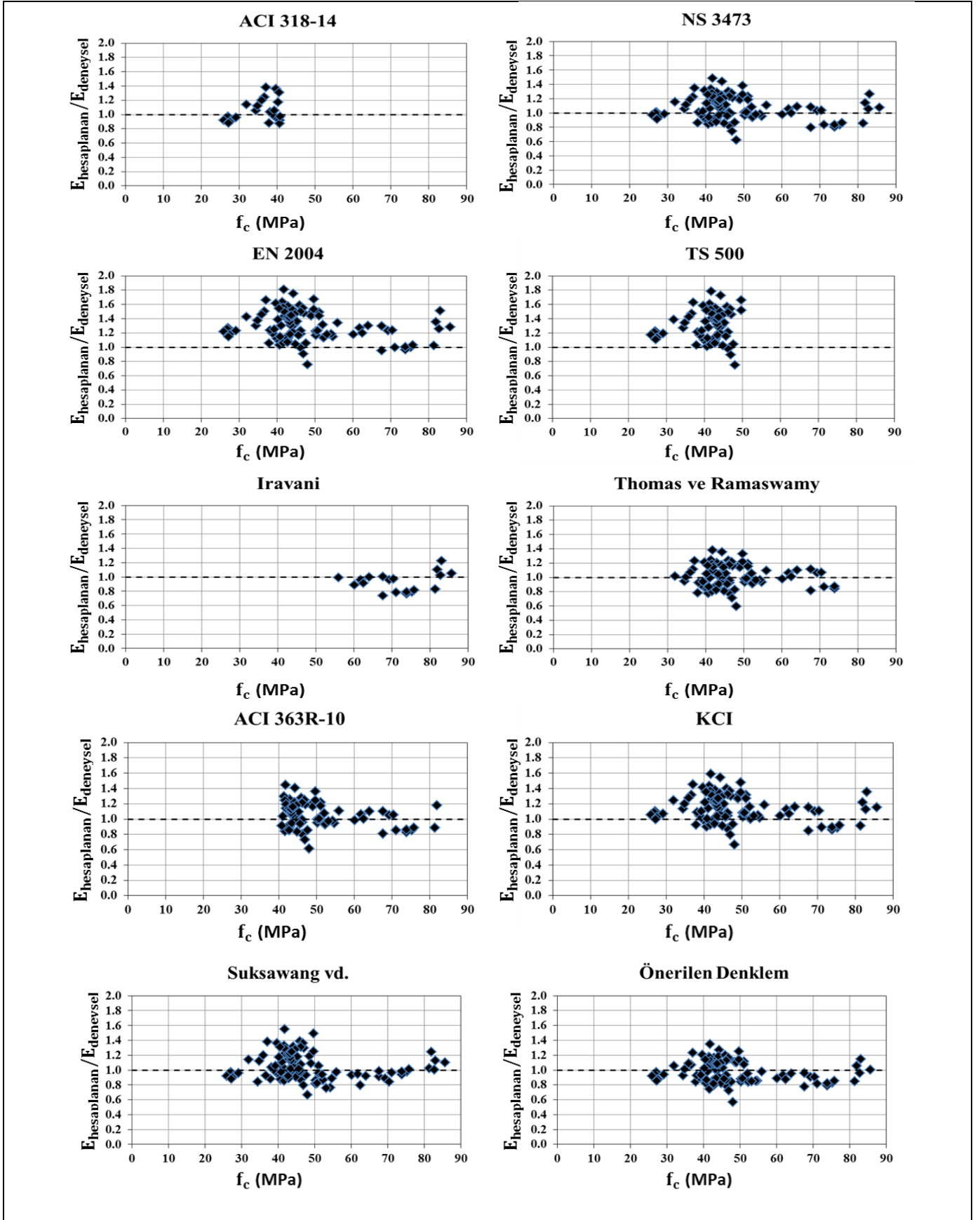
Table 4. Results obtained from initial elastic modulus calculations for mixtures using fibers other than steel fiber.

Lif tipi	Denklem	ORT. M. H. (%)	ORT.	MİN.	MAKS.
Polyolefin	Suksawang ve diğ. [46]	2.97	1.03	1.01	1.04
	Önerilen denklem	2.71	0.97	0.97	0.97
PVA	Suksawang ve diğ. [46]	15.98	1.14	0.96	1.39
	Önerilen denklem	18.84	0.82	0.68	1.03
Bazalt	Suksawang ve diğ. [46]	27.36	0.73	0.63	0.84
	Önerilen denklem	14.45	0.86	0.85	0.87
Polipropilen	Suksawang ve diğ. [46]	16.49	1.06	0.84	1.23
	Önerilen denklem	23.87	0.76	0.59	0.89

Tablo 5. Çelik lifli karışımlar için sekant elastisite modülü hesaplarından elde edilen sonuçlar.

Table 5. Results obtained from secant elastic modulus calculations for mixtures with steel fibers.

Denklem	ORT. M. H. (%)	ORT.	MİN.	MAKS.
ACI 318-14 [48]	12.59	1.05	0.87	1.38
NS 3473 [49]	13.61	1.05	0.62	1.48
EN 2004 [50]	29.24	1.28	0.75	1.81
TS500 [51]	30.60	1.29	0.75	1.78
Iravani [52]	11.67	0.93	0.74	1.23
Thomas ve Ramaswamy [53]	12.93	1.01	0.60	1.38
ACI 363 R-10 [54]	13.69	1.04	0.61	1.44
KCI [55]	17.27	1.13	0.67	1.59
Suksawang ve diğ. [46]	14.09	1.04	0.67	1.55
Önerilen denklem	12.47	0.97	0.57	1.35



Şekil 6. Çelik lifli karışımların sekant elastisite modülü dağılımları.
Figure 6. Secant elastic modulus distributions of mixtures with steel fibers.

Karşılaştırma sonuçları Tablo 6'da ve dağılımlar Şekil 7'de verildiği gibidir. Polyolefin içeren numuneler için Thomas ve Ramaswamy [53] ve Suksawang ve diğ.'nin [46] Tablo 6'da yer alan sonuçları diğer denklem sonuçları ile karşılaştırıldığında deney sonuçlarını oldukça küçük hesapladıkları anlaşılmaktadır. EN 2004 [50] ve TS 500 [51] denklemlerinin ise hem Şekil 7'de verilen dağılımlardan hem de Tablo 6'daki değerlere bakıldığında veri noktalarının büyük çoğunluğunu deney sonuçlarından daha büyük tahmin ettiği görülmüştür. ACI 318-14'ün [48] ilgili kısıtlama aralığındaki (Tablo 2) dağılımı (Şekil 7) önerilen denkleme oranla deney sonuçlarından daha uzak değerler vermektedir. NS 3473 [49] ve önerilen denklemin (Denklem 1) sonuçları ise birbirine oldukça yakın olmasına karşın önerilen denklemin sonuçları daha iyi çıkmıştır.

PVA içeren numunelerde ise önerilen denklemin sonuçları kullanılabilir düzeyde olsa da ACI 318-14 [48]'ün sonuçları dikkate alınan tüm denklemlerin sonuçları arasında deney sonuçlarına kullanılabilirlik açısından en yakındır. Olefin katkılı numunelerde EN 2004 [50]'ün tüm verileri deney sonuçlarından büyük tahmin ettiği görülmektedir. Thomas ve Ramaswamy [46] ise en iyi sonuçlara sahip gibi görünse de sadece bir noktanın sonucudur ve kesin bir yorum yapılamaz. Diğer denklemlerin sonuçları arasında deney sonuçlarına en yakını NS 3473'ün [49] sonuçlarıdır. Ancak veri tabanında olefin katkılı sadece iki adet numune vardır ve bu sebeple söz konusu lif tipi hakkında kesin bir yorum yapmak için veri sayısı yetersizdir. Polipropilen katkılı numune sonuçlarına bakıldığında EN 2004 [50] ve TS 500'ün [51] sonuçları deney sonuçlarını oldukça büyük tahmin etmektedir. $30 < f_c < 75$ (MPa) aralığı için ise en iyi sonucu Thomas ve Ramaswamy

[53] verirken genel anlamda deney sonuçları ile en uyumlu sonuçları NS 3473'ün [49] verdiği görülmektedir.

4.5 Karma lif kullanılan karışımların elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Karma lif kullanılan karışımlarda çelik lif ile polyolefin, PVA veya polipropilen birlikte kullanılmıştır (Tablo 1). Başlangıç elastisite modülü hesabı için sadece Suksawang ve diğ. [46] ve önerilen denklem (Denklem 1) kullanılmıştır ve söz konusu denklemlerin sonuçlarına bakıldığında Suksawang ve diğ.'nin [46] denkleminin önerilen denklemin sonuçlarına göre deney sonuçları ile çok daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Sekant elastisite modülü karşılaştırılmalarında hem Tablo 7'deki sonuçlardan hem de Şekil 8'deki dağılımlardan EN 2004 [50] ve TS 500'ün [51] deney sonuçlarının tamamını büyük tahmin ettiği anlaşılmaktadır. Sekant elastisite modülünün hesaplandığı numunelerin maksimum basınç dayanımı 36.9 MPa'dır (Tablo 1). Bu sebeple ACI 318-14 [48] denklemi elde bulunan tüm numunelere uygulanmıştır. Suksawang ve diğ. [46]'nin önermiş olduğu denklem ACI 318-14 [48]'e lif oranının ilave edilmesi ile oluşturulmuştur. Tablo 6'daki ilgili denklem sonuçlarına bakıldığında lif etkisi dikkate alınmadığında (ACI 318-14 [48]) sonuçların deney sonuçlarına daha yakın çıktığı görülmektedir. Tablo 1'de de verildiği gibi, söz konusu numuneler için $V_f < 1$ 'dir. Bu durumda lif katkısının $V_f < 1$ için karma lif içeren numunelerde dikkate alınması gerekmediği düşüncesi açığa çıkmaktadır. NS 3473 [49]'de ACI 318-14 [48] gibi lifsiz beton elemanların elastisite modülü hesabı için önerilmiş denklemlerdir. Tablo 6'da da görüldüğü gibi en düşük ORT. M. H. (%) değeri 5 ile bu denkleme aittir. Elde olan numuneler için her ne kadar NS 3473 [49] en iyi sonucu vermiş olsa da, $V_f < 1$ ve $f_c \leq 41$ MPa için ACI 318-14 [48] denkleminin kullanımı da uygundur.

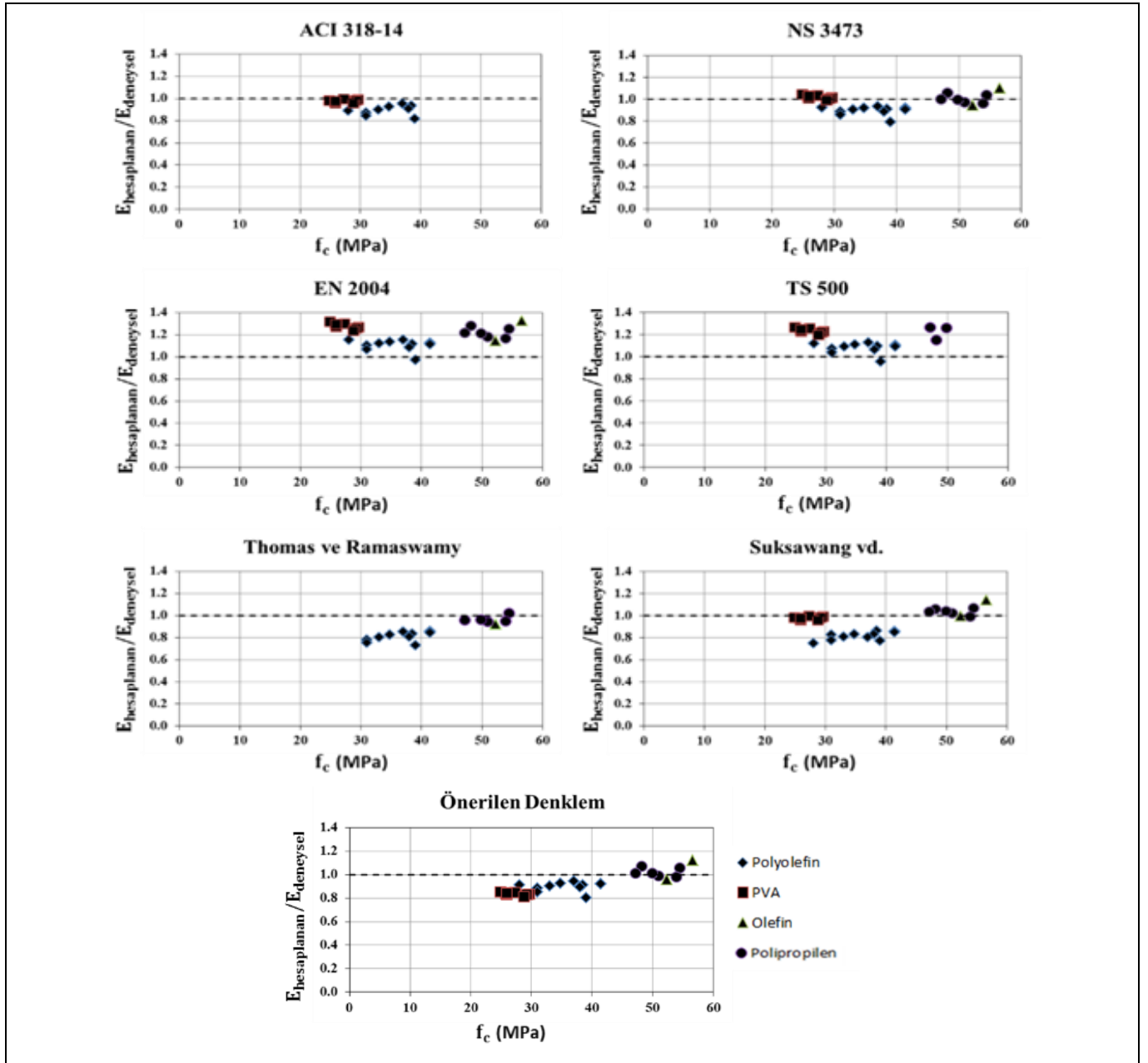
Tablo 6. Çelik lif dışındaki liflerin kullanıldığı karışımlar için sekant elastisite modülü hesaplarından elde edilen sonuçlar.

Table 6. Results obtained from secant elastic modulus calculations for mixtures using fibers other than steel fibers.

Lif tipi	Denklem	ORT. M. H. (%)	ORT.	MİN.	MAKS.
Polyolefin	ACI 318-14 [48]	10.70	0.89	0.82	0.95
	NS 3473 [49]	10.56	0.89	0.79	0.94
	EN 2004 [50]	10.88	1.10	0.97	1.15
	TS500 [51]	8.56	1.08	0.95	1.13
	Thomas ve Ramaswamy [53]	19.12	0.81	0.73	0.86
	Suksawang ve diğ. [46]	18.66	0.81	0.75	0.86
	Önerilen denklem	10.33	0.90	0.80	0.94
PVA	ACI 318-14 [48]	2.43	0.98	0.96	0.99
	NS 3473 [49]	2.20	1.02	0.99	1.04
	EN 2004 [50]	27.87	1.28	1.26	1.32
	TS500 [51]	23.30	1.23	1.19	1.26
	Suksawang ve diğ. [46]	2.43	0.98	0.96	0.99
	Önerilen denklem	16.37	0.84	0.81	0.85
	NS 3473 [49]	7.79	1.02	0.94	1.10
Olefin	EN 2004 [50]	23.53	1.24	1.14	1.33
	Thomas ve Ramaswamy [53]	7.96	0.92	0.92	0.92
	Suksawang ve diğ. [46]	7.24	1.07	1.00	1.14
	Önerilen denklem	8.07	1.04	0.96	1.12
	NS 3473 [49]	2.66	1.00	0.96	1.05
Polipropilen	EN 2004 [50]	21.77	1.22	1.17	1.28
	TS500 [51]	22.31	1.22	1.15	1.26
	Thomas ve Ramaswamy [53]	4.24	0.97	0.94	1.02
	Suksawang ve diğ. [46]	3.79	1.03	0.99	1.07
	Önerilen denklem	3.03	1.02	0.98	1.07

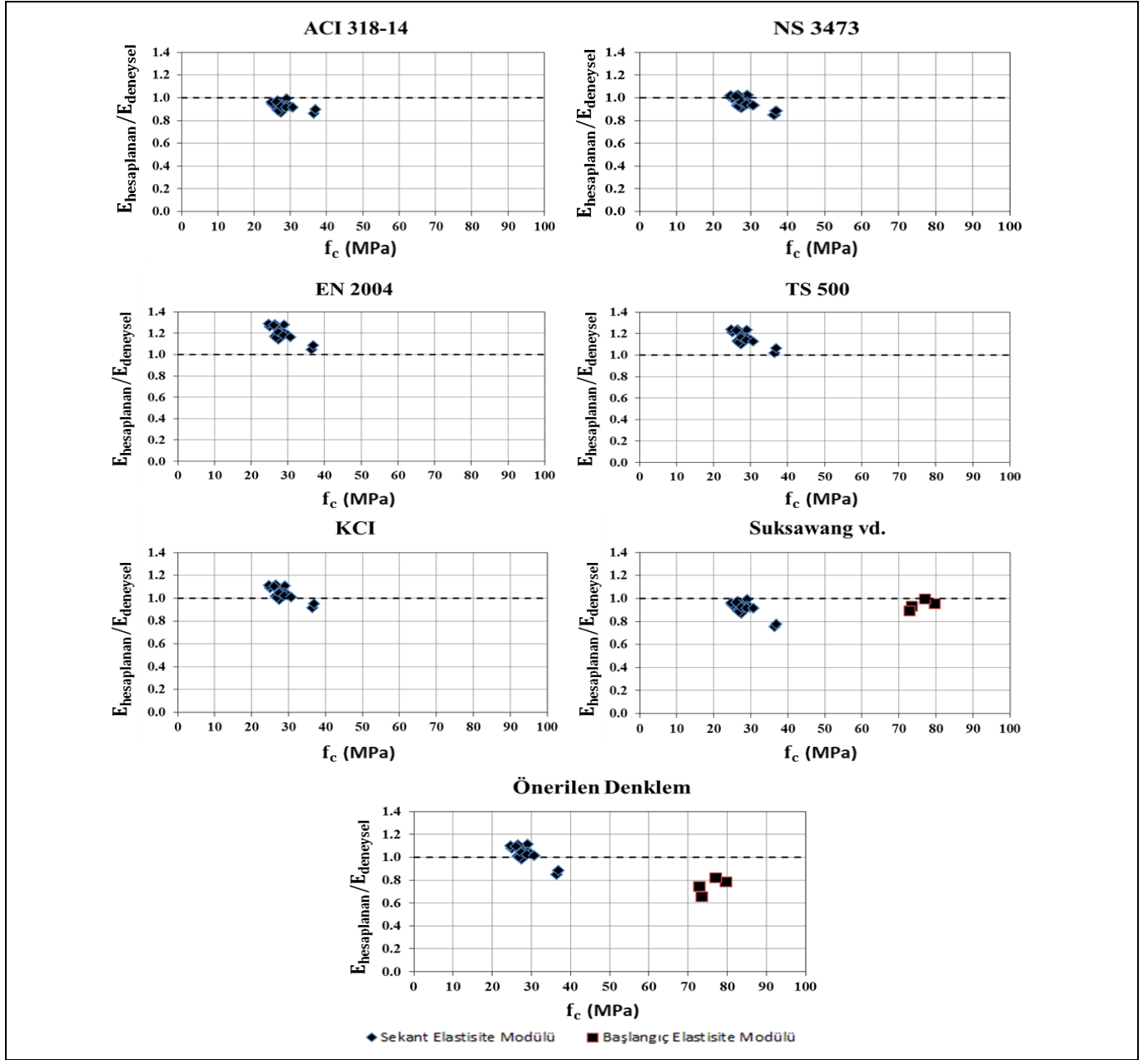
Tablo 7. Karma lif kullanılan karışımlar için başlangıç ve sekant elastisite modülü hesaplarından elde edilen sonuçlar.
Table 7. Results obtained from initial and secant elastic modulus calculations for mixtures used combined fibers.

	Denklem	ORT. M. H. (%)	ORT.	MİN.	MAKS.
Başlangıç elastisite modülü	Suksawang ve diğ. [46]	5.59	0.94	0.89	1.00
	Önerilen denklem	24.9	0.75	0.66	0.82
Sekant elastisite modülü	ACI 318-14 [48]	7.42	0.93	0.86	0.99
	NS 3473 [49]	5.00	0.96	0.85	1.02
	EN 2004 [50]	19.88	1.20	1.04	1.29
	TS500 [51]	15.83	1.16	1.02	1.24
	KCI [55]	5.84	1.04	0.91	1.11
	Suksawang ve diğ. [46]	8.7	0.91	0.75	0.99
	Önerilen denklem	6.27	1.03	0.85	1.11



Şekil 7. Çelik lif dışındaki liflerin kullanıldığı karışımların sekant elastisite modülü dağılımları.

Figure 7. Secant elastic modulus distributions of mixtures using fibers other than steel fiber.



Şekil 8. Karma lif kullanılan karışımların başlangıç ve sekant elastisite modülü dağılımları.

Figure 8. Initial and secant elastic modulus distributions of mixtures used combined fibers.

5 Sonuçlar

Bu çalışma çelik, PVA, polipropilen, polyolefin, bazalt ve olefin lif katkılı betonların başlangıç ve sekant elastisite modüllerinin incelemesini içermektedir. Bu sebeple literatürde yer alan deney numuneleri ve formüller derlenmiş, çalışma kapsamında önerilen denklem ve mevcut denklemlerin sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

1. Dikkate alınan tüm lif tipleri için $K/\bar{I} \leq 1.5$ için beton basınç dayanımının arttığı, bu orandan sonra lif katkısının beton basınç dayanımını azalttığı görülmüştür,
2. Çelik lif katkılı betonlarda $L/d \leq 60$ olduğu durumlar için elastisite modülünün arttığı, 60'dan büyük

narinlik oranlarında elastisite modülünün azaldığı belirlenmiştir,

3. Çelik lif katkılı betonlar için $V_f \leq 1$ olduğu durumlarda lif kullanımının elastisite modülünü artırdığı, 1'den büyük olması durumunda ise elastisite modülünü düşürdüğü görülmüştür,
4. Tüm lif tipleri için, başlangıç elastisite modülünü önerilen denklemin en iyi tahmin ettiği görülmüştür,
5. Çelik lifler için sekant elastisite modülünü en iyi önerilen denklem sonuçları tahmin ederken, çelik lif dışındaki lifler için NS 3473'ün önerdiği denklem sonuçları deney sonuçları ile en uyumlu sonuçları vermiştir,

6. Çelik lif ile birlikte polyolefin, PVA veya polipropilen kullanılan karışımların başlangıç elastisite modülünü en iyi Suksawang ve diğ.'nin önerdiği denklem tahmin etmiştir. Veri tabanında yer alan numunelerde $V_f < 1$ 'dir. Lif oranının 1'den küçük olduğu karma lif içeren karışımların sekant elastisite modülünün hesabında, çalışma kapsamında dikkate alınan denklemlerden lifsiz betonlar için önerilmiş olan ACI 318-14 ve NS 3473 denklemleri lifli betonlar için önerilmiş olan denklemlerden daha iyi sonuçlar vermiştir,
7. Çelik lif ile birlikte diğer liflerin karışık olarak kullanıldığı karışımlarda $V_f < 1$ 'dir ve bu durumda NS 3473 en iyi sonucu vermiştir.

6 Conclusions

This study includes the investigation of the initial and secant elastic modulus of steel, PVA, polypropylene, polyolefin, basalt and olefin fiber reinforced concretes. For this reason, the test specimens and formulas in the literature are compiled, and the results of the proposed equations in the study and the results of the existing equations are compared with the experimental results.

1. For all fiber types considered, it is observed that the concrete compressive strength increases for $K/\bar{l} \leq 1.5$, after this ratio, the fiber additive decreases the concrete compressive strength.
2. In steel fiber reinforced concretes, it is determined that the elastic modulus increases for $L/d \leq 60$, and the elastic modulus is decreased at the aspect ratios greater than 60.
3. It is observed that the use of fiber increases the elastic modulus when it is $V_f \leq 1$, for steel fiber reinforced concrete, and decreases the elastic modulus when it is greater than 1.
4. For all fiber types, the initial elastic modulus is found to be best predicted by the proposed equation.
5. While the proposed equation estimates the secant modulus of elasticity for steel fibers as best, the formula proposed by NS 3473 for fibers other than steel fiber gives the most consistent results with the experimental results.
6. The initial elastic modulus of mixtures used polyolefin, PVA or polypropylene with steel fiber is best predicted by using the equation proposed by Suksawang et al. In the samples in the database, fiber ratio is $V_f < 1$. In the calculation of the secant elastic modulus of mixtures containing fiber ratio which is less than 1, ACI 318-14 and NS 3473 suggested for concretes without fiber give the better results for fiber reinforced concrete when compared the results of equations are proposed for fiber reinforced concretes.
7. In mixtures where steel fiber and other fibers are used together are $V_f < 1$ and in this case NS 3473 gives the best result.

7 Kaynaklar

- [1] Bentur A, Mindes S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2nd Ed. London and New York, USA, Taylor & Francis Group, 1990.
- [2] Mobasher B, Li CYB. "Effect of interfacial properties on the crack propagation in cementitious composites". *Advanced Cement Based Materials*, 4(3), 93-105, 1996.
- [3] ACI Committee 544.3R. "Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete". American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 544.3R-9, 1993.
- [4] Otter DE, Naaman AE. "Properties of steel fiber reinforced concrete under cyclic loading". *ACI Material Journal*, 85(4), 254-261, 1988.
- [5] Tokyay M, Ramyar K, Turanlı L. "Behaviour of polypropylene and steel fiber reinforced high strength concretes under compressive and flexural loads". *Second National Concrete Conference*, Istanbul, Turkey, 27 May 1991.
- [6] Zollo RF. "Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development". *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107-122, 1997.
- [7] Gao J, Sun W, Morino K. "Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete". *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 307-313, 1997.
- [8] Qian CX, Stroeven P. "Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*, 30(1), 63-69, 2000.
- [9] Song PS, Wu JC, Hwang, S. "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete". *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673, 2004.
- [10] Singh S, Shukla A, Brown R. "Pullout behaviour of polypropylene fibers from cementitious matrix". *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1919-1925, 2004.
- [11] Kozak M. "Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması". *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 3(5), 26-35, 2013.
- [12] Wafa FF. "Properties and applications of fiber reinforced concrete". *Engineering Sciences*, 2, 49-63, 1990.
- [13] Bhargava P, Sharma UK, Kaushik SK. "Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders". *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 109-121, 2006.
- [14] Bae, BI, Choi, HK, Lee, BS, Bang, CH. "Compressive behavior and mechanical characteristics and their application to stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete". *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-11, 2016.
- [15] Postacıoğlu B. *Beton, Cilt 2: Bağlayıcı Maddeler, Agregalar*. 1. Baskı. İstanbul, Türkiye, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, 1987.
- [16] Ezeldin AS, Balaguru PN. "Normal- and high-strength fiber-reinforced concrete under compression". *Journal of Materials Civil Engineering*, 4(4), 415-429, 1992.
- [17] Alberti MG, Enfedaque A, Gálvez JC, Canovas MF, Osorio IR. "Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low properties". *Materials and Design*, 60, 57-65, 2014.
- [18] Alberti MG, Enfedaque A, Gálvez JC. "Improving the reinforcement of polyolefin fiber reinforced concrete for infrastructure applications". *Fibers*, 3, 504-522, 2015.
- [19] Yang KH. "Tests on concrete reinforced with hybrid or monolithic steel and polyvinyl alcohol fibers". *ACI Materials Journal*, 108(6), 664-672, 2011.
- [20] LaHucic J, Dahal S, Roesler J, Amirkhanian AN. "Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers". *Construction and Building Materials*, 135(2017), 440-446, 2017.
- [21] Lee SC, Oh JH, Cho JY. "Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers". *Materials (Basel)*, 8(4), 1442-1458, 2015.

- [22] AD-771 908: Army Construction Engineering Research Laboratory. "Compression Characteristics and Structural Beam Design Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete". National Technical Information Service, Department of Commerce, USA, 45, 1973.
- [23] Ou YC, Tsai MS, Liu KY, Chang KC. "Compressive behavior of steel-fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2), 207-215, 2012.
- [24] Mansur MA, Chin MS, Wee TH. "Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression". *Journal of Materials Civil Engineering*, 11(1), 21-29, 1999.
- [25] Abbas S, Soliman AM, Nehdi ML. "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages". *Construction and Building Materials*, 75(2015), 429-441, 2014.
- [26] Maruthachalam D, Padmanaban I, Vishnuram BG. "Influence of polyolefin macro-monofilament fibre on mechanical properties of high performance concrete". *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 17(7), 1682-1689, 2013.
- [27] Pliya P, Beaucour AL, Noumowé A. "Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature". *Construction and Building Materials*, 25(4), 1926-1934, 2011.
- [28] Wu Y, Song W, Zhao W, Tan X. "An experimental study on dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete under different strain rates". *Applied Sciences*, 8(1904), 1-18, 2018.
- [29] Ayub T, Shafiq N, Khan SU. "Compressive stress-strain behavior of HSFRC reinforced with basalt fibers". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 1-11, 2016.
- [30] Hsu LS, Hsu CT. "Stress-strain behavior of steel fiber high-strength concrete under compression". *ACI Structural Journal*, 91(4), 448-457, 1994.
- [31] Bhargava P, Sharma UK, Kaushik SK. "Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders". *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 109-121, 2006.
- [32] Suhaendi SL, Horiguchi T. "Fiber-reinforced high-strength concrete under elevated temperature-effect of fibers on residual properties". *Fire Safety Science-Proceedings of the Eight International Symposium*, Beijing, China, 18-23 September 2005.
- [33] Yoo DY, Yoon YS, Banthia N. "Predicting the post-cracking behavior of normal- and high-strength-fiber-reinforced concrete beams". *Construction and Building Materials*, 93(2015), 477-485, 2015.
- [34] Noushini A, Vessalas K, Samali B. "Flexural and tensile characteristics of polyvinyl alcohol fibre reinforced concrete (PVA-FRC)". *13th East Asia-Pacific Conference on Structural*, Sapporo, Japan, 11-13 September 2013.
- [35] Jo BW, Shon YH, Kim YJ. "The evaluation of elastic modulus for steel fiber reinforced concrete". *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 37(2), 152-161, 2001.
- [36] Graybeal BA, Davis M. "Cylinder or cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete". *ACI Materials Journal*, 105(6), 603-609, 2008.
- [37] Hamad AJ. "Lightweight concrete reinforced with polypropylene fibers". *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 4(2), 45-49, 2015.
- [38] Usta S. "Agrega granülometrisinin beton bileşimindeki teorik malzeme miktarları ile betonun kompasite ve porozite değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi". *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 1-15, 2012.
- [39] Uğurlu A. 1989, "Betonda agrega granülometrisinin düzenlenmesi ve önerilen bir yöntem: Fuller parabolü", *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Bülteni*, 69, 45-49, 1989.
- [40] Çakıroğlu MA, Kaya F, Yedek ÇY. "Kuru karışım püskürtme betonun elastisite modülünü bulanık mantık yöntemi ile tahmin edilmesi", *SDU International Technologic Science*, 6(1), 22-30, 2014.
- [41] Fanella DA, Naaman AE. "Stress-strain properties of fiber reinforced concrete in compression". *Journal of ACI Materials*, 82 (4), 475-483, 1985.
- [42] Nanni A, Johari A. "RCC pavement reinforced with steel fibers". *Concrete International*, 11(3), 64-69, 1989.
- [43] Muscalu MT, Radu A, Budescu M, Taranu N, Florescu E. "Use of recycled materials in the construction of roller compacted concrete (RCC) pavements". *Advanced Materials Research*, 649, 262-265, 2013.
- [44] Topçu İB, Demirel OE, Uygunoğlu T. "Polipropilen lif katkılı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri". *Politeknik Dergisi*, 20(1), 91-96, 2017.
- [45] Ersoy U, Özcebe G. *Betonarme*. 2. Baskı. İstanbul, Türkiye, Evrim Yayınevi, 2004.
- [46] Suksawang N, Wtaife S, Alsabbagh A. "Evaluation of elastic modulus of fiber-reinforced concrete". *ACI Materials Journal*, 115(2), 239-249, 2018.
- [47] Neves RD, Almeida JCOF. "Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete". *Structural Concrete*, 6(1), 1-8, 2005.
- [48] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary". Farmington Hills, USA, 318-14, 2014.
- [49] Norwegian Standard. "Design of Concrete Structures". Norwegian Council for Building Standardization, Oslo, Norway, NS 3473, 1992.
- [50] "Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General Rules and Rules for buildings". European Standard, EN 1992-1-1, 2004.
- [51] Türk Standardı. "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, TS 500, 2000.
- [52] Irvani S. "Mechanical properties of high-performance concrete". *ACI Materials Journal*, 93(5), 416-426, 1996.
- [53] Thomas J, Ramaswamy A. "Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(5), 385-392, 2007.
- [54] ACI Committee 363, "Report on high strength concrete". American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 363R-10, 2010.
- [55] Korea Concrete Institute (KCI), "Concrete Design Code and Commentary". Kimoondang Publishing Co., Seoul, Republic of Korea, 2007.