

Araştırma Makalesi

**Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik-Çevresel Sonuçlarının
İncelenmesi ve Tepki Yüzeyi Metodu Tabanlı Modellenmesi****Muhammed Ulucan^{1,*}** Gönderim: 18.01.2025
Kabul: 26.05.2025¹Fırat University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Elazığ, Türkiye;
mulucan@firat.edu.tr
*Corresponding Author

Özet: Bu çalışma sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi perspektifinde atık malzemeler kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mekanik-çevresel sonuçlarının incelenmesine ve tepki yüzeyi metodu kullanılarak modellenmesine odaklanmaktadır. Çevresel çıktıları azaltabilmek ve mekanik özellikleri iyileştirebilmek adına metakaolin ve yüksek fırın cürufu ek çimento esaslı malzeme olarak kullanılmış olup 10 farklı kendiliğinden yerleşen harç serisi tasarlanmıştır. Mekanik özellikler için 90 günlük basınç dayanımı testi ve ultrases geçiş hızı ölçümleri dikkate alınmıştır. Tepki yüzeyi metodu kullanılarak basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızına bağlı olarak matematiksel bir model geliştirilmiş, hesaplanan tüm bağıl hata oranları % 5'in altında kalmıştır. Ardından çevresel etki kategorilerinden enerji tüketimi sonuçları incelenmiş ve ek çimento esaslı malzeme kullanımının önemli azalmalara neden olduğu gözlenmiştir. Atık ve ek çimento esaslı malzeme kullanımının hem mekanik hem de çevresel özellikler üzerinde olumlu etkiler yarattığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: kendiliğinden yerleşen harç; sürdürülebilirlik; atık yönetimi; tepki yüzeyi metodu.

Research Article

**Investigation of Mechanical-Environmental Outcomes of Self-Compacting
Mortars and Modelling Based on Response Surface Method**

Abstract: This study focuses on the investigation of the mechanical-environmental outcomes of self-compacting mortars produced using waste materials in the perspective of sustainable development and circular economy and modelling using the response surface method. In order to reduce environmental outputs and improve mechanical properties, metakaolin and blast furnace slag were used as supplementary cementitious materials and 10 different self-compacting mortar series were designed. For mechanical properties, 90-day compressive strength test and ultrasonic pulse velocity measurements were taken into consideration. A mathematical model was developed using the response surface method based on compressive strength and ultrasonic pulse velocity, and all calculated absolute relative deviations remained below 5%. Then, energy consumption results from the environmental impact categories were analyzed and it was observed that the use of supplementary cementitious material caused significant reductions. It was determined that the use of waste and supplementary cementitious materials has positive effects on both mechanical and environmental properties.

Keywords: self-compacting mortar; sustainability; waste management; response Surface method.

1. Giriş

Dünya nüfusunun artmasına paralel olarak inşaat ve endüstri sektöründeki gelişmeler atık üretimine de çok büyük oranda katkı sağlamaktadır [1,2]. Özellikle son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremler sonrası ağır hasar gören ve yıkımı gerçekleştirilen binalardan elde edilen inşaat yıkıntı atıkları çözüm bekleyen önemli çevresel çıktıların başında gelmektedir [3]. Araştırmacılar çok yüksek miktarlara ulaşan bu atıkları değerlendirebilmek için aktif ve yaygın olarak kullanım alanına sahip olan inşaat sektörünü büyük bir alternatif olarak görmüşlerdir [4]. Bu bağlamda inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen agregalar hem doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına hem de bu atık malzemelerin değerlendirilmesine olanak sağlaması nedeniyle büyük önem taşımaktadır [5,6]. Elde edilen bu agregalar iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar: Karışık geri dönüşümlü beton agregaları ve geri dönüşümlü beton agregaları olarak isimlendirilmektedir. Karışık geri dönüşümlü beton agregaları yıkılan bir binadan elde edilen ve içerisinde tüm atıkların bulunduğu agregaları ifade etmektedir. Geri dönüşümlü beton agregaları ise yıkılan bir binadan elde edilen beton kütlelerinin konkasör yardımıyla kırılarak elde edilmesini ifade etmektedir. Karışık geri dönüşümlü beton agregaları içerdiği karmaşık yapısından kaynaklı daha yüksek su emme ve daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olduğundan kullanım alanları sınırlı düzeylerde kalmaktadır [7]. Bu nedenle araştırmacılar geri dönüşümlü beton agregalarını doğal agregaya alternatif olarak literatürde yaygın bir şekilde kullanarak farklı çalışmalar yürütmüşlerdir [8].

Meydana gelen doğal afetler sonrası vatandaşların mağduriyetlerinin giderilmesi adına yeni inşa edilmesi gereken binalarda büyük bir artış yaşanmış ve çok büyük miktarlarda beton tüketimi ortaya çıkmıştır. Yapılan literatür araştırmaları betonun temel bileşenleri olan çimento, su ve agrega dikkate alındığında iki temel çevresel problemin meydana geldiğini göstermiştir [9,10]. Bunlardan birincisi, artan beton tüketimi doğal kaynak tüketiminde büyük bir artışa neden olmakta ve doğal kaynak sorunlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda doğal kaynak tüketimini azaltmak, atık malzemeleri değerlendirmek için geri dönüşümlü beton agregaları büyük bir çözüm kaynağı olarak görülmektedir [11]. İkinci temel problem ise çimento tüketimine bağlı olarak karbon emisyonlarında meydana gelen artıştır [12]. Çimento dünya genelindeki karbon salınımının yaklaşık % 6-8'inden sorumludur [13,14]. Bu bağlamda çimento tüketiminde meydana gelecek küçük azalmaların bile önemli çevresel çıktılar meydana getireceği belirtilmektedir [15–17]. Ek çimento esaslı malzemeler bu noktada büyük bir çözüm kaynağı olarak görülmektedir. Çimento ile yer değiştirilerek kullanılan bu malzemelerin belirli oranlarda kullanımı çevresel çıktılarının azaltılmasının yanısıra mekanik özellikler üzerinde de önemli etkiler yaratmaktadır [18].

Literatürün genel bir incelemesi beton teknolojisindeki ilerlemelerin sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından önemli çevresel ve ekonomik kazanımlara yol açtığını göstermektedir. Kendiliğinden yerleşen beton ve harç teknolojisi inşaat sektörüne çeşitli avantajlar sunduğundan son yıllarda giderek yaygınlaşmakta ve yeni inşa edilen binalarda yaygın şekilde uygulanmaktadır [19]. Kendiliğinden yerleşen beton teknolojisi, inşaat hızını ve kolaylığını büyük ölçüde artırdığı ve elle sıkıştırmaya gerek kalmadan en dar alanları bile doldurma özelliğine sahip olduğu için zaman ve işçilik açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır [20]. Ancak yüksek binalar ve köprüler gibi özel yapıların sayısı giderek artmakta ve yapının ağırlığı büyük önem taşımaktadır [21,22]. Bu nedenle hafif agregaların kullanımı ağırlığı azaltmak için bir alternatif olarak görülmektedir. Genleştirilmiş kil, pomza ve

perlit gibi hafif agregaların kullanımı harcın ağırlığında önemli bir azalmaya yol açmakta ve cazip bir seçenek olarak kullanılmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton ve harç teknolojisindeki gelişmeler araştırmacıları hafif agregaların kullanımını araştırmaya teşvik etmiştir.

Bu çalışma atık ve ek çimento esaslı malzemeler kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mekanik-çevresel özelliklerini incelemeye ve tepki yüzeyi metodu yardımıyla kendiliğinden yerleşen harçların mekanik özelliklerini modellemeye odaklanmaktadır. Bağlı hata oranları dikkate alınarak matematiksel modelin etkinliği kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ardından kontrol numune ile aynı nihai yaş basınç dayanımına sahip olan numuneler fonksiyonel birim olarak dikkate alınmış ve enerji tüketimi açısından karşılaştırılmıştır. Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi perspektifinde üretilen harçların kapsamlı bir mekanik-çevresel çıktıları birlikte sunularak literatüre katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi hedefleri kapsamında üretilen tüm kendiliğinden yerleşen harç karışımlarında CEM II-A 42.5 R tipi portland kompoze çimento kullanılmıştır. Çalışmada ek çimento esaslı malzeme olarak tercih edilen metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Agregalar ise geri dönüşümlü agregalar ve pomza kullanılmıştır. Geri dönüşümlü agregalar Abdullahpaşa Mahallesi'nde kontrollü olarak yıkılan bir binadan alınan beton kütlelerinin konkasörde kırılmasıyla elde edilmiştir. Harç üretiminde kullanılan geri dönüşümlü agregalar üzerinde gerçekleştirilen fiziksel deneyler sonrası özgül ağırlık değerinin 2.48 g/cm³, su emme değerinin ise % 9.8 olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde temin edilen pomza üzerinde gerçekleştirilen deneylerde de özgül ağırlık değerinin 1.14 g/cm³, su emme değerinin ise % 47.6 olduğu tespit edilmiştir. DeneySEL çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan malzemelere ait kimyasal ve fiziksel özellikler ise Tablo 1'de sunulmuştur. Taze harcın akışkanlığını artırmak için yüksek performanslı su azaltıcı kimyasal katkı olarak SicaViscocrete Hi-Tech 4508 kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan geri dönüşümlü agregalar Abdullahpaşa mahallesinde yıkılan bir binadan alınan beton kütlelerinin konkasörde kırılmasıyla elde edilirken pomza agregası Nevşehir'den temin edilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelere ait kimyasal ve fiziksel içerikler

Bileşenler	Kimyasal Özellikler								Fiziksel Özellikler
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
CEM II-A	21.2	6.0	4.1	61.5	2.5	3.2	0.7	0.8	3.09
Metakaolin	54.7	43.8	1.5	-	-	-	-	-	2.40
Yüksek Fırın Cürufu	41.4	0.8	0.1	45.7	8.0	1.1	2.6	0.3	2.89

2.1. DeneySEL Tasarımı

Bu çalışmada, kontrol serileri de dahil olmak üzere 10 farklı kendiliğinden yerleşen harç karışımı tasarlanmıştır. Karışım tasarımında kullanılan bileşenler ve miktarları Tablo 2'de sunulmuştur. İkili karışımlarda metakaolin % 5-10-15-20 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılırken öğütülmüş

yüksek fırın cürufu % 10-20-30 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karışım tasarımlarında kullanılan ek çimento esaslı malzeme oranları literatürde yapılan benzer çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu bağlamda basınç dayanımlarının belirli bir orana kadar artması ve belirli bir değerden sonra azalması hedeflenmiştir. Üçlü karışımlarda ise metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun toplamı %30 oranında çimento ile yer değiştirilecek şekilde tasarlanmıştır. Karışım tasarımı yapılırken ek çimento esaslı malzemenin dayanım üzerindeki etkisini net bir şekilde inceleyebilmek adına kimyasal katkı ve su miktarları sabit tutulmuştur. Üretilen harç karışımlarının taze özelliklerini sağlayabilmesi için EFNARC standardı dikkate alınarak mini slump testleri gerçekleştirilmiştir [23]. Tüm harç serileri için elde edilen yayılma değerlerinin 240-260 mm arasında yer aldığı görülmüştür. Karışımlarda nihai yaş basınç dayanımı sonuçlarını incelemek ve ultrases geçiş hızı testlerini uygulayabilmek için 5 cm x 5 cm x 5 cm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde ASTM C597 dikkate alınarak ultrases geçiş hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir [24]. Ardından TS EN 12390-4 dikkate alınarak basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir [25]. Numunelere ait karışım tasarımları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait karışım tasarımı (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento	MK	ÖYFC	GDBA	Pomza	Su	Akışkanlaştırıcı
Kontrol	650	0	0	629.5	194.6	350	7
5MK	617.5	32.5	0	625.0	193.2	350	7
10MK	585	65	0	620.5	191.8	350	7
15MK	552.5	97.5	0	616.0	190.4	350	7
20MK	520	130	0	611.5	189.0	350	7
10ÖYFC	585	0	65	627.2	193.9	350	7
20ÖYFC	520	0	130	624.9	193.2	350	7
30ÖYFC	455	0	195	622.6	192.5	350	7
10MK-20ÖYFC	455	65	130	615.9	190.4	350	7
20MK-10ÖYFC	455	130	65	609.2	188.3	350	7

*MK = Metakaolin, *ÖYFC = Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu, *GDBA=Geri Dönüşümlü Beton Agregası

2.2. Tepki Yüzeyi Metodu

Laboratuvar araştırmalarında verimliliği artırma, veri analizi ve istatistiksel çıktıların yorumlanması için Design Expert yaygın şekilde kullanılan bir paket programdır. Bu çalışmada Design Expert 12. Versiyonu kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Tepki yüzeyi metodu, Design Expert paket programında yer alan ve istatistik analizlerde kullanılan bir yöntemdir. Tepki yüzeyi metodu, değişkenler ve yanıt değerleri arasındaki ilişkiyi dikkate alarak model geliştirmek ve bu modellerin etkinliğini değerlendirmek için birçok çalışma alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton teknolojisinin gelişmesi ve beton kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte son yıllarda inşaat alanında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle laboratuvar çalışmalarında verimliliğin artmasına, zaman tasarrufuna ve ekonomik kazanımlara önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [26]. Yanıt yüzeyi ile modellemenin üç temel aşaması

bulunmaktadır [27]. Birincisi; amaçlanan yanıt değişkeni için gerekli deneysel verilerin toplanması, ikincisi; değişkenlerin belirlenerek bir RSM modeli oluşturulması ve üçüncüsü; yanıt değerlerinin yüksek doğrulukla tahmin edilebilmesi için değişkenlerin optimize edilmesidir.

Bu çalışmada merkezi kompozit tasarım olarak bilinen standart bir tepki yüzeyi metodu ele alınmaktadır. Bu tasarım sistemi, minimum sayıda test ile süreç parametrelerini etkili bir şekilde optimize ederek parametrelerin analiz sonuçlarını değerlendirir. Matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin bir karışımı olan bu yöntem, ampirik modeli oluşturmak, süreç parametrelerini iyileştirmek, optimize etmek ve parametrelerin çoklu etkileşimlerini elde etmek için kullanılabilir. Model tasarımı, dikkate alınan parametrelerin -1 ve +1 aralığındaki değerlerini tanımlar. Burada -1, geliştirilen modelde dikkate alınan parametrelerin en düşük değerine, 0 en düşük ve en yüksek değer aritmetik ortalamasına, +1 ise en yüksek değere karşılık gelmektedir. Parametre seçimi yapılırken yanıt değeri (çıktı değeri) üzerindeki etkisi araştırılarak belirlenmektedir. Bu çalışma kapsamında 90 günlük basınç dayanımı değerleri yanıt değeri olarak, ultrases geçiş hızı değerleri ise değişken olarak ele alınmış ve bir matematiksel model geliştirilmiştir.

2.3. Yaşam Döngüsü Analizi

Yaşam döngüsü analizi üretilen farklı kendiliğinden yerleşen harç serilerinin çevresel çıktılarının ayrıntılı bir karşılaştırmasını sağlamak için uygulanmıştır. Yaşam döngüsü analizi temel olarak dört bölümden oluşur ve bu bölümler EN ISO 14040'da detaylandırılmıştır [28, 29]. Bu bölümde amaç ve kapsam, yaşam döngüsü envanteri ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi incelenecektir. Yorumlama bölümü, etki kategorilerinin sonuçlarını değerlendirmek için sonuç ve tartışma bölümünde ayrıntılı olarak sunulacaktır.

2.3.1. Amaç ve Kapsam

Yaşam döngüsü değerlendirmesinin temel amacı üretilen kendiliğinden yerleşen harç serilerinin çevresel çıktılarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Bu kapsamda ek çimento esaslı malzemeler ile çimento yer değiştirilerek kullanılmış olup çimento kaynaklı çevresel çıktılar incelenmiştir. Yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilirken fonksiyonel birim seçimi büyük önem taşımaktadır. Yapılan detaylı literatür araştırmaları fonksiyonel birim seçiminde seriler arasında benzer mekanik ve durabilite özelliklerinin olması gerektiğini göstermiştir. Mekanik ve durabilite özellikleri dikkate alınmaksızın çevresel etki değerlendirmelerinin gerçekleştirilmesinin tutarlı sonuçlar meydana getirmediği düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında fonksiyonel birim olarak kontrol numune ile aynı nihai yaş basınç dayanımına sahip 1 m³ harç karışımı seçilmiştir.

2.3.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

Yaşam döngüsü envanter analizi, çalışmanın ana hedefi açıkça tanımlandıktan sonra yaşam döngüsü analizi için gerekli tüm verilerin kapsamlı bir şekilde toplandığı bölümü ifade eder. Toplanan tüm veriler yaşam döngüsü analizi için dikkate alınan fonksiyonel birimle ilişkili olmalıdır. Yaşam döngüsü envanter analizi iki farklı sistem olarak çalışır. Bu veriler hem arka plan hem de ön plan sistemlerini içerir. Arka plan verileri, enerji ve malzemeler gibi ön plan sistemlerini üretmek için gereken tüm kaynakları içerir. Yaşam döngüsü analizi için gerekli veriler önceki literatür çalışmalarından alınmıştır ve Tablo

3'de sunulmuştur [30, 31]. Ön plan verileri, karışım tasarımında kullanılan ve dikkate alınan malzemeleri içerir. Çevresel hesaplamalar için belirlenen sistem sınırları, dikkate alınan bu malzemelerin temini ve üretim aşamalarını içermektedir. Çevresel etki puanları hesaplanırken çimento, metakaolin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, geri dönüşümlü agrega, pomza ve beton üretiminden elde edilen değerler dikkate alınmıştır. Ancak bu hesaplamalar sırasında bazı varsayımlar yapılmıştır. Üretilen beton serileri için inşaat aşamalarının, taşıma parametrelerinin ve eleman yıkımının aynı olduğu dikkate alınmıştır. Bu nedenle nakliyeden kaynaklanan farklılıklar dikkate alınmamıştır.

Tablo 3. Yaşam döngüsü analizinde kullanılan envanter analizi

Etki Kategorisi	Çimento (kg)	MK (kg)	ÖYFC (kg)	Doğal Agrega (kg)	GDBA (kg)	Beton Üretimi (1m ³)
Enerji Tüketimi (MJ)	2.97	0.446	0.602	0.073	0.032	24.272

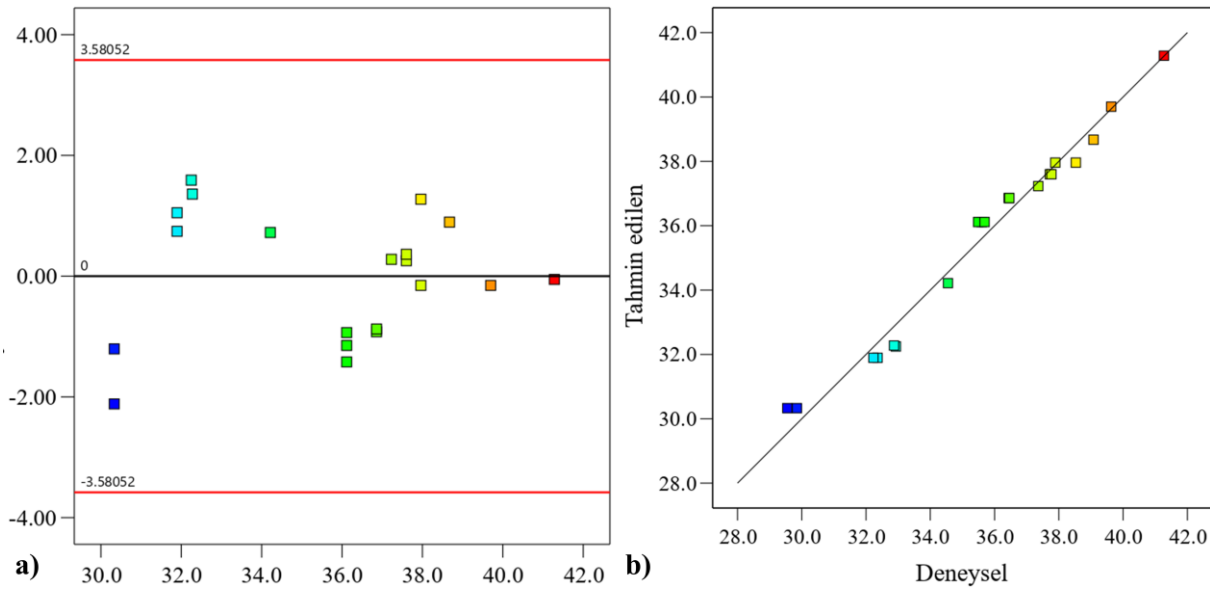
2.3.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

Bu bölüm, yaşam döngüsü analizinde dikkate alınan etki kategorilerinin seçimine ve sonuçta ortaya çıkan etki puanlarının değerlendirilmesine ilişkin ayrıntılı bir sunum içermektedir. Yaşam döngüsü analizinde etki kategorilerinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma ek çimento esaslı malzeme kullanımının önemli çevresel kazanımlarını sunmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda çimentonun önemli çevresel çıktıları sağladığı enerji tüketimi etki kategorisi olarak dikkate alınmıştır. Artan çimento kullanımına alternatif bir çözüm sunmak amacıyla ek çimento esaslı malzemelerin kullanımına bağlı olarak enerji tüketimi üzerindeki etkiler incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Matematiksel Modelin Geliştirilmesi

Bu bölüm üretilen kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait nihai yaş basınç dayanımı değerleri ile ultrases geçiş hızı test sonuçlarına dayalı geliştirilen matematiksel modeli içermektedir. Tepki yüzeyi metodu ile model geliştirme aşamasında 20 test verisi kullanılmıştır. Merkezi kompozit tasarım üzerinde analizler gerçekleştirilerek kuadratik bir model geliştirilmiştir. Modele ait veri seti uyumu için Cook uzaklık verileri ile deneysel ve model tahmin sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1.a'nın genel değerlendirilmesi Cook uzaklıklarının -2 ile +2 aralığında genel bir dağılıma sahip olduğunu ve veri setini bozan farklı bir çıktının olmadığını göstermektedir. Şekil 1.b ise deneysel sonuçlar ile model tahmin sonuçlarının çıktılarını sunmaktadır. Burada tahmin sonuçları ile deneysel sonuçların neredeyse çakıştığı görülmektedir. Bu durum geliştirilen modele ait tahmin sonuçlarının doğruluk düzeyinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Modele ait belirlilik katsayısının (R^2) = 0.97 olması da bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 1. Geliştirilen modele ait: a) Cook uzaklığı, b) Tahmin doğruluğu.4. Sonuç ve Tartışma

Tablo 4 geliştirilen modele ait deneysel ve tahmin sonuçlarını kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Tablonun genel incelemesi belirli oranlarda metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanımının dayanım üzerinde önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle % 15 metakaolin ve % 20 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren serilerde bu durum daha net bir şekilde görülmektedir. Metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun birlikte kullanıldığı serilerde de elde edilen sonuçlar kontrol serisine göre daha yüksek çıkmıştır. Bu serilere ait sonuçları tahmin edebilmek için matematiksel bir model geliştirilerek modele ait bağıl hata oranları hesaplanmıştır (Tablo 4). Bağıl hata oranları (BHO) hesaplanırken Denklem 1 dikkate alınmıştır [27]. Bağıl hata oranlarına ait değerlerin genel değerlendirilmesi tüm numunelere ait sonuçların % 5'in altında olduğunu göstermektedir. Hatta bazı kendiliğinden yerleşen harç serileri için bu değer %1'in altında kaldığı ve tahmin sonuçlarının yüksek doğrulukla gerçekleştiğini sunmaktadır.

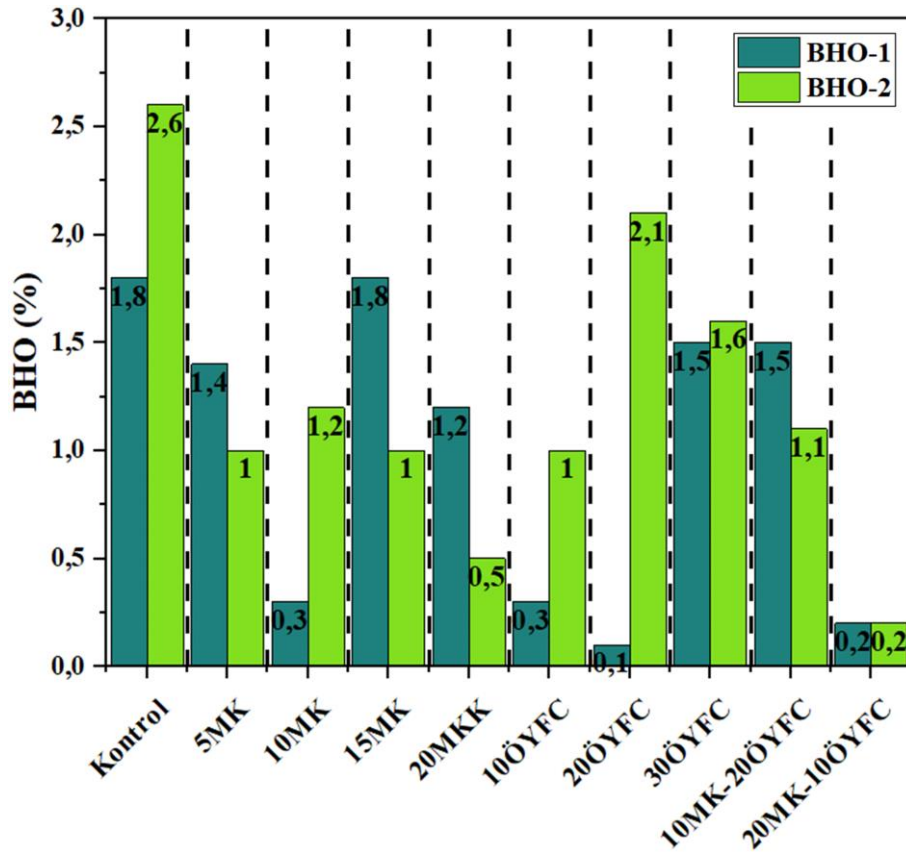
$$BHO = \frac{Deneyisel - Tahmin}{Deneyisel} \times 100 \quad (3.1)$$

Tablo 4. Modele ait bağıl hata oranları.

Karışım kodu	Deneyisel	Tahmin	Deneyisel	Tahmin	BHO	BHO
Kontrol	32.9	32.3	29.6	30.3	1.8	2.6
5MK	32.4	31.9	34.6	34.2	1.4	1.0
10MK	37.4	37.2	35.7	36.1	0.3	1.2
15MK	35.5	36.1	39.1	38.7	1.8	1.0
20MK	36.4	36.9	37.8	37.6	1.2	0.5
10ÖYFC	37.7	37.6	32.2	31.9	0.3	1.0
20ÖYFC	41.3	41.3	32.9	32.3	0.1	2.1
30ÖYFC	35.6	36.1	29.9	30.3	1.5	1.6
10MK-20ÖYFC	38.5	38.0	36.5	36.9	1.5	1.1

20MK-10ÖYFC	39.6	39.7	37.9	38.0	0.2	0.2
-------------	------	------	------	------	-----	-----

Modellere ait sonuçların daha iyi bir şekilde açıklanabilmesi için elde edilen sonuçlar Şekil 2’de kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. En yüksek bağıl hata oranları kontrol serisinde görülmesine rağmen bu değer % 2.6 olarak belirlenmiştir. Geri kalan tüm seriler için bu değer neredeyse % 1’in altında gözlenmiştir. 20MK-10ÖYFC serisi dikkate alındığında iki numune içinde bağıl hata oranlarının % 0.2 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bu seri ve genel inceleme özelinde elde edilen sonuçlar geliştirilen modelin etkin bir tahmin yapabilme yeteneğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Geliştirilen modele ait bağıl hata oranları.

3.2. Çevresel sonuçların incelenmesi

Bu bölüm etki kategorilerinden dikkate alınan enerji tüketimi değerlerinin sonuçlarını incelemeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda Tablo 2’de verilen karışım tasarımı dikkate alınarak enerji tüketimi değerleri hesaplanmış olup, dikkate alınan malzemelerin enerji tüketimi üzerindeki etkinliği kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait enerji tüketimi değerleri Tablo 5’de kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Tablo 5’in kapsamlı incelenmesi ek çimento esaslı malzeme kullanımına bağlı olarak Enerji Tüketimi değerlerinde önemli azalmalar meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle 20MK-10ÖYFC serisi ile kontrol serisinin karşılaştırılması Enerji Tüketimi değerlerinin sırasıyla 1506-1989.1 MJ olduğunu göstermektedir. Bu durum Enerji Tüketimi değerlerinde yaklaşık % 24.3’lük bir azalmaya karşılık gelmektedir. Yapılan literatür araştırmalarının kapsamlı değerlendirmesi

de benzer mekanik özelliklere sahip olan ek çimento esaslı malzeme içeren serilerin daha düşük Enerji Tüketimi değerleri sunduğunu göstermektedir [32, 33].

Tablo 5. Kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait Enerji Tüketimi sonuçları.

Karışım Kodu	Çimento	MK	ÖYFC	GDBA	Pomza	Beton Üretimi	Toplam (MJ)
Kontrol	1930.5	0.0	0.0	20.1	14.2	24.3	1989.1
5MK	1834.0	14.5	0.0	20.0	14.1	24.3	1906.8
10MK	1737.5	29.0	0.0	19.9	14.0	24.3	1824.6
15MK	1640.9	43.5	0.0	19.7	13.9	24.3	1742.3
20MK	1544.4	58.0	0.0	19.6	13.8	24.3	1660.0
10ÖYFC	1737.5	0.0	39.1	20.1	14.2	24.3	1835.1
20ÖYFC	1544.4	0.0	78.3	20.0	14.1	24.3	1681.0
30ÖYFC	1351.4	0.0	117.4	19.9	14.1	24.3	1527.0
10MK-20ÖYFC	1351.4	29.0	78.3	19.7	13.9	24.3	1516.5
20MK-10ÖYFC	1351.4	58.0	39.1	19.5	13.7	24.3	1506.0

4. Sonuçlar

Bu çalışma atık ve ek çimento esaslı malzemeler kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mekanik- çevresel özelliklerini incelemeye ve geliştirilen matematiksel model yardımıyla mekanik özellikleri tahmin etmeye odaklanmaktadır. Çalışmaya ait bazı sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Mekanik özellikleri tahmin etmek için geliştirilen matematiksel modelin etkinliği bağıl hata oranları dikkate alınarak incelenmiştir. Bağıl hata oranlarının tamamının %5'in altında olduğu, hatta bazı serilerde bu değerin %1'in altına düştüğü görülmüştür. Buradan geliştirilen modelin tahmin sonuçlarının tatmin edici düzeylerde olduğu açıkça görülmektedir. Belirlilik katsayısının 0.97 olması da modelin etkin bir kullanıma sahip olduğunu desteklemektedir.
- 2- Enerji Tüketimi değerlerinin ek çimento esaslı malzeme kullanımına bağlı olarak önemli ölçüde azaldığı açıkça görülmektedir. %30 oranında ek çimento esaslı malzeme içeren serilerde yaklaşık olarak %20-25 aralığında bir azalma meydana gelmektedir. Özellikle deprem sonrası beton tüketiminin yüksek olduğu bölgelerde çevre kirliliğini azaltmak ve mekanik özellikleri iyileştirmek adına ek çimento esaslı malzemeler önemli katkılar sunmaktadır.
- 3- Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi hedefleri kapsamında atık malzemelerin kullanımı kapsamlı şekilde incelenmiştir. Ek çimento esaslı malzeme kullanımı ile atık malzemelerin olumsuz yönleri mekanik anlamda dengelenmiştir. Böylece atık malzemelerin kullanımına olanak sağlanarak doğal kaynak tüketimi azaltılmış ve atık yönetimine önemli katkılar sunulmuştur.
- 4- Geri dönüşümlü agregaların geniş karakteristiklere sahip olması çalışmanın temel sınırlamalarından biri olmasına rağmen atık malzemelerin değerlendirilmesine olanak sağlaması sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda büyük önem arz etmektedir.

- 5- Özellikle Türkiye gibi deprem riski yüksek olan yerleşim bölgelerinde olası yıkıcı depremler meydana gelmeden önce inşaat ve yıkıntı atıkları için bir atık yönetim sistemi oluşturulmalıdır. Böylece önemli teknik, çevresel ve ekonomik kazanımların elde edilmesi sağlanabilir.

Teşekkür

Yazar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Ulucan, M. (2024). From waste to sustainable production: Experimental design and optimization of sustainable concrete using response surface methodology and life cycle assessment. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 42, 101770. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101770>.
- [2] Yön, M. Ş., Yön, B., Karataş, M., & Benli, A. (2024). Sustainable use of boron waste and volcanic scoria in slag-based self-compacting alkali-activated mortars: Fresh, mechanical and durability properties. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 41, 101664. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101664>.
- [3] Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2022). A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental. *Waste Management*, 146, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.045>.
- [4] Chen, L., Huang, Z., Pan, W., Su, R. K. L., Zhong, Y., & Zhang, Y. (2024). Low carbon concrete for prefabricated modular construction in circular economy: An integrated approach towards sustainability, durability, cost, and mechanical performances. *Journal of Building Engineering*, 90, 109368. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109368>.
- [5] Li, T., Nogueira, R., Pereira, M. F. C., de Brito, J., & Liu, J. (2024). Effect of the incorporation ratio of recycled concrete aggregate on the properties of self-compacting mortar. *Cement and Concrete Composites*, 147, 105429. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105429>.
- [6] Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30, 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- [7] Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>.
- [8] Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2023). An integrative approach of the use of recycled concrete aggregate in high-rise buildings: Example of the Elysium. *Structural Concrete*, 24, 3329–3350. <https://doi.org/10.1002/suco.202200512>.

- [9] Ulucan, M., Yildirim, G., Alatas, B., & Alyamac, K. E. (2023). A new intelligent sunflower optimization based explainable artificial intelligence approach for early-age concrete compressive strength classification and mixture design of RAC. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202300138>.
- [10] Ulucan, M., Tas, Y., & Alyamac, K. E. (2023). Multi-objective optimization and assessment of recycled concrete aggregates for sustainable development: Example of the Kömürhan bridge. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202201018>.
- [11] Ulucan, M., Gunduzalp, E., Yildirim, G., Alatas, B., & Alyamac, K. E. (2024). Optimizing sustainable concrete compressive strength prediction: A new particle swarm optimization-based metaheuristic approach to neural network modeling for circular economy and disaster resilience. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202400070>.
- [12] Dener, M., Karataş, M., & Mohabbi, M. (2021). High temperature resistance of self-compacting alkali-activated slag/Portland cement composite using lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, 290, 123250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123250>.
- [13] Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2023). A comprehensive assessment of mechanical and environmental properties of green concretes produced using recycled concrete aggregates and supplementary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 97765–97785. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29197-y>.
- [14] Türk, E., Karataş, M., & Dener, M. (2022). Rheological, mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing basalt powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, 356, 129229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129229>.
- [15] de Brito, J., & Kurda, R. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 281, 123558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>.
- [16] Galusnyak, S. C., Petrescu, L., & Cormos, C.-C. (2022). Environmental impact assessment of post-combustion CO₂ capture technologies applied to cement production plants. *Journal of Environmental Management*, 320, 115908. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115908>.
- [17] Jiang, X., Xiao, R., Bai, Y., Huang, B., & Ma, Y. (2022). Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130778. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130778>.
- [18] Ulucan, M., Yildirim, G., Alatas, B., & Alyamac, K. E. (2024). Modelling and evaluation of mechanical performance and environmental impacts of sustainable concretes using a multi-objective optimization based innovative interpretable artificial intelligence method. *Journal of Environmental Management*, 372, 123364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123364>.
- [19] Culcu, M. B., & Esen, H. (2024). Investigation of mechanical, durability, and thermal properties of sustainable self-compacting mortars containing construction demolition waste and supplementary cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 95, 110361. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110361>.
- [20] Ulas, M. A., Culcu, M. B., & Ulucan, M. (2024). Valorization of recycled aggregates to eco-

- efficient lightweight self-compacting mortars: Studies on microstructure, mechanical, durability, environmental, and economic properties. *Construction and Building Materials*, 419, 135436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135436>.
- [21] Erkek, H., & Yetkin, M. (2023). Assessment of the performance of a historic minaret during the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Structures*, 58, 105620. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105620>.
- [22] Dedeoğlu, İ. Ö., Yetkin, M., Calayır, Y., & Erkek, H. (2024). January 24, 2020 Sivrice-Elazığ (Türkiye) earthquake: The seismic assessment of the earthquake territory, geotechnical findings and performance of masonry buildings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48, 2393–2412. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01318-0>.
- [23] EFNARC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use*. [European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems]. UK: EFNARC..
- [24] ASTM International. (2022). *Standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete* (ASTM C597-22). West Conshohocken, PA: ASTM International
- [25] European Committee for Standardization. (2019). *Compressive strength – Specification for testing machines* (EN 12390-4:2019). Brussels, Belgium: CEN.
- [26] Özdemir, A. M. (2025). Experimental evaluation and 3D finite element simulation of creep behaviour of SBS modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 460, 139821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139821>.
- [27] Alyamac, K. E., Ghafari, E., & Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, 144, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>.
- [28] International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management: Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14044)*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [29] International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040)*. Geneva, Switzerland: ISO..
- [30] Xing, W., Tam, V. W. Y., Le, K. N., Hao, J. L., & Wang, J. (2023). Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 193, 106947. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106947>.
- [31] Tošić, N., Marinković, S., Dašić, T., & Stanić, M. (2015). Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 87, 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>
- [32] Wijayasundara, M., Crawford, R. H., & Mendis, P. (2017). Comparative assessment of embodied energy of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 152, 406–419.
- [33] Shrestha, J. K. (2021). Assessment of energy demand and greenhouse gas emissions in low-rise building systems: Case study of five building systems built after the Gorkha Earthquake in Nepal. *Journal of Building Engineering*, 34, 101831. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101831>.