

**Atık Tuğla, Atık Mermer ve PP Lif İçeren Sürdürülebilir ECC'lerin Travers ve Balastsız Üstyapı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi**Fatih YILDIZHAN^{*1}, Hasan Erhan YÜCEL², Mustafa GÜNAL¹¹ Gaziantep Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye² Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Mimarlık Fak., Mimarlık Bölümü, 31060, Hatay, Türkiye

*fyildizhan@gantep.edu.tr

(Alınış/Received: 29.06.2025, Kabul/Accepted: 22.07.2025, Yayınlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Günümüzdeki zorlu işletim koşulları göz önüne alındığında, traversler ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzemelerin kullanımı önemli bir araştırma konusudur. Yüksek deformasyon kapasitesi ve üstün mekanik özelliklere sahip Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (Engineered Cementitious Composites, ECC), bu alanda potansiyel bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışmada, ilk kez Atık Tuğla (AT), Atık Mermer (AM) ve farklı uzunluklarda hibritlenmiş Polipropilen (PP) liflerin ECC üretiminde kullanımı araştırılmıştır. Sürdürülebilir ECC üretimi amacıyla, çimento yerine AT, kum yerine AM ve PVA lif yerine 6 ve 12 mm uzunluğundaki hibrit PP lifler kullanılmıştır. Üretilen ECC numuneleri üzerinde mini-slump, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, orta nokta sehim ve ultrasonik dalga hızı (UDH) testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, AT ve PP kullanımının mekanik özellikleri azalttığını, buna karşın AM katkısının mekanik özellikleri artırdığını göstermiştir. AT sünekliği artırırken, AM ve PP kullanımının sünekliği azalttığı belirlenmiştir. UDH sonuçları mekanik özelliklerle pozitif korelasyon göstermiştir. Elde edilen bulgular, AT, AM ve PP katkılı ECC'nin sürdürülebilir üretimi mümkün kıldığını ve bu malzemenin travers ve balastsız üstyapı uygulamaları için potansiyel bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Travers, Balastsız üstyapı, ECC, Atık malzeme, Polipropilen lif, Sürdürülebilirlik

Evaluation of the Use of Sustainable ECCs Containing Waste Brick, Waste Marble and PP Fiber as Sleepers and Slab Track

Abstract: In light of today's challenging operating conditions, the use of new-generation composite materials in sleepers and slab track superstructure systems is a key area of research. Engineered Cementitious Composites (ECC), with their high deformation capacity and superior mechanical properties, could be a potential solution to this problem. This study investigated the use of Waste Brick (AT), Waste Marble (AM) and hybridized polypropylene (PP) fibers of different lengths in the production of ECC for the first time. For the purpose of sustainable ECC production, AT was used instead of cement, AM was used instead of sand and hybrid PP fibers with a length of 6 and 12 mm were used instead of PVA fiber. Mini-slump, compressive strength, flexural strength, mid-span beam deflection and ultrasonic pulse velocity (UPV) tests were performed on the produced ECC samples. The results showed that the use of AT and PP decreased the mechanical properties, whereas AM additive increased the mechanical properties. It was determined that the use of AM and PP decreased ductility, while AT increased ductility. UPV results showed positive correlation with mechanical properties. The findings revealed that the addition of AT, AM and PP to ECC enables sustainable production, making this material a potential alternative for sleeper and slab track applications.

Keywords: Sleeper, Slab track, ECC, Waste material, Polypropylene fiber, Sustainability

1. Giriş

Günümüzde beton sudan sonra en fazla kullanılan malzemedir [1]. Bu nedenle beton, demiryolu üstyapılarında da yaygın olarak tercih edilen bir yapı malzemesidir. Örneğin, yıllık çimento üretim miktarı 2010 da 3,3 milyar ton iken, 2022 de 4,1 milyar tona ulaşmıştır [2]. Beton sıkça

Atıf için/Cite as: F. Yıldızhan, H. E. Yücel, M. Günel, "Atık tuğla, atık mermer ve PP lif içeren sürdürülebilir ECC'lerin travers ve balastsız üstyapı olarak kullanımının değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 132-146, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1729747

tercih edilen, yüksek basınç dayanımı, uygun maliyet ve yüksek dayanıklılığa sahip bir malzemedir [3]. Demiryolu üstyapısında traverste ve balastsız üstyapıda beton kullanılmaktadır.

Travers, rayların sabit kalmasını sağlayan ve raylardan gelen yükleri balast tabakasına ileten elemandır [4]. Günümüzde işletim koşulları göz önüne alındığında traverslerin servis süresi tasarım süresinden (40-50 yıl) kısa olmaktadır [5]. Bu yüzden, yeni nesil kompozit traverslerle ilgili çalışmalar yapılması gerektiği literatürde vurgulanmıştır [6,7]. Traverslerin performans özellikleri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır [8,9]. Çeçen ve Aktaş [10] traverslerin performanslarını artırmak için, polipropilen (PP) lif kullanmış ve performans özellikleri artmıştır. Benzer şekilde traverste yerli karbon lif kullanılmış ve olumlu kazanımlar elde edilmiştir [5]. Köroğlu ve Erkendirci [11] ise traverslerde cam elyaf, mamul dokuma kumaş ve keçe kumaş kullanımını incelemiş, ancak istenilen performans kriterleri sağlanamamıştır. En yüksek verim cam elyaftan alınmıştır. Literatürde yalnızca performans özellikleri değil, aynı zamanda çimento üretiminden kaynaklanan yüksek karbon emisyonları da dikkate alınmaktadır. Çeçen ve Aktaş [11] travers üretimi için ise düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento kullanımı incelemiştir ve karbon emisyonunun %50 oranında azaldığını tespit etmiştir. Bunlara ek olarak geri dönüştürülmüş atık malzemelerin çevresel endişelerle traverslerde kullanımı son yıllarda birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir [8,9,12,13]. Fakat bu çalışmalara ek yeni nesil kompozit malzemelerle ilgili daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği de bu çalışmalarda ortak vurgulanan noktalardandır [6,7,14].

Balastlı üstyapıda traversten gelen yükler elastik bir malzeme olan balasta aktarılırken, balastsız üst yapıda ise beton gibi daha rijit malzemeler kullanılmaktadır [15]. Literatürde balastsız üstyapı için kısıtlı çalışmalar bulunmaktadır. Balastsız üstyapı için ulusal literatürde yapılan çalışmada ondülasyon bakım maliyeti hesaplanmıştır [16]. Uluslararası literatürde ise 2030-2050 demiryolu için Avrupa gereklilikleri, artan talep, yüksek hız ve ekolojik ihtiyaçlar değerlendirildiğinde, minimum maliyetli ve yüksek performanslı balastlı üstyapının üretilmesi gerektiği ifade edilmiştir [17]. Literatürden elde edilen bilgiler ışığında hem travers hem de balastsız üstyapı için sürdürülebilir çimento esaslı kompozitlerin üretiminin oldukça önemli olduğu söylenebilir. Bu bağlamda Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (Engineered Cementitious Composites, ECC) sahip olduğu üstün özelliklerle dikkate alınması gereken yüksek potansiyelli bir alternatiftir.

ECC, şekil değiştirme sertleşmesine ve yüksek deformasyon kapasitesine sahip kırılma mekaniği ve mikromekanik prensipler kullanılarak tasarlanmış, yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin özel bir türüdür [18,19]. ECC, çimento, uçucu kül, silis kumu, polivinilalkol (PVA) lif veya farklı lifler (polietilen, polipropilen (PP), polyester, naylon, çelik ve volastonit mikro elyafları gibi), su ve süper akışkanlaştırıcıdan oluşur [20,21]. ECC, ilk çatlamadan sonra bir gerinim sertleşmesi davranışı gösterir [22] ve geleneksel betondan yaklaşık 300-500 kat daha yüksek olan çekme gerilme kapasitesine sahiptir [19,21,23]. Ayrıca, yüksek bir nihai çekme dayanımına (5-10 MPa), kopma modülüne (8-25 MPa), kırılma tokluğuna (25-30 kJ/m²) ve basınç dayanımına (80 MPa'ya kadar) sahiptir [24]. ECC ayrıca liflerin köprüleme etkisinden dolayı çoklu çatlak oluşumuna ve yüksek sünekliliğe sahiptir [25]. Ayrıca ECC çatlak oluşumundan sonra kendiliğinden iyileşme özelliği sayesinde bu çatlakları kapatabilmektedir [21]. Bu üstün özellikler, ECC'ye onarım/yenileme malzemesi ve dayanıklı yapı malzemesi olarak geniş uygulanabilirlik alanı kazandırmaktadır [25,26].

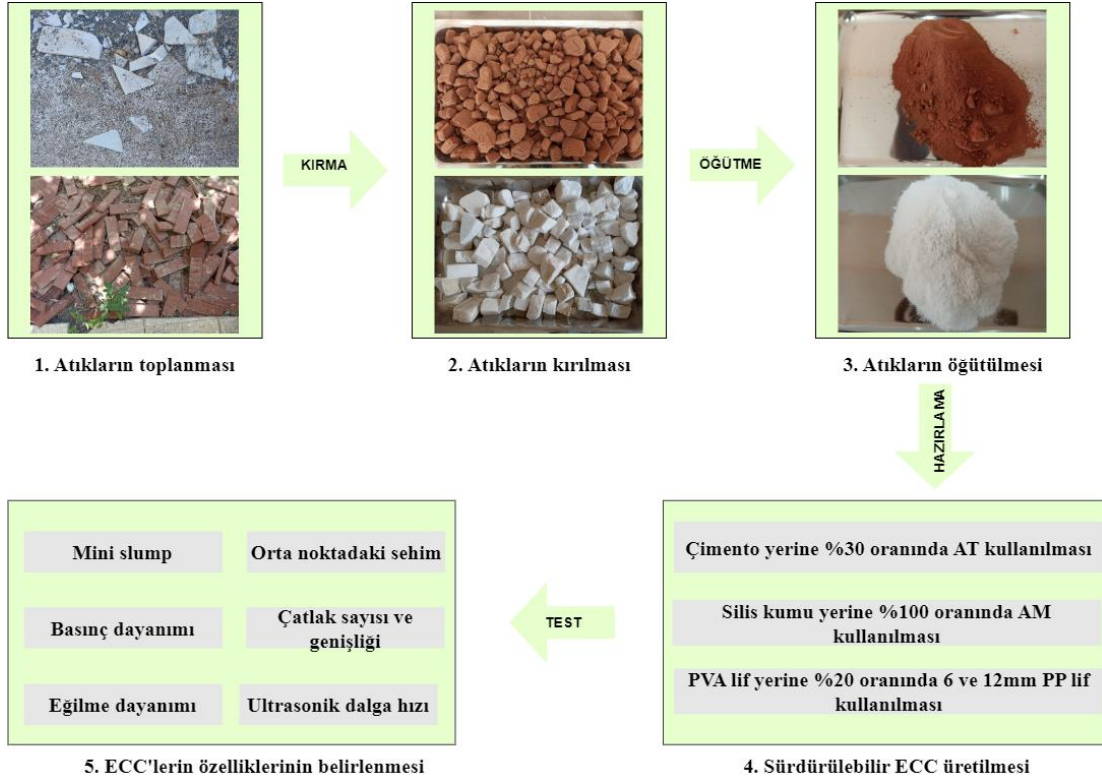
ECC'nin sahip olduğu bu üstün özelliklere rağmen; yüksek çimento miktarı, sınırlı silis kumu rezervleri ve PVA lifin yüksek maliyeti, çözülmesi gereken başlıca sorunlar arasında yer almaktadır [27]. Son yıllarda sürdürülebilirlik endişeleriyle çimento yerine doğada dönüşüm problemi olan atık malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerden biri de dönüşüm problemi olan atık tuğladır (AT). Tuğla, betondan sonra en yaygın kullanılan ikinci yapı malzemesidir. İnşaat ve yıkım faaliyetleri sonrasında yüksek miktarda atık tuğla (AT) oluşmaktadır. Örneğin

Çin'de, son yıllarda artan yapım faaliyetleriyle yılda yaklaşık 0,4 milyar ton atık tuğla ortaya çıkmaktadır [53]. AT'nin çimento esaslı kompozitlerde kum ve çimento yerine kullanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır [53]. Literatürde çimento yerine AT kullanımı harçların işlenebilirliğini azaltmış [28,29] ve mekanik özellikler için %10-15'lik oranlar önerilmiştir [28-29]. Daha yüksek oranlarda AT kullanımında ise basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir [28-30]. ECC'de çimento yerine AT kullanımında ise, %20 oranında kullanım mekanik özellikleri artırmıştır. [31]. Ayrıca hidrasyon ürünlerinde bir düşüş gösterdiği, mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği ve sünekliğin arttığı gözlemlenmiştir [32]. Bazı araştırmalarda, atık beton, atık harç, atık çimento harcı ve AT 'nin performansı karşılaştırılmıştır ve AT en iyi performansı göstermiştir [33-36]. Literatürden elde edilen sonuçlar, çimento yerine AT kullanımının ECC'nin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği fakat sünekliği ise olumlu etkilediğini göstermiştir.

Çimentoya benzer şekilde silis kumu yerine de atık malzemelerin kullanımı son yıllarda birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir. Mermerin kesme ve işleme kısmında çok yüksek miktarda atık mermer (AM) ortaya çıkarmaktadır. Örneğin Hindistan'da, yılda yaklaşık 5-6 milyon ton AM oluşmaktadır [54]. Doğada dönüşüm problemi ve AM'nin sahip olduğu filler etkisi göz önüne alındığında silis kumuna alternatif olarak AM ön plana çıkmaktadır [37]. Ayrıca AM çimento yerine de kullanılabilir [37]. AM'nin kum yerine kullanıldığı çalışmalarda %50 ve üzeri kullanım oranı aralığı önerilmiştir [38]. Ayrıca, ultrasonik titreşim hızı (UDH) testleri sonucuna göre %100 oranında AM tavsiye edilmiştir [39]. ECC'de AM kullanımında ise silis kum yerine kullanımının, basınç ve eğilme dayanımını %20'ye kadar arttırdığı ifade edilmiştir [40]. Daha yüksek oranlar ise ECC için denenmemiştir.

ECC'de PVA yerine birçok alternatif lif kullanılmıştır [41]. Bu lifler arasında uygun maliyeti, kolay bulunabilirliği ve yerli üretim imkanı ile PP lif ön plana çıkmaktadır [41]. PP lifinin kullanıldığı çalışmalarda, basınç dayanımında, eğilme dayanımında, süneklikte ve işlenebilirlikte azalma gözlemlenmiştir [42-44]. Fakat buna rağmen PP lifli ECC'ler genel olarak yapısal gereksinimleri karşılamış ve PVA'ya potansiyel bir alternatif olarak kabul edilmiştir [41]. Ayrıca lif uzunlukları ECC üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yapılan çalışmalarda PVA lifinin uzunlukları birçok performans özelliklerini değiştirmiştir [45,46]. Fakat ECC'de farklı PP liflerin beraber kullanılarak hibritlendiği bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın iki temel amacı bulunmaktadır. İlk olarak, ECC'de çimento yerine AT, kum yerine AM ve PVA lif yerine farklı uzunluklardaki PP liflerin hibrit kullanımıyla literatürdeki mevcut boşluğu doldurmak hedeflenmiştir. İkinci olarak ise, üretilen bu sürdürülebilir ECC'lerin demiryolu traversleri ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzeme olarak kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde AT ve AM'nin travers üretiminde kullanımına yönelik herhangi bir çalışmanın bulunmaması, çalışmanın özgün yönlerinden birini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında, ECC karışımlarında çimento yerine %30 AT, kum yerine %100 AM ve PVA lif yerine %20 oranında 6 ve 12 mm uzunluklarındaki hibrit PP lifler kullanılmıştır. AT, AM ve PP liflerin birlikte kullanıldığı bu çalışma, literatürde bir ilk olma özelliği taşımaktadır. Deneysel süreç, Şekil 1'de verilen akış şemasına uygun olarak yürütülmüş olup; taze karışım özellikleri, basınç dayanımı, eğilme performansı, orta noktadaki sehim ve ultrasonik dalga hızı (UDH) parametreleri detaylıca incelenmiştir. Elde edilen bulguların, sürdürülebilir ECC üretimine önemli bir katkı sağlamasının yanı sıra, demiryolu traversleri ve balastsız üstyapılar için yüksek performanslı bir alternatif malzeme sunması beklenmektedir.

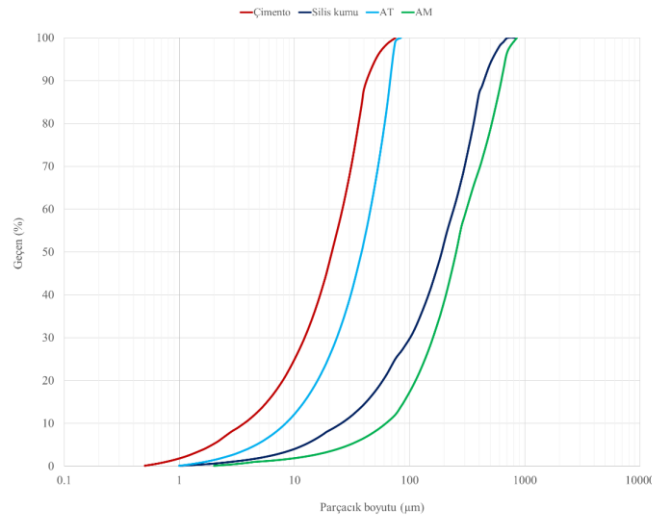


Şekil 1. Deneysel prosedürün akış şeması

2. Materyal ve Metod

2.1. Malzemeler

Çimento, silis kumu, AT ve AM için tane boyut dağılımı Şekil 2’de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan AT ve AM, öncelikle inşaat molozlarından toplanmıştır. Toplanan bu malzemeler, mekanik bir kırma işleminden geçirilmiştir ve iri agrega boyutuna getirilmiştir. Daha sonra, çimento ve kuma benzer parçacık boyutuna ulaşmaları amacıyla bilyalı değirmende öğütülmüştür. Böylece, AT ve AM’nin ECC özellikleri üzerindeki etkisinin daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi mümkün hale gelmiştir.



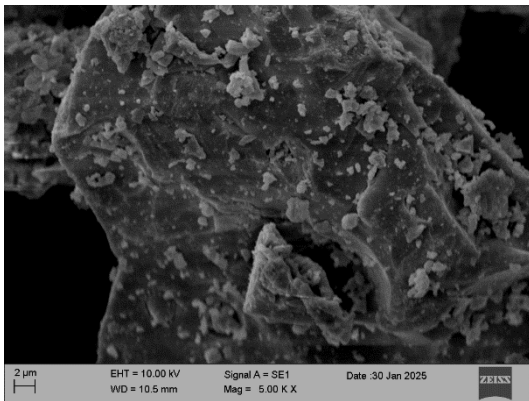
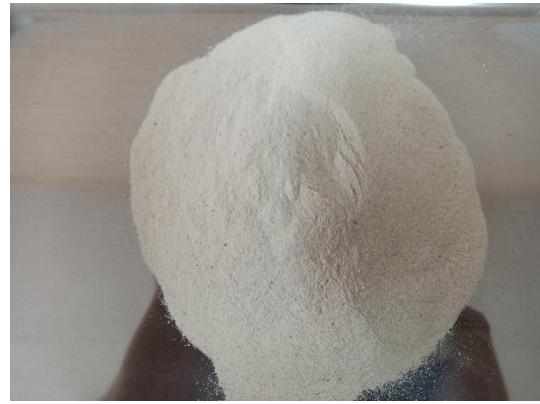
Şekil 2. Çimento, silis kumu, AT ve AM’nin tane boyut dağılımları

Tüm karışımlarda F tipi uçucu kül (UK) ve CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Silis kumu 0-400 µm boyut aralığında kullanılmıştır. Tablo 1’de, X-ışını floresansı (XRF) testi ile belirlenen UK, çimento, silika kumu, AT ve AM'nin kimyasal bileşimi verilmektedir. AT'de kalsiyum, silika ve alüminyumun varlığı, bu malzemenin çimentoya alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir. AT'deki yüksek silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) konsantrasyonları, puzolanik potansiyelinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır [35].

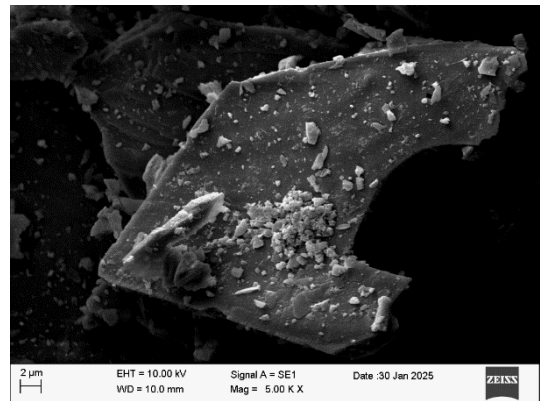
Tablo 1. Malzemelerin kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler	UK	Çimento	Kum	AT	AM
SiO_2	53,45	18,85	95,80	60,68	0,45
CaO	4,68	58,42	0,58	4,05	59,40
Al_2O_3	21,80	6,29	0,36	13,27	-
Fe_2O_3	6,11	4,88	0,81	12,15	0,15
K_2O	4,19	1,07	0,34	2,10	-
TiO_2	2,03	-	-	2,26	-
Kızdırma kaybı	3,08	3,05	-	1,25	39,80

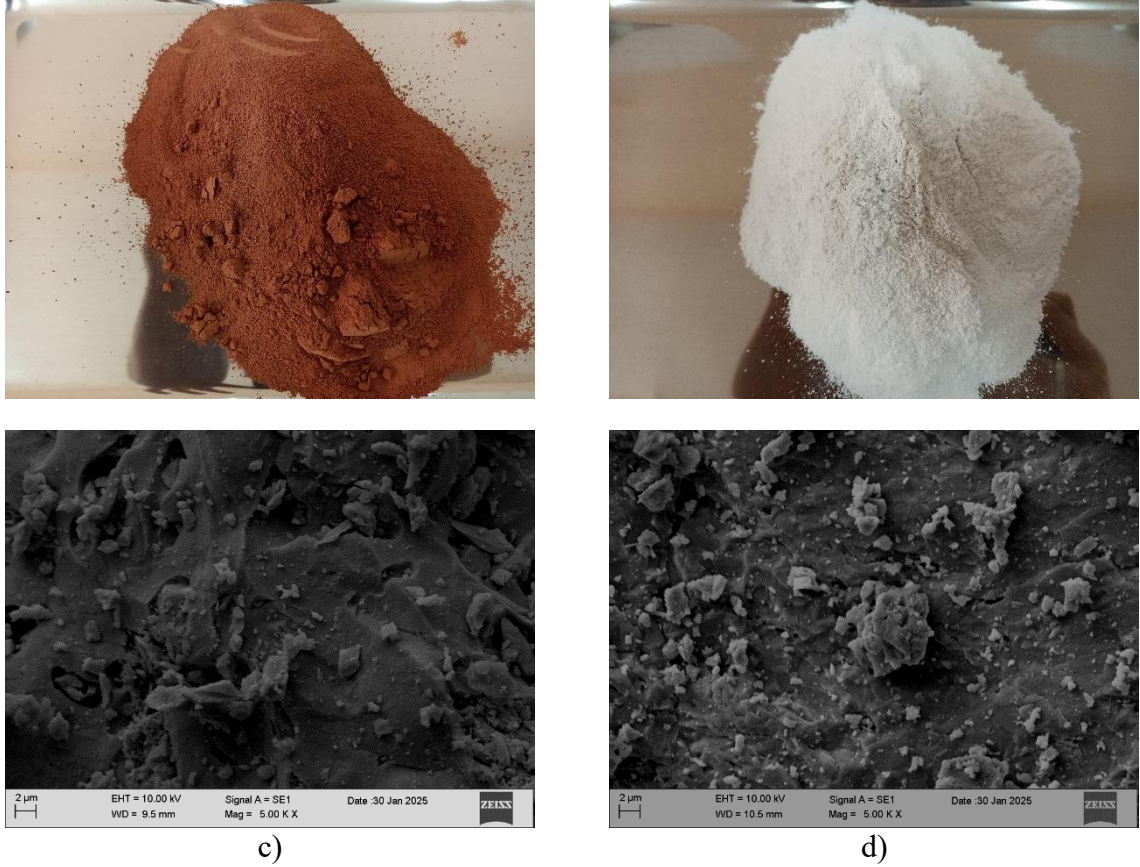
Şekil 3'de çimento, kum, AT ve AM'nin görünümü ve SEM görüntüleri verilmiştir. AT'nin mikro yapısının düzensiz bir formda olduğu ve büyük parçacıkların genellikle daha küçük parçacıklarla çevrelediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, AM'nin SEM görüntüsü, kenar ve yüzey dokusunun doğal kumdan belirgin şekilde farklı olduğunu ortaya koymuştur. ECC karışımlarında lif olarak PVA ve farklı uzunlukta PP lifi kullanılmış olup liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.



a)



b)



Şekil 3. Dış görünüm ve SEM görüntüleri a) çimento b) kum c) AT d) AM

Tablo 2. Liflerin özellikleri

Lif çeşidi	Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül ağırlık (kg/ m ³)
PVA	8	39	1620	42,8	1300
PP(6mm)	6	18	700	3,5	910
PP(12mm)	12	18	700	3,5	910

2.2. ECC karışım oranları

Çalışma kapsamında üretilen ECC'lerin karışım oranları Tablo 3'te sunulmuştur. AT, çimento yerine kütlece %30 oranında kullanılmıştır. Bu oran, literatürde elde edilen optimum değer olması nedeniyle tercih edilmiştir [33]. %30 AT'nin çimento yerine kullanıldığı karışımlar "AT30" olarak adlandırılmıştır. AM ise kum yerine %100 oranında ikame edilmiştir. Bu oran da literatürde tavsiye edilen bir değer olarak ifade edilmektedir [37]. %100 AM'nin kum yerine kullanıldığı karışımlar ise "AM100" şeklinde adlandırılmıştır.

Tüm karışımlarda toplam lif oranı hacimce toplam %2 olarak hesaplanmıştır. PP lif, PVA lifi yerine hacimce %20 oranında kullanılmıştır. Bu değişim kapsamında, 6 mm uzunluğundaki PP lif %10 ve 12 mm uzunluğundaki PP lif %10 olacak şekilde hibrit biçimde kullanılmıştır. Bu karışımlar "PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)" olarak adlandırılmıştır. Bu oranın düşük tutulmasının nedeni, PVA'nın PP'ye kıyasla sahip olduğu üstün mekanik özelliklerdir.

Çalışmada dört farklı karışım tasarımı uygulanmıştır: Kontrol, PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30, PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 ve PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30-AM100. Tüm karışım tasarımlarında, her deney için 7 ve 28 günlük testler yapılmıştır. Her bir yaş (7 ve 28 gün) için üçer adet numune üretilerek toplam altı numune hazırlanmıştır. Numuneler, 23 ± 2 °C sıcaklıkta, nemli plastik torbalar içinde 7 ve 28 gün süreyle kürlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı (SA) miktarı, karışımlar arasında benzer işlenebilirliğin sağlanması amacıyla değiştirilmiştir.

Tablo 3. ECC karışım oranları (kg/m³)

Karışım	UK	Çimento	Kum	AT	AM	Su	SA	PVA	6 mm PP	12mm PP
Kontrol	677,7	564,4	451,1	-	-	329,9	6,8	2	-	-
PP0.1(6mm)- PP0.1(12mm)- AT30	677,7	395,1	451,1	169,3	451,1	329,9	6,8	1,8	0,1	0,1
PP0.1(6mm)- PP0.1(12mm)- AM100	677,7	564,4	-	-	451,1	329,9	7,7	1,8	0,1	0,1
PP0.1(6mm)- PP0.1(12mm)- AT30-AM100	677,7	395,1	-	169,3	451,1	329,9	7,7	1,8	0,1	0,1

2.3. Deneysel çalışmalar

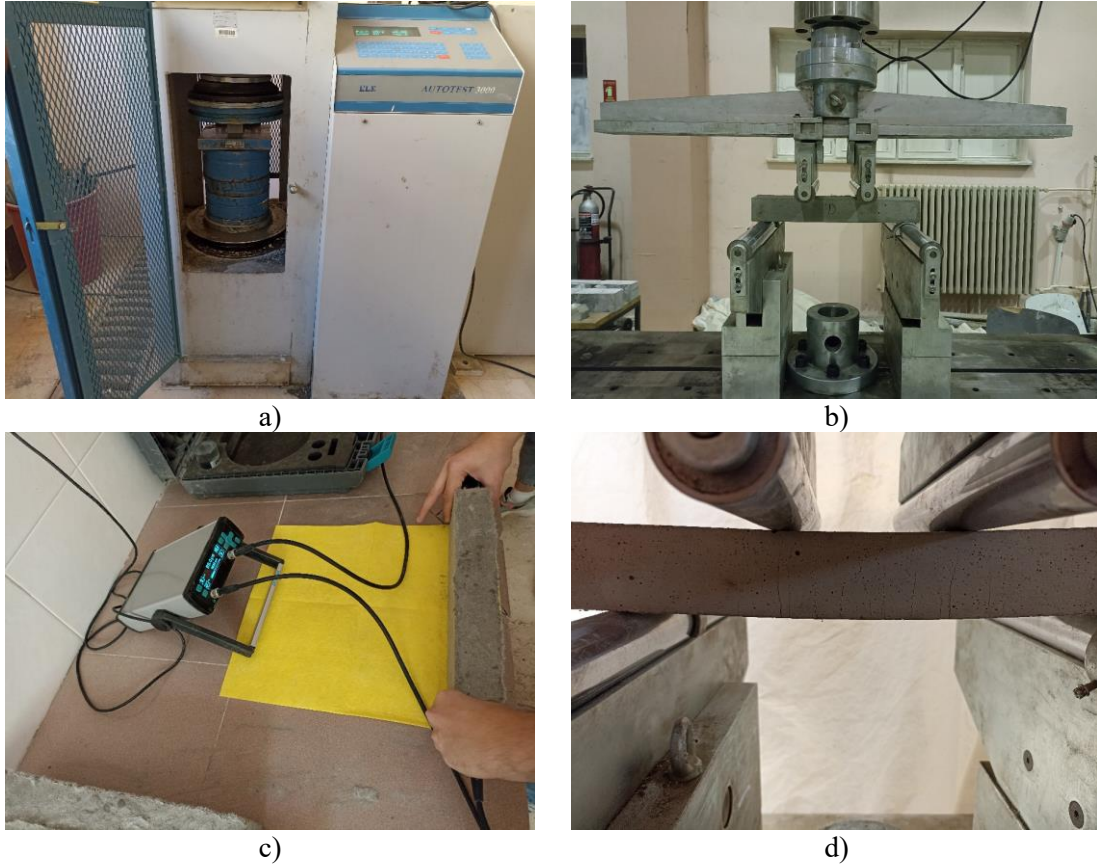
ECC üretimi için 20 lt kapasiteli mikser kullanılmıştır. İlk olarak katı malzemeler 100 rpm’de bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkılı su, mikserdeki karışıma eklenerek 150 rpm’de bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında, karışım 300 rpm’de iki dakika daha karıştırılarak homojen karışım elde edilmiş ve lifler karışıma eklenmiştir. Son olarak, lifler eklendikten sonra 150 rpm’de ilave 3 dakikalık karıştırılarak taze ECC karışımları hazırlanmıştır.

Çalışma kapsamında mini-slump, basınç, eğilme performansı ve ultrasonik dalga hızı (UDH) testleri yapılmıştır. Basınç, eğilme, UDH ve çoklu mikro çatlak oluşumuna ait görseller Şekil 4’te verilmiştir. İlk olarak ECC karışımlarının taze özelliklerini belirlemek için mini slump testi kullanılmıştır. Taze haldeki ECC numunesi, üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm ve yüksekliği 60 mm olan bir koniye dökülmüştür. Ardından koni, düz ve pürüzsüz bir yüzey üzerinde yavaşça kaldırılmış; elde edilen yayılmanın birbirine dik iki çapı ölçülmüştür. Bu iki ölçümün ortalaması alınarak mini slump değeri belirlenmiştir.

Basınç dayanımı testleri, ASTM C109 [47] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 0,9 kN/s yükleme hızıyla, 50 mm × 50 mm × 50 mm boyutlarındaki kübik numuneler üzerinde test uygulanmıştır. Her bir karışım için, 7. ve 28. günlerde üçer numune test edilmiştir.

ECC karışımlarının eğilme performansı, 360 mm × 75 mm × 50 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde değerlendirilmiştir. Testler sonucunda, karışımların eğilme dayanımları ve orta noktadaki sehim değerleri belirlenmiştir. Eğilme testleri, 0,003 mm/s deformasyon hızı ile çalışan kapalı devre elektromekanik bir test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, testlerin ardından numunelerin yüzeyindeki çatlakların sayısı ve genişlikleri, el mikroskobu yardımıyla ölçülerek analiz edilmiştir.

UDH testi, ultrasonik dalgaların bir numunenin bir tarafından diğer tarafına geçiş süresine dayalı hasarsız bir test yöntemidir. Bu test ile numunelerin yoğunluğu, boşluk içeriği ve olası mikroçatlaklar hakkında bilgi elde edilmektedir. UDH testi, ASTM C597 (2016) [48] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Testler, 360 mm × 75 mm × 50 mm boyutlarındaki üç prizmatik numune üzerinde, 7. ve 28. günlerde yapılmıştır.

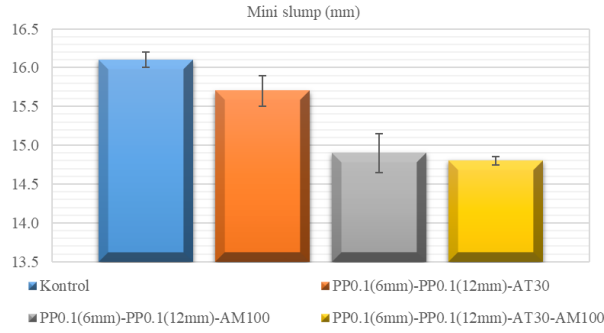


Şekil 4. Uygulanan testler a) basınç b) eğilme c) UDH d) çoklu mikro çatlak oluşumu

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mini-slump testi

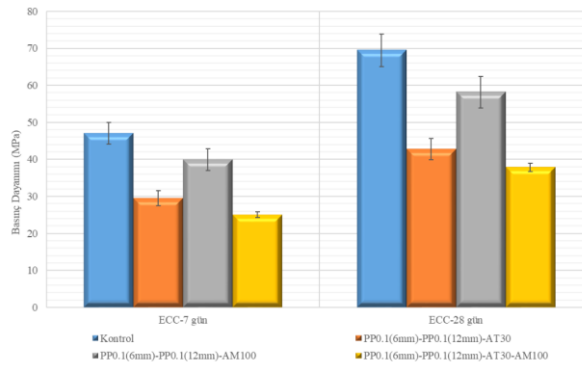
ECC karışımlarının mini-slump değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Benzer işlenebilirlik için süper akışkanlaştırıcı miktarı ayarlanmış ve mini slump değerleri ($15,45 \pm 0,65$) belirli bir aralıkta tutulmuştur. AT, AM ve PP lif kullanımıyla mini slump değerleri azalmıştır. AT kullanımında slump değerinin azalması Şekil 3'de görülen düzensiz parçacık şekline atfedilebilir. Literatürde de ECC için AT kullanımıyla slump değeri azalmıştır [28]. AM kullanımında mini slump değerindeki azalma ise AM'nin Şekil 3'de görülen pürüzlü tanecik yapısına bağlanabilir. Literatürdeki sonuçlar da, bu çalışmada AM için elde edilen bulguları desteklemektedir [40]. PP kullanımında işlenebilirliği azaltması ise PP lifinin hidrofobisitesi sebebiyle olabilir [49]. Benzer bulgular literatürde de elde edilmiştir [49]. Çalışmadan elde edilen mini-slump testi sonuçları AT, AM ve PP lif kullanımının ECC'de işlenebilirliği azalttığını göstermektedir.



Şekil 5. ECC karışımlarının mini-slump değerleri

3.2. Basınç testi

Şekil 6, ECC karışımlarının basınç dayanımlarını göstermektedir. AT, AM ve PP lif kullanımı basınç dayanımını azaltmıştır. Basınç dayanımının, AT kullanımıyla azalma göstermesi matris dayanımının azalmasından kaynaklanabilir [34]. Bu bulgu literatürden elde edilen sonuçlarla da uyumludur [33,35]. AM kullanımı ise AT kullanımına göre basınç dayanımında daha iyi sonuç vermiştir. Literatürde de AM kullanımının basınç dayanımını artırdığı belirtilmiştir [39]. Bu artışın sebebi AM nin filler etkisine bağlanabilir [39]. PP kullanımının ise PVA life göre daha düşük basınç dayanımı değerine sebep olması PP lifin PVA life göre düşük elastisite modülüne sahip olmasına atfedilebilir [50]. Bu bulgu literatürle uyumludur [50]. AT ve AM nin kullanıldığı PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30-AM100 karışımı ise AT ve AM nin tek kullanıldığı karışımlara göre daha düşük basınç dayanımı elde edilmesine sebep olmuştur. Bu bulgu AT ve AM nin beraber kullanımında basınç dayanımının daha fazla olumsuz etkilediğini göstermektedir. TS EN 13230-1 (2016) [51] standartında minimum basınç dayanımı travers için C45/55 MPa'dır. Balastsız üstyapı için ise C35/45 MPa'dır [15]. Bu yüzden çalışma kapsamında kontrol karışımı ve üretilen sürdürülebilir ECC'lerden PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımı travers ve balastsız üstyapı için standarta uygundur. PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30 karışımı ise balastsız üstyapı için minimum koşula oldukça yakındır. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, ECC'nin demiryolu üstyapısı için potansiyel bir alternatif olabileceği söylenebilir.



Şekil 6. ECC karışımlarının basınç dayanımı

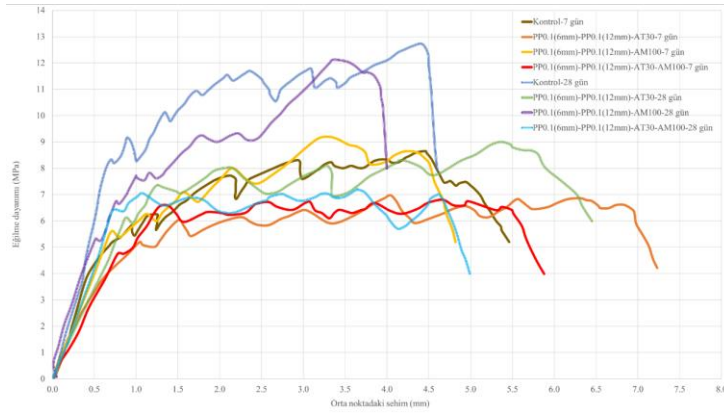
3.3. Eğilme performansı testi

Şekil 7, ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim grafiklerini sunmaktadır. AT kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde azalma gözlemlenmiştir. AT kullanımının eğilme dayanımını azalttığı literatür tarafından da desteklenmektedir [33,35]. AT kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi WB'nin düzensiz şekli sayesinde artan lif-matris köprüleme

gerilimiyle açılanabilir [32]. Literatürde benzer şekilde AT kullanımının sünekliği artırdığı belirtilmiştir [32,34].

AM kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde artış gözlemlenmiştir. AM kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre azalma gözlemlenmiştir. Süneklikte azalma olmasına rağmen geleneksel betona göre oldukça sünek davranış göstermiştir.

AT ve AM beraber kullanıldığında eğilme dayanımı değeri tek kullanıma göre daha çok azalmıştır. Bu gözlem basınç testinde de tespit edilmiştir. Süneklikse kontrol karışımına göre artmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular PP, AT ve AM kullanılarak üretilen sürdürülebilir ECC'nin standart ECC'ye yakın eğilme dayanımı (PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımı) veya daha fazla süneklikle üretilebileceğini göstermektedir. Sürdürülebilir ECC'nin demiryolunda travers ve balastsız üstyapı içinde farklı üstün performans özellikleri sunabileceği söylenebilir.



Şekil 7. ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim grafikleri

Eğilme testi sonrası el mikroskopuyla çatlak sayısı ve genişlikleride ölçülmüş ve Tablo 4'te verilmiştir. Çatlak sayısının PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30 karışımında maksimum iken, PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımında minimumdur. Literatürde de süneklikle çatlak sayısının ilişkili olduğu belirtilmiştir [52]. Çatlak genişliği ise süneklik azaldıkça artmıştır.

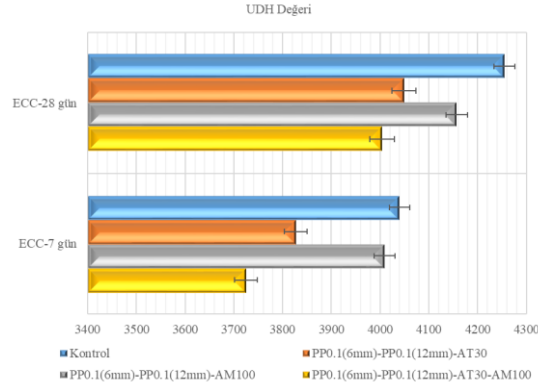
Tablo 4. ECC çatlak sayısı ve genişliği

Karışımlar	Çatlak Sayısı		Çatlak Genişliği (μm)	
	7. Gün	28. Gün	7. Gün	28. Gün
Kontrol	18	8	59	88
PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30	24	15	35	49
PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100	10	7	86	93
PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30-AM100	19	10	48	66

3.4. Ultrasonik dalga hızı testi

Şekil 8, ECC karışımlarının UDH değerlerini göstermektedir. AT, AM ve PP lif kullanımı UDH değerlerini azaltmıştır. Elde edilen bulgular, UDH değerlerinin basınç ve eğilme dayanımı ile yüksek oranda korelasyonlu olduğunu ortaya koymuştur. AT kullanımıyla UDH değeri düşüşü

Şekil 3’deki düzensiz yapısı sebebiyle artan boşuk oranıyla açıklanabilir. AM ise AT ye göre daha iyi sonuçların elde edilmesine neden olmuştur. AM nin filler etkisi bunun sebebi olabilir [37]. Ayrıca, AT ve AM nin beraber kullanımında basınç dayanımına benzer şekilde UDH değeri daha da azalmıştır. Sonuç olarak, UDH testinin basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçlarıyla tutarlı sonuçlar verdiği ve AT, AM ve PP lif kullanımının UDH değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür.



Şekil 8. ECC karışımlarının UDH değerleri

Çalışma kapsamında üretilen ECC’lerin sürdürülebilirlik açısından değerlendirmesi şu şekildedir: Bu çalışmada, çimento yerine AT, silis kumu yerine ise AM kullanılmıştır. AT ve çimentonun enerji tüketimi, karbon emisyonu ve maliyeti sırasıyla 5.500 ve 0.600 (Mj/kg), 0.930 ve 0.167 (kg/kg), 600 ve 170 (RMB/ton) olarak belirtilmiştir [31]. AM ve silis kumunun karşılık gelen değerleri ise sırasıyla 0.226 ve 0.460 (Mj/kg), 0.033 ve 0.082 (kg/kg), 208 ve 128 (RMB/ton)’dur [55,56]. Bu veriler ışığında, çimento yerine AT kullanımının enerji tüketimi, karbon emisyonu ve maliyet açısından önemli avantajlar sağladığı görülmektedir. AM’nin kum yerine kullanımının ise yalnızca maliyet açısından avantaj sunduğu düşünülmektedir. Ancak, AM’nin atık bir malzeme olarak çevreye verebileceği zararları önleme potansiyeli ve mermer üretimindeki yüksek enerji ve emisyon değerleri dikkate alındığında, AM kullanımı da çevresel ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlayabilir.

4. Sonuç

Bu çalışma günümüzdeki zorlu işletim koşullarını dikkate alarak, travers ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzemelerin üretilmesi problemi ele almıştır. Bu sebeple, ECC’de çimento yerine AT, kum yerine AM ve PVA lif yerine farklı uzunluklardaki PP lifler hibritlenerek kullanılmıştır. Üretilen bu sürdürülebilir ECC’lerin demiryolu traversleri ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzeme olarak kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular şu şekildedir:

AT, AM ve PP lif kullanımıyla mini slump değerleri azalmıştır. AT, AM ve PP lif kullanımı basınç dayanımını azaltmıştır. AT ve AM nin kullanıldığı karışımda AT ve AM nin tek kullanıldığı karışıma göre daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir. Fakat kontrol ve PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımı travers ve balastsız üstyapı için basınç dayanımı standartını sağlamaktadır. AT kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde azalma gözlemlenmiştir. AT kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre artış gözlemlenmiştir. AM kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde artış gözlemlenmiştir. AM kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre azalma gözlemlenmiştir. AT ve AM beraber kullanıldığında eğilme dayanımı değeri tek kullanıma göre daha çok azalmıştır. Bu gözlem basınç testinde de tespit edilmiştir. Süneklikse kontrol karışımına göre artmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular PP, AT ve AM kullanılarak

üretilebilir ECC'nin standart ECC'ye yakın eğilme dayanımı (PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm) -AM100 karışımı) veya daha fazla süneklikle üretilebileceğini göstermektedir. UDH değerlerinin basınç ve eğilme dayanımı ile yüksek oranda korelasyonlu olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, standart ECC ve çalışma kapsamında üretilen sürdürülebilir ECC'lerin demiryolunda travers ve balastsız üstyapı içinde farklı üstün performans özellikleri sunabileceği ve ECC'nin demiryolu üstyapısı için potansiyelli alternatif olduğu söylenebilir.

Gelecek çalışmalarda, bu malzemelerin yüksek hızlı tekrarlı darbe, servis yükleri altındaki dayanım, uzun vadeli durabilite ve sıcaklık-nem etkisi gibi parametrelerle test edilmesi ve gerçek travers prototipleri üzerinde saha veya laboratuvar deneyleri yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu yayın Fatih Yıldızhan'ın doktora tez çalışmasından hazırlanmıştır.

Kaynakça

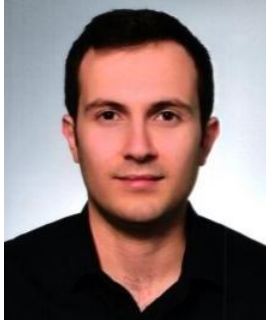
- [1] Silva, R. Nogueira, M. G. Gomes, ve J. A. Bogas, "Carbon utilization during concrete production: reasons for the low CO₂ uptake", *Journal of Building Engineering*, c. 107, s. 112766, Ağu. 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.112766.
- [2] E. Khalil ve M. AbouZeid, "Framework for Cement Plants Assessment Through Cement Production Improvement Measures for Reduction of CO₂ Emissions Towards Net Zero Emissions", *Construction Materials 2025, Vol. 5, Page 20*, c. 5, sy 2, s. 20, Nis. 2025, doi: 10.3390/CONSTRMATER5020020
- [3] T. Y. Erdoğan, *Beton*. Ankara, Turkey: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, 2007.
- [4] M. Kozak, B. Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü, A. Alınış, A. Kelimeler Travers, ve B. travers, "Kalker ve Bazalt Agregaları ile Beton Travers Üretimi", *Teknik Bilimler Dergisi*, c. 10, sy 2, ss. 19-25, Tem. 2020, doi: 10.35354/TBED.679346
- [5] F. Çeçen vd., "Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi", *Railway Engineering*, sy 15, ss. 97-110, Oca. 2022, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.1028740
- [6] O. Yazıcı, "Yeni Nesil Çevreci Kompozit Traversler", *Railway Engineering*, sy 12, ss. 13-21, Tem. 2020, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.687880.
- [7] W. Ferdous, A. Manalo, G. Van Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, ve A. Remennikov, "Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects", *Compos Struct*, c. 134, ss. 158-168, Ara. 2015, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.08.058.
- [8] M. E. Arafat ve F. Imam, "Suitability of recycled materials as a composite sleeper: A scoping review", *Mater Today Proc*, c. 65, ss. 1599-1607, Oca. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.04.599.
- [9] M. H. Esmaili, H. Norouzi, ve F. Niazi, "Evaluation of mechanical and performance characteristics of a new composite railway sleeper made from recycled plastics, mineral fillers and industrial wastes", *Compos B Eng*, c. 254, s. 110581, Nis. 2023, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2023.110581.
- [10] F. Çeçen ve B. Aktaş, "B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının DeneySEL İncelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy 15, ss. 158-169, Oca. 2022, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.990316.
- [11] F. Çeçen ve B. Aktaş, "Yeni Yeşil-Travers Modelinin B70 Tipi Öngerilmeli Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy 17, ss. 1-13, Oca. 2023, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.1107683.
- [12] A. A. Khalil, "Mechanical Testing of Innovated Composite Polymer Material for using in Manufacture of Railway Sleepers", *J Polym Environ*, c. 26, sy 1, ss. 263-274, Oca. 2018, doi: 10.1007/S10924-017-0940-6/TABLES/4.
- [13] J. J. Yee, S. C. Khong, J. Che, K. F. Tee, ve S. C. Chin, "Sustainable Materials in Concrete Railway Sleepers: A Review of Current Developments and Future Prospects", *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, c. 10, sy 1, ss. 1-16, Haz. 2024, doi: 10.15282/JCEIB.V10I1.10292.
- [14] F. Çeçen ve B. Aktaş, "Yeni LCR Tipi Traverslerin Demiryolu Hat Rijitliğine Etkisinin Araştırılması", *Demiryolu Mühendisliği*, c. 0, sy 16, ss. 36-50, Tem. 2022, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.1105999.

- [15] C. Ceylan, “Demiryolu Hatlarında Balastsız Üstyapı Kullanılması”, *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 6, ss. 34–36, Aralık 2017.
- [16] M. N. Demirdağ ve Z. Öztürk, “Balastsız Üstyapılarda Ondülasyon Bakım Maliyetinin Üstyapı Bakım Maliyeti İçindeki Oranının Örnek Hatta İncelenmesi”, *ECJSE*, c. 4, sy. 3, ss. 509–517, 2017, doi: 10.31202/ecjse.331656.
- [17] S. R. Matias ve P. A. Ferreira, “Railway slab track systems: review and research potentials”, *Structure and Infrastructure Engineering*, c. 16, sy 12, ss. 1635-1653, Ara. 2020, doi: 10.1080/15732479.2020.1719167.
- [18] S. Demirhan, “Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Eğilme Özellikleri”, *Politeknik Dergisi*, c. 27, sy. 4, ss. 1365–1374, 2024, doi: 10.2339/politeknik.1224004.
- [19] F. B. P. da Costa, D. P. Righi, A. G. Graeff, ve L. C. P. da Silva Filho, “Experimental study of some durability properties of ECC with a more environmentally sustainable rice husk ash and high tenacity polypropylene fibers”, *Constr Build Mater*, c. 213, ss. 505-513, Tem. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.092.
- [20] H. E. Yücel, H. Ö. Öz, M. Güneş, ve Y. Kaya, “Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers with two different high aspect ratios”, *Constr Build Mater*, c. 306, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124921.
- [21] H. E. Yücel, M. Dutkiewicz, ve F. Yıldızhan, “Application of ECC as a Repair/Retrofit and Pavement/Bridge Deck Material for Sustainable Structures: A Review”, *Materials 2022, Vol. 15, Page 8752*, c. 15, sy 24, s. 8752, Ara. 2022, doi: 10.3390/MA15248752.
- [22] Y. Wang, Z. Zhang, J. Yu, J. Xiao, ve Q. Xu, “Using Green Supplementary Materials to Achieve More Ductile ECC”, *Materials 2019, Vol. 12, Page 858*, c. 12, sy 6, s. 858, Mar. 2019, doi: 10.3390/MA12060858.
- [23] Y. Yang, E. H. Yang, ve V. C. Li, “Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age”, *Cem Concr Res*, c. 41, sy 2, ss. 176-183, Şub. 2011, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2010.11.002.
- [24] T. Kamada ve V. C. Li, “The effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system”, *Cem Concr Compos*, c. 22, sy 6, ss. 423-431, Ara. 2000, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00042-1.
- [25] Y. Zhou, H. Fu, P. Li, D. Zhao, L. Sui, ve L. Li, “Bond behavior between steel bar and engineered cementitious composite (ECC) considering lateral FRP confinement: Test and modeling”, *Compos Struct*, c. 226, s. 111206, Eki. 2019, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111206.
- [26] S. Gao ve P. Xie, “Effect of Temperatures and Moisture Content on the Fracture Properties of Engineered Cementitious Composites (ECC)”, *Materials 2022, Vol. 15, Page 2604*, c. 15, sy 7, s. 2604, Nis. 2022, doi: 10.3390/MA15072604.
- [27] D. Shoji, Z. He, D. Zhang, ve V. C. Li, “The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review”, *Constr Build Mater*, c. 327, s. 126701, Nis. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126701.
- [28] H. Wu vd., “Properties of Cementitious Materials with Recycled Aggregate and Powder Both from Clay Brick Waste”, *Buildings 2021, Vol. 11, Page 119*, c. 11, sy 3, s. 119, Mar. 2021, doi: 10.3390/BUILDINGS11030119.
- [29] Z. Ma, Q. Tang, H. Wu, J. Xu, ve C. Liang, “Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste”, *Cem Concr Compos*, c. 114, s. 103758, Kas. 2020, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103758.
- [30] H. Wu, C. Liang, C. Wang, ve Z. Ma, “Properties of green mortar blended with waste concrete-brick powder at various components, replacement ratios and particle sizes”, *Constr Build Mater*, c. 342, s. 128050, Ağu. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128050.
- [31] J. D. Wu, L. P. Guo, ve Y. Y. Qin, “Preparation and characterization of ultra-high-strength and ultra-high-ductility cementitious composites incorporating waste clay brick powder”, *J Clean Prod*, c. 312, s. 127813, Ağu. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127813.
- [32] W. Wang, H. Wu, Z. Ma, ve R. Wu, “Using Eco-Friendly Recycled Powder from CDW to Prepare Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) and Properties Determination”, *Materials 2020, Vol. 13, Page 1143*, c. 13, sy 5, s. 1143, Mar. 2020, doi: 10.3390/MA13051143.
- [33] P. Yao, D. Yang, C. Wang, ve Z. Ma, “Upcycling of construction waste powder for sustainable ultra-high performance engineered cementitious composites: Effects of waste powder source and content”, *Constr Build Mater*, c. 349, s. 128789, Eyl. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128789.

- [34] C. Liang, Y. Zhang, R. Wu, D. Yang, ve Z. Ma, "The utilization of active recycled powder from various construction wastes in preparing ductile fiber-reinforced cementitious composites: A case study", *Case Studies in Construction Materials*, c. 15, s. e00650, Ara. 2021, doi: 10.1016/J.CSCM.2021.E00650.
- [35] Z. Zhang, X. Liu, R. Hu, C. Liang, Y. Zhang, ve Z. Ma, "Mechanical behavior of sustainable engineered cementitious composites with construction waste powder as binder and sand replacement", *Constr Build Mater*, c. 404, s. 133185, Kas. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133185.
- [36] R. Wu, T. Zhao, P. Zhang, D. Yang, M. Liu, ve Z. Ma, "Tensile Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) Containing Reactive Recycled Powder from Various C&D Waste", *J Renew Mater*, c. 9, sy 4, ss. 743-765, Şub. 2021, doi: 10.32604/JRM.2021.013669.
- [37] E. Tugrul Tunc, "Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste", *J Environ Manage*, c. 231, ss. 86-97, Şub. 2019, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2018.10.034.
- [38] F. Gameiro, J. De Brito, ve D. Correia da Silva, "Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry", *Eng Struct*, c. 59, ss. 654-662, Şub. 2014, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2013.11.026.
- [39] B. Demirel, "The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete", *International Journal of the Physical Sciences*, c. 5, sy 9, ss. 1372-1380, 2010, Erişim: 04 Mart 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.academicjournals.org/IJPS>
- [40] K. A. Helal, A. M. Tahwia, ve O. Youssf, "Assessment of the efficiency of hybrid basalt fibre sustainable ECC incorporating industrial waste materials", *Constr Build Mater*, c. 461, s. 139933, Oca. 2025, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.139933.
- [41] D. Zhang, J. Yu, H. Wu, B. Jaworska, B. R. Ellis, ve V. C. Li, "Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC)", *Compos B Eng*, c. 184, s. 107741, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2020.107741.
- [42] A. Saljoughian, H. Bahmani, Z. Ansari, N. Jafari, ve D. Mostofinejad, "An eco-friendly ECC with high slag and polypropylene fiber content for high-tensile strain applications", *Journal of Building Engineering*, c. 91, s. 109726, Ağu. 2024, doi: 10.1016/J.JOBE.2024.109726.
- [43] S. R. Abid, M. S. Shamkhi, N. S. Mahdi, ve Y. H. Daek, "Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers", *Constr Build Mater*, c. 187, ss. 168-177, Eki. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.07.194.
- [44] W. Zhang, C. Yin, F. Ma, ve Z. Huang, "Mechanical Properties and Carbonation Durability of Engineered Cementitious Composites Reinforced by Polypropylene and Hydrophilic Polyvinyl Alcohol Fibers", *Materials 2018, Vol. 11, Page 1147*, c. 11, sy 7, s. 1147, Tem. 2018, doi: 10.3390/MA11071147.
- [45] C. Ding, L. Guo, ve B. Chen, "An optimum polyvinyl alcohol fiber length for reinforced high ductility cementitious composites based on theoretical and experimental analyses", *Constr Build Mater*, c. 259, s. 119824, Eki. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119824.
- [46] S. H. Said, H. A. Razak, ve I. Othman, "Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers", *Constr Build Mater*, c. 75, ss. 176-188, Oca. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.10.036.
- [47] "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)", Oca. 2020, doi: 10.1520/C0109_C0109M-20.
- [48] "Test Method for Pulse Velocity Through Concrete", Nis. 2016, doi: 10.1520/C0597-16.
- [49] M. Hou ve V. C. Li, "Tailoring crack width control of LC3-based engineered cementitious composites (ECC) via fiber hybridization: From micromechanics design to macro investigation", *Mater Des*, c. 235, s. 112433, Kas. 2023, doi: 10.1016/J.MATDES.2023.112433.
- [50] J. X. Lin vd., "Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers", *Journal of Building Engineering*, c. 29, s. 101097, May. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2019.101097.
- [51] "Test Method for Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 1: General requirements", Ara.. 2016.
- [52] E. Özbay, M. Şahmaran, M. Lachemi, ve H. E. Yücel, "Self-Healing of Microcracks in High-Volume Fly-Ash- Incorporated Engineered Cementitious Composites", *Materials Journal*, c. 110, sy 1, ss. 33-44, Oca. 2013, doi: 10.14359/51684371.
- [53] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, ve T. C. Ling, "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review", *J Clean Prod*, c. 195, ss. 226-239, Eyl. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.

- [54] B. Prakash, T. J. Saravanan, K. I. S. A. Kabeer, ve K. Bisht, “Exploring the potential of waste marble powder as a sustainable substitute to cement in cement-based composites: A review”, *Constr Build Mater*, c. 401, s. 132887, Eki. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132887.
- [55] D. Zhang, B. Jaworska, H. Zhu, K. Dahlquist, ve V. C. Li, “Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3)”, *Cem Concr Compos*, c. 114, s. 103766, Kas. 2020, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103766.
- [56] N. Bheel vd., “Effect of calcined clay and marble dust powder as cementitious material on the mechanical properties and embodied carbon of high strength concrete by using RSM-based modelling”, *Heliyon*, c. 9, sy 4, s. e15029, Nis. 2023, doi: 10.1016/J.HELİYON.2023.E15029/ASSET/81C8A489-3DA8-412C-993F-BCC287FE0DBF/MAIN.ASSETS/GR8_LRG.JPG.

Özgeçmiş



Fatih YILDIZHAN

Lisans eğitimini 2017 yılında Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde, yüksek lisans eğitimini 2020 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalında tamamlamıştır. Şuan Gaziantep Üniversitesinde doktora yapmakta ve ulaştırma anabilim dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları kent içi ulaşım sistemleri, raylı sistem ve kompozit malzemelerdir.

E-Posta: fyildizhan@gantep.edu.tr



Hasan Erhan YÜCEL

Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. Aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı'nda 2007 yılında yüksek lisans, 2013 yılında doktora eğitimini tamamladı. Bu süreçte Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2013-2020 yıllarında Yardımcı Doçent, 2020-2024 yıllarında Doçent olarak görev yaptı. 2024 yılından beri Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nde Doçent olarak çalışmaktadır.

E-Posta: hasanerhan.yucel@mku.edu.tr



Mustafa GÜNAL

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1989 yılında mezun oldu. Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini UMIST and The Victoria University of Manchester'da tamamladı. 2012 yılından beri Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak çalışmaktadır.

E-Posta: gunal@gantep.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Fatih YILDIZHAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Görselleştirme, Kaynaklar. Hasan Erhan YÜCEL: Kontrol, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme. Mustafa GÜNAL: Kontrol, Doğrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme.