



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yüksek Dayanımlı Betonların Yarmada Çekme Dayanımlarının TYM Tabanlı Tahmini

 Tuba DEMİR^{a,*},  Muhammed ULUCAN^b,  Kürşat Esat ALYAMAÇ^b

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE
^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: t.demir@firat.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1052806

Öz

Bu çalışmada yüksek dayanımlı betonların erken yaş yarmada çekme dayanım sonuçlarının kapsamlı değerlendirilmesi sunulmaktadır. Bunun için çimento ile hacimce %5, %10 ve 15 oranlarında silis dumanı ve ince agrega ile hacimce %8, %10 ve %12 oranlarında mermer tozu yer değiştirilerek 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlarda Su/Çimento (S/C) oranları 0.20-0.25-0.30 ve çimento dozajı ise 400-450-500 kg/m³ olarak seçilmiştir. Elde edilen numunelere 3. ve 7. günlerde yarmada çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Bu testler sonucunda alınan veriler tepki yüzeyi metodu (TYM) kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda yarmada çekme dayanımını tahmin eden matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modellerin doğruluğunun tespiti için 9 adet kontrol serisi hazırlanmış ve modelin tahmin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda bağıl hata oranları (BHO) hesaplanarak geliştirilen matematiksel model doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek dayanımlı beton, Yarmada çekme dayanımı, Silis dumanı, Mermer tozu, Tepki yüzeyi metodu

Estimation of Splitting Tensile Strength of High Strength Concretes by RSM-Based

ABSTRACT

In this study, a comprehensive evaluation of the early age splitting tensile strength results of high strength concretes is presented. For this, 72 series concrete mix was prepared by replacing 5%, 10% and 15% silica fume by volume with cement and marble powder at 8%, 10% and 12% volume by volume. In these prepared mixtures, water/cement (W/C) ratios were chosen as 0.20-0.25-0.30 and cement dosage as 400-450-500 kg/m³. Splitting tensile strength test was applied to the samples obtained on the 3rd and 7th days. The data obtained as a result of these tests were analyzed using the response surface method (RSM). As a result of the analysis, mathematical models were developed that predict the splitting tensile strength. In order to determine the accuracy of the developed mathematical models, 9 control series were prepared and compared with the prediction results of the model. As a result, the mathematical model developed by calculating the relative error rates (ARD) was verified.

Keywords: High strength concrete, Splitting tensile strength, Silica fume, Marble powder, Response surface method (RSM)

I. GİRİŞ

Yüksek dayanımlı beton (YDB), dayanım ve dayanıklılık gibi üstün özelliklere sahip olan özel bir beton türüdür. Bu beton türünde geleneksel betondan farklı olarak Su/Çimento oranı daha düşük olup bileşiminde çeşitli mineral katkıları kullanılmaktadır [1]. YDB'lerin en önemli mekanik özelliği basınç dayanımlarıdır. YDB'ler, ortalama basınç dayanımı 50 MPa ve üstü olan özel betonlardır [2], [3]. Bu beton türünün dayanımı, dayanıklılığı ve kompozitesi yüksektir [4]. YDB'lerin uygulama alanlarında yaygın olarak yüksek katlı yapılar, köprüler, açık deniz platformları, yollar, tüneller gibi uzun dönem performans istenen yapılar bulunmaktadır [5].

Betonun kalitesinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden biri de betonun çekme dayanımıdır [6]. Bazı durumlarda, bir yapıyı analiz etmek ve tasarlamak için çekme dayanımının da bilinmesi büyük önem taşımaktadır [7]. Karayolu tasarımı uygulamalarında, havaalanı pist döşemelerinde, kütle betonlarında, su depolarında ve nükleer santraller gibi yapılarda, çatlak oluşmaması için betonun çekme dayanımlarının bilinmesi gereklidir [8]. Ayrıca betonun sürdürülebilirliği ve durabilitesi açısından da çekme dayanımı büyük önem taşımaktadır [9], [10].

Beton, çimento, agrega ve arayüz geçiş bölgesine sahip kompozit bir yapı malzemesidir [11]. Bu kompozit yapıdaki en zayıf kısım betonun mekanik özelliklerini de doğrudan etkileyen arayüz geçiş bölgesidir [12]. Betonda mikro çatlakların başlaması ve yayılması arayüz geçiş bölgesinin dayanımının belirlenmesinde önemli faktördür [13].

Betonun çekme dayanımının tespitinde üç değerlendirme yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler, doğrudan çekme dayanımı testi, eğilme dayanımı testi ve yarmada çekme dayanımı testidir [14]. Bu üç yöntemden en basit ve en güvenilir olarak belirlenen tekniğin, genellikle daha küçük bir sapma katsayısı veren silindirik bir numunenin yarmada çekme dayanımı testi olduğu bazı araştırmacılar tarafından kanıtlanmıştır [15,16]. Bu testte numune plakalar arasına yerleştirilip, alt ve üst kısımlarına numuneye paralel ASTM C496/C496M-11 standartlarına uygun olarak çubuk şeklinde levha yerleştirilir [17]. Daha sonra numuneye yük uygulanır ve basınç gerilmesine dik yönde çekme gerilmeleri oluşur. Oluşan bu çekme gerilmesi Denklem 1 yardımıyla hesaplanır.

$$f_t = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (1)$$

Burada F, uygulanan yükü, D, numunenin çapını ve L, numunenin uzunluğunu ifade etmektedir.

Bu çalışmada yüksek dayanımlı betonların erken yaş yarmada çekme dayanım sonuçlarının kapsamlı değerlendirilmesi sunulmaktadır. Bunun için çimento ile hacimce %5, %10 ve 15 oranlarında silis dumanı ve ince agrega ile hacimce %8, %10 ve %12 oranlarında mermer tozu yer değiştirilerek 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlarda su/çimento (S/C) oranları 0.20-0.25-0.30 ve çimento dozajı ise 400-450-500 kg/m³ olarak seçilmiştir. Elde edilen numunelere 3. ve 7. günlerde yarmada çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Bu testler sonucunda alınan veriler tepki yüzeyi metodu (TYM) kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda yarmada çekme dayanımını tahmin eden matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modellerin doğruluğunun tespiti için 9 adet kontrol serisi hazırlanmış ve modelin tahmin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda bağıl hata oranları (BHO) hesaplanarak geliştirilen matematiksel model doğrulanmıştır.

II. DENEYSEL PROSEDÜR

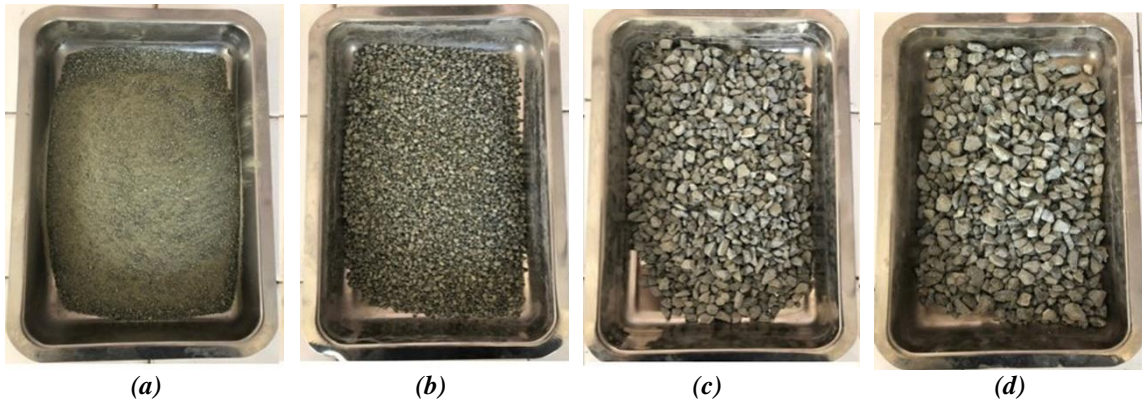
A. NUMUNE HAZIRLAMA

Bu çalışmada Elazığ Seza çimento fabrikasından temin edilen, CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır [18]. Mineral katkı malzemesi olarak mermer tozu ve silis dumanı kullanılmıştır. Mermer tozu, Elazığ organize sanayi bölgesinden temin edilmiştir. Silis dumanı (mikro silis) Antalya Eti Metalurji'den temin edilmiştir. Bu malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (%).

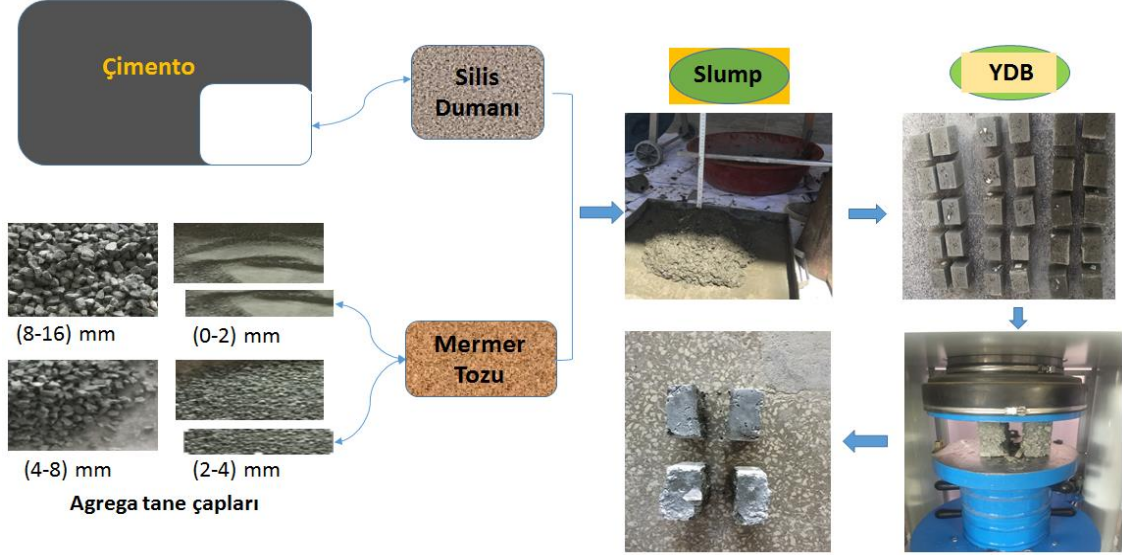
Kimyasal Özellikler	Çimento	Silis Dumanı	Mermer Tozu
CaO	63.19	0.40	40.45
SiO ₂	19.07	94.10	28.35
Fe ₂ O ₃	3.72	1.50	9.70
Al ₂ O ₃	4.82	0.90	0.17
SiO ₃	2.94	94.10	0.02
Na ₂ O	0.39	0.40	0.05
K ₂ O	0.62	0.90	0.01
MgO	1.83	0.10	16.25
Cl	0.0101	-	-
Çözünmeyen kalıntı	0.56	-	-
Kızdırma kaybı	3.43	-	4.84
Fiziksel Özellikler			
Özgül yüzey (Blaine)	3838		3920
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.13	2.20	2.71
Priz başlangıcı (dk)	135	-	-
Priz sonu (dk)	215	-	-
Hacim sabitliği (mm)	1	-	-

Beton karışımlarında % 52-63 oranında kuvars içeren, yüksek kompasite ve dayanıma sahip andezit agregası kullanılmıştır. Bu agregası türü, koyu renkli, emici olmayan, dağılmayan ve yoğun dokusu nedeniyle yüksek mukavemetli betonlar için uygundur [19]. Deneysel çalışmalarda kullanılan maksimum agregası tane çapı 16 mm olup, agregaları 0-2, 2-4, 4-8, 8-16 mm olarak 4 farklı gruba ayrılmıştır. Elek sınıflarına göre ayrılmış agregaları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan andezit agregaları (mm) (a) (0-2) (b) (2-4) (c) (4-8) (d) (8-16).

Tüm karışımlarda, kimyasal katkı malzemesi olarak hiperakışkanlaştırıcı CHRYSO Fluid 518 kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile hacimce %5-10-15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu ise ince agrega ile hacimce %8-10-12 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışmayı özetleyen akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın Akış Şeması

B. KARIŞIM ÖZELLİKLERİ

Deneylerde farklı karışım oranlarına sahip 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Karışımlara ait veriler Tablo 2'de, kontrol numunelerine ait karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir. Hazırlanan numuneler 100x100x100 mm'lik kalıplara yerleştirilerek 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna bırakılmıştır. Yarımada çekme testine tabi tutulmak üzere numuneler kür havuzundan çıkarılmıştır. Numunelere 3. ve 7. günlerde yarımada çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Testler sonucu alınan verilerle, TYM yardımıyla analizler yapılmış ve matematiksel modeller geliştirilmiştir.

Tablo 2. Beton karışım miktarları (kg/m^3).

Seri Adı	Çimento	Su	Silis Dumanı	Mermer Tozu	İnce Agregası (0-2) mm	İnce Agregası (2-4) mm	Orta Agregası (4-8) mm	Kaba Agregası (8-16) mm
YDB400-1	380	80	14.1	83	577	380	411	615
YDB400-2	380	80	14.1	104	564	372	411	615
YDB400-3	380	80	14.1	125	552	363	411	615
YDB400-4	360	80	28.1	82	571	376	406	609
YDB400-5	360	80	28.1	103	559	368	406	609
YDB400-6	360	80	28.1	124	546	360	406	609
YDB400-7	340	80	42.2	82	565	372	402	603
YDB400-8	340	80	42.2	102	553	364	402	603
YDB400-9	340	80	42.2	122	541	356	402	603
YDB400-10	380	100	14.1	81	562	370	400	599
YDB400-11	380	100	14.1	101	550	362	400	599
YDB400-12	380	100	14.1	122	537	354	400	599
YDB400-13	360	100	28.1	80	556	366	395	593
YDB400-14	360	100	28.1	100	544	358	395	593
YDB400-15	360	100	28.1	120	532	350	395	593

YDB400-16	340	100	42.2	79	550	362	391	587
YDB400-17	340	100	42.2	99	538	355	391	587
YDB400-18	340	100	42.2	119	526	347	391	587
YDB400-19	380	120	14.1	79	547	360	389	583
YDB400-20	380	120	14.1	99	535	352	389	583
YDB400-21	380	120	14.1	118	523	344	389	583
YDB400-22	360	120	28.1	78	541	356	385	577
YDB400-23	360	120	28.1	117	517	341	385	577
YDB400-24	340	120	42.2	77	535	352	381	571
YDB400-25	340	120	42.2	116	512	337	381	571
YDB450-1	428	90	15.8	80	557	367	396	594
YDB450-2	428	90	15.8	100	545	359	396	594
YDB450-3	428	90	15.8	120	532	351	396	594
YDB450-4	405	90	31.6	79	550	362	391	587
YDB450-5	405	90	31.6	119	526	346	391	587
YDB450-6	383	90	47.4	78	544	358	387	580
YDB450-7	383	90	47.4	98	532	350	387	580
YDB450-8	383	90	47.4	118	520	342	3867	580
YDB450-9	428	113	15.8	78	540	355	384	576
YDB450-10	428	113	15.8	97	528	348	384	576
YDB450-11	405	113	31.6	77	533	351	379	569
YDB450-12	405	113	31.6	115	510	336	379	569
YDB450-13	383	113	47.4	76	526	347	374	562
YDB450-14	383	113	47.4	95	515	339	374	562
YDB450-15	383	113	47.4	114	504	332	374	562
YDB450-16	428	135	15.8	75	523	344	372	557
YDB450-17	428	135	15.8	94	511	337	372	557
YDB450-18	428	135	15.8	113	500	329	372	557
YDB450-19	405	135	31.6	74	516	340	367	550
YDB450-20	405	135	31.6	112	494	325	367	550
YDB450-21	383	135	47.4	74	509	336	362	543
YDB450-22	383	135	47.4	92	498	328	362	543
YDB450-23	383	135	47.4	110	487	321	362	543
YDB500-1	475	100	17.6	77	536	353	381	572
YDB500-2	475	100	17.6	97	525	345	381	572
YDB500-3	475	100	17.6	116	513	338	381	572
YDB500-4	450	100	35.1	76	529	348	376	564
YDB500-5	450	100	35.1	95	517	341	376	564
YDB500-6	450	100	35.1	114	506	333	376	564
YDB500-7	425	100	52.7	75	522	344	371	556
YDB500-8	425	100	52.7	94	510	336	371	556
YDB500-9	425	100	52.7	113	499	329	371	556
YDB500-10	475	125	17.6	75	517	341	368	552
YDB500-11	475	125	17.6	93	506	333	368	552
YDB500-12	450	125	35.1	74	510	336	363	544
YDB500-13	450	125	35.1	110	488	321	363	544
YDB500-14	425	125	52.7	73	503	331	358	536
YDB500-15	425	125	52.7	91	492	324	358	536
YDB500-16	425	125	52.7	109	481	317	358	536
YDB500-17	475	150	17.6	72	498	328	354	532
YDB500-18	475	150	17.6	90	488	321	354	532
YDB500-19	475	150	17.6	108	477	314	354	532
YDB500-20	450	150	35.1	71	491	324	349	524
YDB500-21	450	150	35.1	106	470	309	349	524
YDB500-22	425	150	52.7	70	484	319	344	516
YDB500-23	425	150	52.7	87	473	312	344	516
YDB500-24	425	150	52.7	105	463	305	344	516

Tablo 3. Kontrol numunelerine ait beton karışım miktarları (kg/m³).

Seri Adı	Çimento	Su	Silis Dumanı	Mermer Tozu	İnce Agregası (0-2) mm	İnce Agregası (2-4) mm	Orta Agregası (4-8) mm	Kaba Agregası (8-16) mm
KYDB-1	360	120	28.1	98	529	349	385	577
KYDB-2	340	120	42.2	97	523	345	381	571
KYDB-3	405	90	31.6	99	538	354	391	587
KYDB-4	428	113	15.8	117	516	340	384	576
KYDB-5	405	113	31.6	96	521	343	379	569
KYDB-6	405	135	31.6	93	505	332	367	550
KYDB-7	475	125	17.6	112	495	326	368	552
KYDB-8	450	125	35.1	92	499	329	363	544
KYDB-9	450	150	35.1	89	480	316	349	524

C. YARMADA ÇEKME TESTİ

Yarmada çekme dayanımı testi, TS EN 12390-6 standardına göre belirlenmiştir [20]. Çalışma kapsamında kür havuzunda bekletilen numunelere, 3. ve 7. günlerde yarmada çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Bu testler için 2000 kN kapasiteli dijital cihaz kullanılmış ve testler yapılırken numunenin alt ve üst kısımlarına her testte değiştirilmek suretiyle duralitler yerleştirilmiştir. Bu duralitler küp numunenin düzlem boyunca kırılmasını sağlamıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Düzlem boyunca kırılan numuneler

III. MODELİN TASARIMI VE İSTATİSTİK ANALİZİ

Tepki yüzeyi metodu (TYM), matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir aracıdır. Sorunları geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için kullanılır. Bu metotta yanıt değişkeni, birden çok değişkenden etkilenir [21]. Bir TYM modeli geliştirmek, üç ana adımı içerir. Bunlar; ilgililenen yanıtın deneysel verilerini toplamak, bir TYM modeli oluşturmak ve doğruluğunu onaylamak, son olarak, istenen yanıt değişkenlerini hesaplamak için değişkenleri optimize etmektir [22]. TYM'nin, her yanıt için modeli tahmin etme, az sayıda deneysel veri noktasıyla sağlam bir model oluşturma, değişkenler arasındaki etkileşimini değerlendirme ve en uygun yanıtı bulma gibi çeşitli avantajları vardır [21].

Bu çalışmada deneysel tasarım ve analiz için piyasada bulunan bir yazılım paketi (Design Expert) kullanılmıştır [23]. Model geliştirilirken kullanılan değişkenler su/çimento (S/C), agrega/çimento (A/C), ve mermer tozu/ince agrega (MT/İA) oranlarıdır. S/C ve A/C oranı betonun dayanımı ve işlenebilirliği üzerinde önemli etkiye sahiptir [24]. Dolayısıyla S/C ve A/C oranları değişken olarak kesinlikle dikkate

alınmalıdır. Bunlara ek olarak, mermer tozunun kullanımıyla betonun boşluk oranı azalmaktadır. Yani, dolgu özelliği nedeniyle basınç dayanımını arttırmaktadır [25]. Ancak optimum değerden sonra dayanım değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır [26].

Tablo 4'te ve Tablo 5'te, analizlerde kullanılan değişkenlere ve yanıtlara ait değerler verilmiştir. Bu tablolarda karışım kodlarına isimler verilirken, YDB değerleri yüksek dayanımlı betonu, 400-450-500 çimento dozajı olarak verilen değerler ve sağda verilen numaralar ise hazırlanan seri numarasına göstermektedir. Ayrıca KYDB kodları, kontrol yüksek dayanımlı betonu, sağda verilen numaralar ise hazırlanan seri numarasını belirtir.

Tablo 4. Analizde kullanılan yanıtlar ve değişkenlere ait değerler.

Karışım Kodu	S/C	A/C	MT/İA	f _t -3 gün (MPa)	f _t -7 gün (MPa)
YDB400-1	0.21	5.22	0.087	3.39	3.56
YDB400-2	0.21	5.16	0.111	3.52	3.69
YDB400-3	0.21	5.11	0.136	3.47	3.62
YDB400-4	0.22	5.45	0.087	3.48	3.69
YDB400-5	0.22	5.39	0.111	3.58	3.81
YDB400-6	0.22	5.34	0.136	3.52	3.76
YDB400-7	0.24	5.71	0.087	3.52	3.91
YDB400-8	0.24	5.65	0.111	3.63	4.01
YDB400-9	0.24	5.59	0.136	3.57	3.95
YDB400-10	0.26	5.08	0.087	3.68	4.17
YDB400-11	0.26	5.03	0.111	3.76	4.27
YDB400-12	0.26	4.97	0.136	3.72	4.21
YDB400-13	0.28	5.31	0.087	3.73	4.20
YDB400-14	0.28	5.25	0.111	3.83	4.32
YDB400-15	0.28	5.20	0.136	3.78	4.26
YDB400-16	0.29	5.56	0.087	3.72	4.19
YDB400-17	0.29	5.50	0.111	3.81	4.27
YDB400-18	0.29	5.44	0.136	3.77	4.23
YDB400-19	0.32	4.94	0.087	3.60	4.07
YDB400-20	0.32	4.89	0.111	3.68	4.18
YDB400-21	0.32	4.84	0.136	3.63	4.13
YDB400-22	0.33	5.16	0.087	3.55	4.02
YDB400-23	0.33	5.05	0.136	3.59	4.07
YDB400-24	0.35	5.41	0.087	3.35	3.81
YDB400-25	0.35	5.29	0.136	3.37	3.87
YDB450-1	0.21	4.47	0.087	3.61	3.83
YDB450-2	0.21	4.43	0.111	3.69	3.90
YDB450-3	0.21	4.38	0.136	3.64	3.86
YDB450-4	0.22	4.67	0.087	3.68	3.95
YDB450-5	0.22	4.57	0.136	3.72	4.00
YDB450-6	0.24	4.88	0.087	3.74	4.13
YDB450-7	0.24	4.83	0.111	3.85	4.23
YDB450-8	0.24	4.78	0.136	3.78	4.18
YDB450-9	0.26	4.34	0.087	3.88	4.40
YDB450-10	0.26	4.29	0.111	3.95	4.49
YDB450-11	0.28	4.52	0.087	3.98	4.51
YDB450-12	0.28	4.43	0.136	4.02	4.59
YDB450-13	0.29	4.73	0.087	3.93	4.46
YDB450-14	0.29	4.68	0.111	4.01	4.56
YDB450-15	0.29	4.63	0.136	3.96	4.51
YDB450-16	0.32	4.20	0.087	3.82	4.32
YDB450-17	0.32	4.16	0.111	3.89	4.44
YDB450-18	0.32	4.11	0.136	3.85	4.36
YDB450-19	0.33	4.38	0.087	3.73	4.16
YDB450-20	0.33	4.29	0.136	3.76	4.24
YDB450-21	0.35	4.58	0.087	3.52	4.04

YDB450-22	0.35	4.53	0.111	3.59	4.19
YDB450-23	0.35	4.48	0.136	3.54	4.13
YDB500-1	0.21	3.88	0.087	3.72	4.46
YDB500-2	0.21	3.84	0.111	3.82	4.58
YDB500-3	0.21	3.80	0.136	3.76	4.52
YDB500-4	0.22	4.04	0.087	3.81	4.52
YDB500-5	0.22	4.00	0.111	3.92	4.68
YDB500-6	0.22	3.95	0.136	3.84	4.62
YDB500-7	0.24	4.22	0.087	3.90	4.66
YDB500-8	0.24	4.17	0.111	3.98	4.79
YDB500-9	0.24	4.13	0.136	3.92	4.71
YDB500-10	0.26	3.74	0.087	3.98	4.81
YDB500-11	0.26	3.70	0.111	4.04	4.92
YDB500-12	0.28	3.89	0.087	4.10	4.95
YDB500-13	0.28	3.81	0.136	4.14	5.03
YDB500-14	0.29	4.06	0.087	4.03	4.88
YDB500-15	0.29	4.02	0.111	4.10	5.04
YDB500-16	0.29	3.98	0.136	4.08	4.96
YDB500-17	0.32	3.61	0.087	3.90	4.73
YDB500-18	0.32	3.57	0.111	3.98	4.87
YDB500-19	0.32	3.53	0.136	3.94	4.81
YDB500-20	0.33	3.75	0.087	3.83	4.60
YDB500-21	0.33	3.67	0.136	3.86	4.68
YDB500-22	0.35	3.91	0.087	3.62	4.42
YDB500-23	0.35	3.87	0.111	3.70	4.56
YDB500-24	0.35	3.83	0.136	3.66	4.50

Tablo 5. Kontrol numuneleri analizinde kullanılan yanıtlar ve değişkenlere ait değerler.

Karışım Kodu	S/C	A/C	MT/İA	f _t -3 gün (MPa)	f _t -7 gün (MPa)
KYDB-1	0.33	5.11	0.111	3.63	4.07
KYDB-2	0.35	5.35	0.111	3.40	3.89
KYDB-3	0.22	4.62	0.111	3.73	4.05
KYDB-4	0.26	4.25	0.136	3.86	4.47
KYDB-5	0.28	4.47	0.111	4.01	4.66
KYDB-6	0.33	4.33	0.111	3.76	4.33
KYDB-7	0.26	3.66	0.136	3.97	4.82
KYDB-8	0.28	3.85	0.111	4.15	5.06
KYDB-9	0.33	3.71	0.111	3.87	4.71

Değişkenlerin YDB'ler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model geliştirilirken S/C, A/C ve MT/İA değişkenleri dikkate alınmıştır. Geliştirilen modeldeki önemsiz terimler, model üzerinde t testi yapılarak kaldırılmıştır. Son olarak, model kalan değerlere göre oluşturulmuştur. Modelin yeterliliğini doğrulamak için temel olarak P değerleri ve F değerleri kullanılmaktadır. Bu değerleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Modellere ait ANOVA sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Modele ait ANOVA sonuçları.

Sonuç	Model	
	F-değeri	P-değeri
f _t -3 gün (MPa)	93.90	< 0.0001
f _t -7 gün (MPa)	60.81	< 0.0001

Bu çalışmada, f_t-3 ve f_t-7 gün değerlerini tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. f_t-3 ve f_t-7 gün için geliştirilen modele ait belirlilik katsayıları (R²) sırasıyla 0.91-0.92'dir. Belirlilik katsayıları arttıkça modelin tahmin gücü giderek artmaktadır. Aynı zamanda geliştirilen modelin P-değerinin de <0.0001 olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir.

Modelin anlamlı ve değerli olduğu belirlendikten sonra, her değişkenin yanıtlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Her değişkenin önemi, analiz sonucunda elde edilen P değerine bağlıdır. Modelde kullanılan değişkenler, P değerinin genellikle 0.05'in altında olup olmadığı dikkate alınarak belirlenmiştir. Değişkenlere ait P değerleri, terimlerin anlamlı olduğunu ve katkılarının modeli iyileştirdiğini göstermektedir. Geliştirilen modele ait katsayılar ve ilgili P değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 7. Geliştirilen modelin analiz sonuçları.

Model Terimleri	f _{t-3} gün (MPa)		f _{t-7} gün (MPa)	
	Katsayı	P-değeri	Katsayı	P-değeri
A (S/C)	36.906	0.0017	44.577	0.018
B (A/C)	-0.297	< 0.0001	-2.831	< 0.0001
C (MT/İA)	22.611	0.1124	31.105	0.366
AB	0.387	0.1019	2.029	0.0005
AC	-2.157	0.7425	3.002	0.8408
BC	-0.133	0.7984	-0.039	0.9738
A ²	-69.509	< 0.0001	-95.532	< 0.0001
B ²	-	-	0.0197	< 0.0001
C ²	-93.673	0.0002	-139.524	0.0132
Sabit	-1.285	-	3.96	-

IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada yüksek dayanımlı betonların erken yaş yarmada çekme dayanım sonuçlarının kapsamlı değerlendirilmesi araştırılmıştır. Bu kapsamda 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden alınan verilerle yapılan analizler sonucunda f_{t-3} ve f_{t-7} gün değerlerine ait matematiksel modeller geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen modelin doğruluğunu test etmek amacıyla 9 kontrol serisi hazırlanmıştır. Bu kontrol serilerine ait f_{t-3} ve f_{t-7} değerleri ile modelin tahmin ettiği f_{t-3} ve f_{t-7} değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda modele ait BHO hesaplanmıştır. BHO değerleri, Denklem 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$BHO (\%) = \frac{\text{Deney} - \text{Model}}{\text{Deney}} \times 100 \quad (2)$$

Geliştirilen modelin tahmin ettiği f_{t-3} ve f_{t-7} ve BHO değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Geliştirilen model dikkate alındığında f_{t-3} ve f_{t-7} değerlerine ait BHO değerleri %10'un altında kalmaktadır. Böylece, geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir.

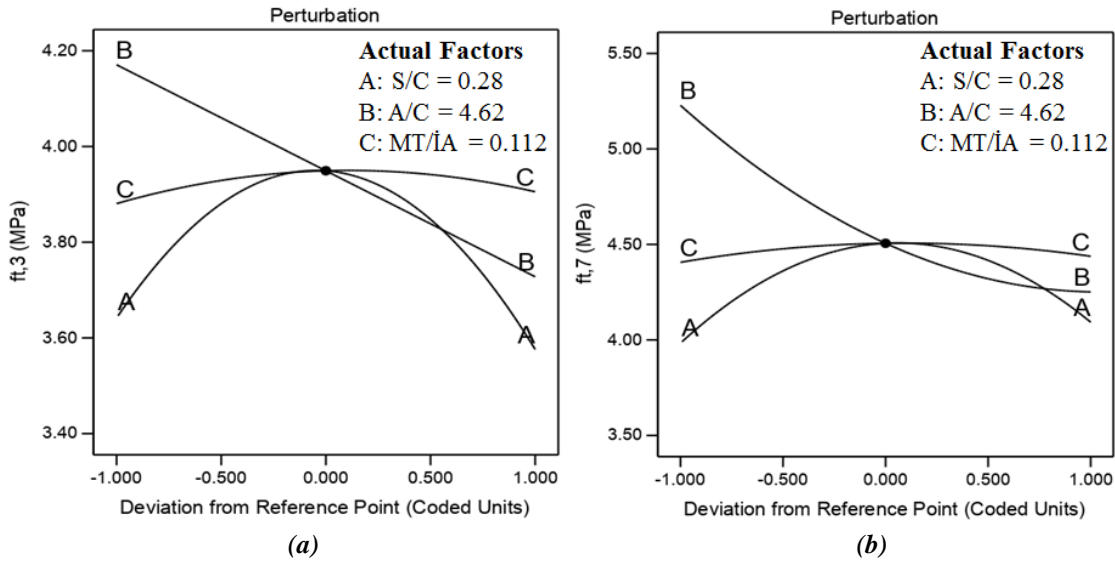
Tablo 8. Geliştirilen modellerin f_{t-3}, f_{t-7} günlük tahmin sonuçları ve BHO değerleri.

Sonuçlar	Karışım Kodu	Deney Sonuçları	Model	BHO (%)
f _{t-3} gün (MPa)	KYDB-1	3.63	3.64	-0.2
	KYDB-2	3.40	3.42	-0.5
	KYDB -3	3.73	3.74	-0.4
	KYDB -4	3.86	3.97	-2.9
	KYDB -5	4.01	3.98	0.7
	KYDB -6	3.76	3.78	-0.6
	KYDB -7	3.97	4.10	-3.1
	KYDB -8	4.15	4.11	1.1

f_{i-7} gün (MPa)	KYDB -9	3.87	3.89	-0.4
	KYDB-1	4.07	4.16	-2.3
	KYDB-2	3.89	3.95	-1.5
	KYDB -3	4.05	4.15	-2.4
	KYDB -4	4.47	4.61	-3.1
	KYDB -5	4.66	4.58	1.8
	KYDB -6	4.33	4.39	-1.5
	KYDB -7	4.82	5.04	-4.4
	KYDB -8	5.06	4.97	1.9
	KYDB -9	4.71	4.75	-0.8

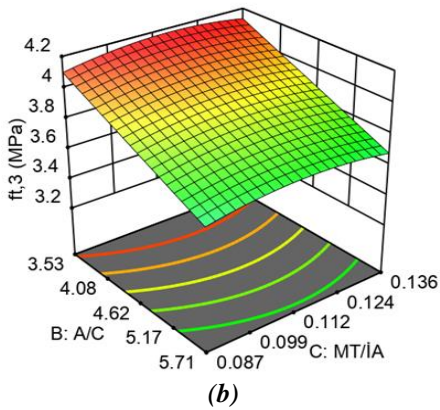
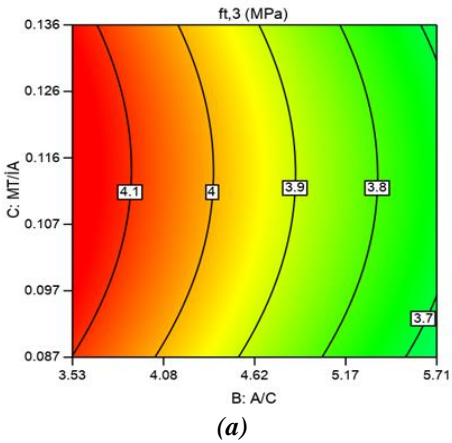
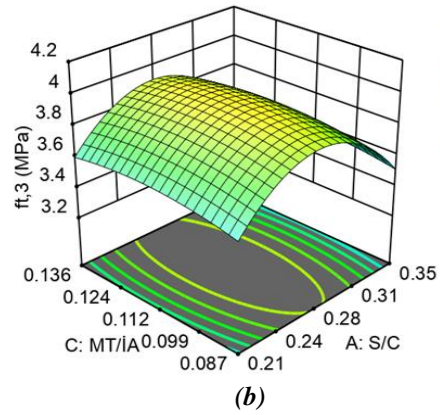
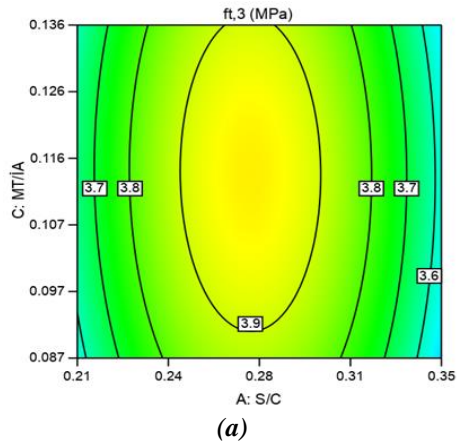
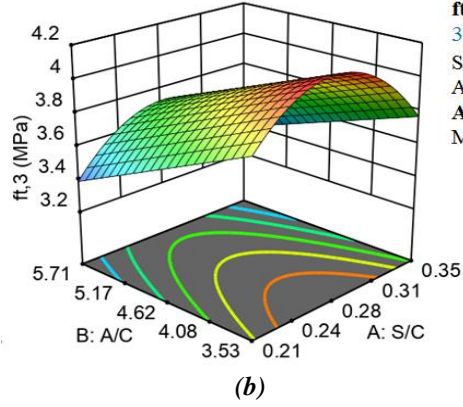
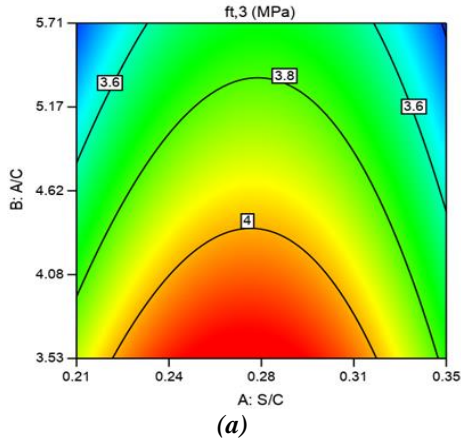
Şekil 4'te, f_{i-3} ve f_{i-7} değerlerini tahmin etmek için geliştirilen modele ait değişkenlerin etkilerini açıklayan pertürbasyon eğrisi verilmiştir. Pertürbasyon eğrileri, geliştirilen modele ait değişkenlerin, yanıtlar üzerindeki sonuçlarını daha iyi açıklayabilmek için kullanılmaktadır. Bu eğriler incelendiğinde S/C oranı 0.21-0.28 aralığındayken f_{i-3} ve f_{i-7} değerlerinin arttığı, 0.28-0.35 aralığında ise f_{i-3} ve f_{i-7} gün değerlerinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C miktarı arttıkça f_{i-3} gün değerlerinde azalma meydana gelmektedir. MT/İA oranı 0.087-0.112 aralığındayken f_{i-3} ve f_{i-7} değerleri artmakta, 0.112-0.136 aralığında ise f_{i-3} ve f_{i-7} gün değerleri azalmaktadır.

Pertürbasyon eğrilerinde 0.28 ve 4.62 olarak verilen değerler, değişkenlere ait en düşük ve en yüksek değerlerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Bu değerler, pertürbasyon eğrisinde 0 noktasına karşılık gelen değerleri belirtmektedir.



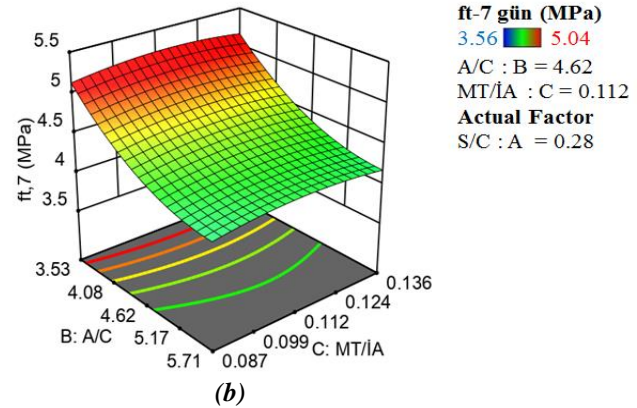
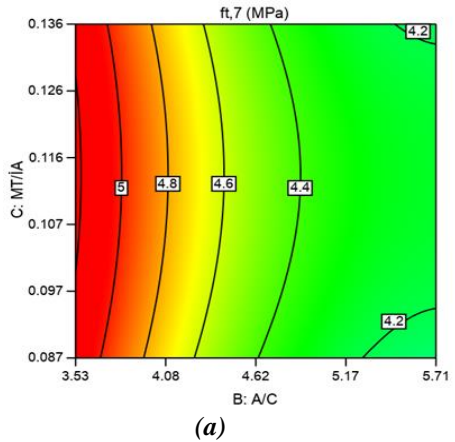
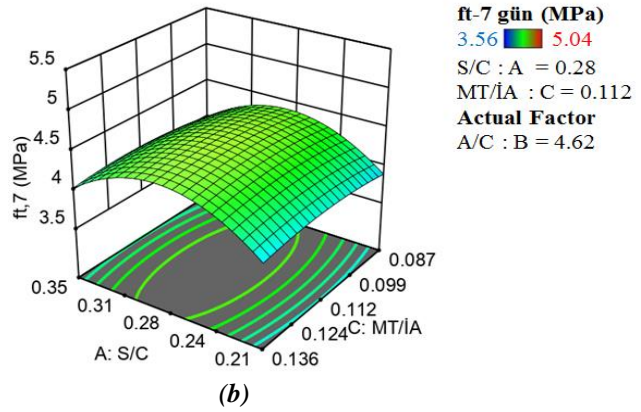
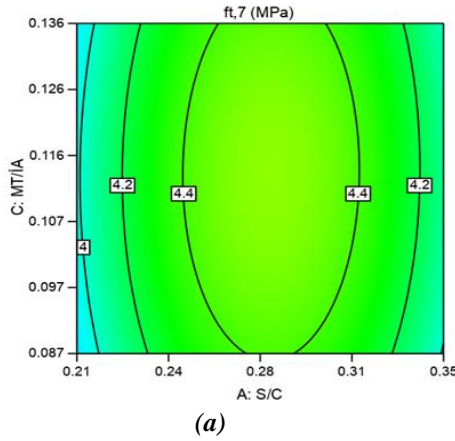
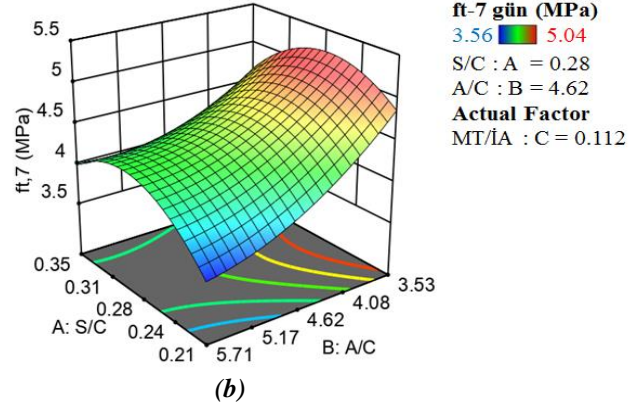
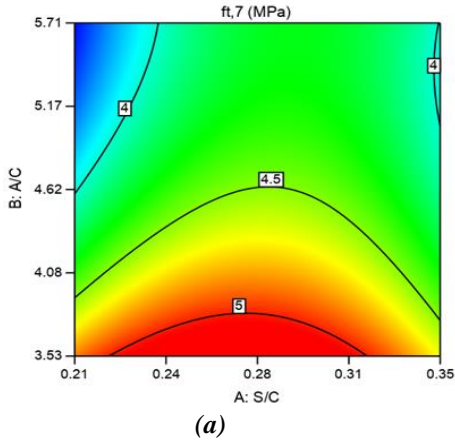
Şekil 4. Geliştirilen modelin (a) f_{i-3} gün (b) f_{i-7} gün değerlerine ait pertürbasyon eğrileri

Şekil 5'te f_{i-3} gün değeri için geliştirilen modele ait iki ve üç boyutlu etki grafikleri verilmiştir. Bu etki grafiği incelendiğinde S/C oranı arttıkça f_{i-3} gün değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C ve MT/İA oranları arttıkça f_{i-3} gün değerinin azaldığı üç boyutlu etki grafiğinden açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, A/C oranı arttıkça karışımdaki agrega miktarının artmasıdır. Böylece, karışımın su emme miktarı artmakta ve daha kuru bir karışım elde edilmektedir. Ayrıca, MT/İA oranı 0.087-0.112 aralığında f_{i-3} gün değerleri artmakta, 0.112-0.136 aralığında azalmaktadır. Bunun nedeni mermer tozunun optimum değere kadar basınç dayanımını arttırması, optimum değerden sonra basınç dayanımı değerlerinde olumsuz etki yaratmasıdır.



Şekil 5. f_{t-3} gün değerine ait (a) iki boyutlu (b) üç boyutlu etki grafikleri

Şekil 6'da f_{t-7} gün değeri için geliştirilen modele ait iki ve üç boyutlu etki grafikleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde f_{t-7} gün değeri sonuçları f_{t-3} gün değeri sonuçları ile benzer çıkmıştır.



Şekil 6. f_{t-7} gün değerine ait (a) iki boyutlu (b) üç boyutlu etki grafikleri

A. SONUÇLAR

Betonun çekme dayanımı, betonun çatlama performansı ve durabilite gibi özelliklerinin tespitinde büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada yüksek dayanımlı betonların erken yaş yarmada çekme dayanım sonuçlarının kapsamlı değerlendirilmesi yapılmış ve bunun sonucunda matematiksel modeller geliştirilmiştir. Yapılan değerlendirme ve geliştirilen matematiksel modellerle aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- YDB üretiminde mermer tozu ve silis dumanı kullanım oranının %10'a kadar artmasıyla dayanım değerlerinde artma görülmüştür. %10 değerinden sonraki numunelerde ise dayanım değerinde azalma görülmüştür. Yapılan testler ve alınan sonuçlar doğrultusunda, betonun yarmada çekme dayanımı değişiminde, beton karışımında kullanılan mermer tozu ve silis dumanı kullanım oranlarının etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Üretilen YDB numunelerinin erken yaş yarmada çekme dayanımlarını incelemek amacıyla 3. ve 7. günde numuneler teste tabi tutulmuşlardır. Bu çalışmada f_t-3 ve f_t-7 gün için bir TYM modeli geliştirilmiştir. Bu model yardımıyla erken yaş yarmada çekme dayanımları yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Özellikle betonun kalitesinin ve betondaki çatlak durumunun belirlenmesinde erken yaş çekme dayanımının belirlenmesi avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla kütle betonları, su depoları ve nükleer santraller gibi büyük yapılarda bu modellerin kullanılmasının önemli kazançlar sağlayacağı düşünülmektedir.
- Son yıllarda TYM'nin beton teknolojisinde kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada erken yaş yarmada çekme dayanımını tahmin etmek ve pratik bir karışım hesabı sunmak için TYM tabanlı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model incelendiğinde BHO değerlerinin %10'un altında kaldığı görülmüştür. Böylece, TYM kullanılarak geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] H. T. N. Le, L. H. Poh, S. Wang, and M.-H. Zhang, "Critical parameters for the compressive strength of high-strength concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 82, pp. 202–216, 2017.
- [2] A. C. I. C. 363, Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10). ACI, 2010.
- [3] S. Ahmad, I. Hakeem, and M. Maslehuddin, "Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 9, 2016.
- [4] T. Erdogan, Beton. Ankara: METU Press, 2003.
- [5] Y. Zhong, Y. Sun, K. H. Tan, and O. Zhao, "Testing, modelling and design of high strength concrete-filled high strength steel tube (HCFHST) stub columns under combined compression and bending," *Eng. Struct.*, vol. 241, p. 112334, 2021.
- [6] S. Chithra, S. R. R. Senthil Kumar, and K. Chinnaraju, "The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, 2016.
- [7] A. Khaloo, M. H. Mobini, and P. Hosseini, "Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, 2016.
- [8] S. Y. Çetin and İ. Ragıp, "Küp numunelerin yarmada-çekme dayanımında agrega granülometrisinin boyut değişimi üzerine etkisi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.*, vol. 8, no. 3, pp. 443–451, 2016.

- [9] S. Ray, M. Haque, M. M. Rahman, M. N. Sakib, and K. Al Rakib, "Experimental investigation and SVM-based prediction of compressive and splitting tensile strength of ceramic waste aggregate concrete," *J. King Saud Univ. Sci.*, 2021.
- [10] R. Siddique, M. Singh, S. Mehta, and R. Belarbi, "Utilization of treated saw dust in concrete as partial replacement of natural sand," *J. Clean. Prod.*, vol. 261, p. 121226, 2020.
- [11] H. Constantinescu, O. Gherman, C. Negrutiu, and S. P. Ioan, "Mechanical properties of hardened high strength concrete," *Procedia Technol.*, vol. 22, pp. 219–226, 2016.
- [12] X. Zhou et al., "DEM analysis of the effect of interface transition zone on dynamic splitting tensile behavior of high-strength concrete based on multi-phase model," *Cem. Concr. Res.*, vol. 149, p. 106577, 2021.
- [13] H. Taghaddos, F. Mahmoudzadeh, A. Pourmoghaddam, and M. Shekarchizadeh, "Prediction of compressive strength behaviour in RPC with applying an adaptive network-based fuzzy interface system," in *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2004*, pp. 273–284.
- [14] A. M. Neville, *Properties of concrete*, vol. 4. Longman London, 1995.
- [15] V. Kadleček and S. Modrý, "Size effect of test specimens on tensile splitting strength of concrete: general relation," *Mater. Struct.*, vol. 35, no. 1, pp. 28–34, 2002.
- [16] D. J. Hannant, K. J. Buckley, and J. Croft, "The effect of aggregate size on the use of the cylinder splitting test as a measure of tensile strength," *Matériaux Constr.*, vol. 6, no. 1, pp. 15–21, 1973.
- [17] F. Bin Ahmed, K. A. Ahsan, T. Shariff, and S. R. Meem, "Formulation of polynomial equation predicting the splitting tensile strength of concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 38, pp. 3269–3278, 2021.
- [18] P. and C. C. Cement - Part 1: General Cements, Composition, "TS EN 197-1," Turkey, 2012.
- [19] O. Soykan, Ö. Cengiz, and Ö. Cenk, "Investigation of the Usability of Slate and Andesite as Concrete Aggregate," *J. Suleyman Demirel Univ. Grad. Sch. Nat. Appl. Sci.*, vol. 19, no. 1, 2015.
- [20] T. S. EN, "12390-6 (2010)," Test. hardened Concr. tensile strength test specimens. Turkish Stand. Institute, TSE, Ankara, Turkey.
- [21] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, 2016.
- [22] K. E. Alyamac, E. Ghafari, and R. Ince, "Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method," *J. Clean. Prod.*, vol. 144, pp. 192–202, 2017.
- [23] "Design-expert software." Inc., S.-E, Minneapolis, MN, USA., 2016.
- [24] S. Pyo and H. K. Kim, "Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, 2017.

- [25] İ. B. Topçu and A. Uğurlu, “TS 500/2000 Standardının Beton Açısından İncelenmesi,” ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, vol. 14, pp. 492–499, 2002.
- [26] K. E. Alyamac and A. B. Aydın, “Concrete properties containing fine aggregate marble powder,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 7, pp. 2208–2216, 2015.