

Atık Lastik Ürünlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı Üzerine Bir Derleme Çalışması

Yaşar Vitoşoğlu¹

Tayfun Şengül²

Özet

Biyolojik olarak parçalanmadıklarından dolayı sayısı sürekli olarak artan atık lastikler ve bunların uygunsuz yönetimi küresel anlamda büyük bir çevre sorunudur. Çöplüklerde ve stok alanlarında depolanan atık lastikler, çevreye zehirli kimyasal maddeler sızdırırlar, sivrisinekler ve fareler için üreme alanı oluşturarak çeşitli hastalıklara yol açarlar ve söndürülmesi zor olan yangınların çıkmasını körüklerler. Dolayısıyla, bunların zemin, beton ve asfaltın modifikasyonunda kullanılması, bertarafı için iyi bir seçenek olabilir. Bu çalışma, çeşitli araştırmacılar tarafından granül kauçuk, lastik parlatma ürünleri, lastik parçaları, lastik yongaları ve toz kauçuk gibi farklı atık lastik formlarının çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımını araştırmak için gerçekleştirilen yayınlanmış çalışmaları derlemekte ve incelemektedir. Dolayısıyla, bu atıkların zemin stabilizasyonu, çimento ve asfalt betonlarının üretimi, karayolu ve demiryollarının inşası ve bakımı, akışkan dolgu üretimi ve sismik izolasyon sistemleri gibi farklı alanlarda değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların bazılarında bahsedilmektedir. Çalışma sonuçları, atık lastik ürünlerinin çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmasının ekonomik bir çözüm olabileceğini ve bunların bertaraf edilmesi için de iyi bir seçenek sunabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu konulara ilişkin geçmiş araştırmacılar tarafından yapılan yorumların pekiştirilmesi için daha fazla araştırma ve inceleme ihtiyacı olduğu düşünülmektedir.

- 1 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, yasar.vitosoglu@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-5543-9673.
- 2 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3473-7724.

1. Giriş

Son yıllarda, otomotiv endüstrisi nüfusun önemli ölçüde artması nedeniyle hızlı bir şekilde büyümüş ve lastik üretimi de o ölçüde artmıştır. Bu durum, dünya çapında büyük miktarlarda atık lastik üretimine sebep olmaktadır. 2010 yılı itibariyle her yıl yaklaşık bir milyar lastiğin kullanım ömrünün sonuna ulaştığı, 2030 yılına kadar ise beş milyar lastiğin düzenli olarak atılacağı tahmin edilmektedir (Pacheco-Torgal ve diğ. 2012). Çöplüklerde ve stok alanlarında depolanan atık lastiklerin sayısı hızla artmaktadır. Atık lastiklerin sayısının artması ve bunların geri dönüşümünde yaşanan zorluklar, bu malzemenin yönetimi konusunda artan bir endişe yaratmaktadır.

Atık lastiklerin artan sayısı ve uygunsuz yönetimi toplum için çeşitli risklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Dünyanın birçok yerinde atık lastik stokları bireyler için sağlık sorunlarına neden olmakta ve çevreye tehditler oluşturmaktadır. Dökülen atık lastikler, %80 oranında boşluk içeren sıkıştırılamaz bir madde olduklarından çöplüklerdeki arazinin önemli bir kısmını işgal etmektedir. Ayrıca, stoklandıkları alanları görsel olarak bozmaktadır. Stoklanmış lastikler, su geçirmez olduklarından büyük hacimdeki suyu uzun süre içerisinde tutabilmektedir. Bu durgun su, çeşitli hastalıklara yol açan sivrisineklerin ve farelerin üremesi için uygun bir ortam sağlamaktadır. Ayrıca, stoklanmış lastikler kolayca tutuşabildiklerinden çevreye ciddi zararlar veren yangınların çıkmasına sebep olarak havayı kirletmektedir. Sahajwalla (2018) çalışmasında, dünya genelinde her yıl %7-8 oranında lastiğin geri dönüştürüldüğünü, %10-15 oranında lastiğin enerji üretimi için yakıldığını ve kalan %75-80 oranında lastiğin ise stoklandığını veya çöplüklere atıldığını bildirmiştir.

Stoklanmış lastiklerin açık alanda yakılması birçok ciddi sağlık sorununu beraberinde getirmektedir. Azot oksit, kükürt dioksit, karbon monoksit ve diğer hidrokarbonlar gibi tehlikeli gazların açık havaya salınması, gözlerde tahrişe, ciltte kaşıntıya, moral bozukluğuna ve hatta kansere yol açabilmektedir. Lastiklerin yanma sırasında parçalanması, sızarak yer altı sularını kirletebilen arsenik, çinko, krom ve nikel gibi zararlı maddelerin oluşmasına yol açmaktadır. Zararlı etkisi nedeniyle, Kuzey Amerika ve Avrupa'daki birçok ülke, aşırı stokları ve depolama işlemlerini önlemek için bu atık ürünle ilgili katı kurallar ve düzenlemeler koymuş olup geri dönüştürülmesini zorunlu kılmıştır. Bu yaptırımların uygulanmasıyla araştırmacılara atık lastikler için sürdürülebilir önlemleri ve alternatif kullanımları keşfetme fırsatı sunulmuştur. İnşaat mühendisliğinde atık lastiklerin kullanım olanakları 30 yıldan fazla bir süredir araştırılmaktadır (Oikonomou ve Mavridou, 2009). Birtakım doğal kaynakların inşaat sektörü tarafından tüketilerek azaltılması,

yenilenemeyen malzemelere alternatif olarak bu sektörde hurda lastikler gibi geri dönüştürülebilir atık ürünlerin kullanımını teşvik etme yönündeki araştırma çabalarını da hızlandırmıştır (ASTM, 1998).

Atık lastiklerin granül kauçuk, lastik parlatma ürünleri, lastik parçaları, lastik yongaları, toz kauçuk ve karbon ürünleri gibi çeşitli nihai ürünlere dönüştürülmesi, bunların bertaraf edilmesi için başvurulan yollardan bazılarıdır. Hacimlerinin azalmasının bir sonucu olarak, bu nihai ürünler bütün lastiğe kıyasla çok daha az yer kaplamakta ve dolayısıyla taşıma maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. İşleme maliyetlerine rağmen, bu nihai ürünler özellikle geoteknik mühendisliği uygulamaları başta olmak üzere pek çok mühendislik uygulamalarında yaygın olarak değerlendirilmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden biri, bu ürünlerin düşük yoğunluk, düşük zemin basıncı, iyi yalıtım özellikleri, iyi drenaj kabiliyeti, uzun vadeli dayanıklılık ve yüksek sıkıştırılabilirlik gibi önemli olan birçok benzersiz özelliği sağlamalarıdır (Mashiri ve diğ., 2015). Ayrıca, bu nihai ürünlerin farklı endüstrilerde enerji üretimi için de kullanılmaları, son yıllarda önemli ölçüde artmıştır.

Bu çalışmanın odak noktası, atık lastik ürünlerinin çok çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması ile ilgili yürütülen güncel araştırmaları inceleyerek çevresel, ekonomik ve teknik faktörleri vurgulamaktır.

2. Beton Uygulamaları

Birçok araştırmacı, farklı amaçlar doğrultusunda atık lastiklerin beton üretiminde kullanılabilirliğini incelemiştir (Topcu ve Demir, 2009). Bu çalışmalarda, kauçuk katkılı betonun donma-çözülme ve klorür direnci, betonun basınç dayanımı ile ses bariyeri olarak kullanılabilirliği üzerine odaklanılmıştır.

2.1. Betonun Donma/Çözülme Direnci

Donma ve çözölmeye maruz kalan beton periyodik olarak genişleme ve büzölmeye uğrar. Bu durum, beton karışımı içinde çekme dayanımını aşan içsel gerilmelerin oluşmasına yol açar. Sonuç olarak, kopma, betonun çatlaması veya parçalanması şeklinde meydana gelir. Hurda lastiklerin geri dönüşümü, kauçuk ilave edilmiş beton üretimi için alternatif bir ince agrega kaynağı sağlar. Bu da betonun donma/çözölmeye direncinde önemli bir artış ile doğal kum ve çakıl kaynaklarını koruyarak çevrenin korunmasına katkıda bulunacaktır (Topcu ve Demir, 2007).

Han ve diğ. (2024), kauçuk ilave edilmiş betonun donma direncini araştırmıştır. Hızlı donma-çözölmeye döngüleri sırasında %1.0-%5.0 arasında

değişen oranlarda atık lastik kırıntı kauçuğu ilave edilmiş betonun donma-çözülme döngüsüne tabi tutulan numune için kütle kaybı oranı (W_n), bağıl dinamik elastik modülü (P_n), dinamik elastik modülü (E_{dm}) ve dinamik elastik modülünün bağıl değeri (XE_{dm}) gibi parametrelerin deneysel olarak belirlenip analiz edilmesi ile kırıntı kauçuğun betonun donma direncini etkilediği mekanizmalar açıklanmıştır. Kauçuk içeriği arttıkça durabilitede artış olduğu, buna karşın %3.0'ı aştığında düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. İlave olarak, kırıntı kauçuğunun ön işlenmesi donma direncini daha da artırmıştır. %3.0 kauçuk içeren beton numunelerin dayanım ömrü 275 donma-çözülme çevrimine ulaşmıştır. %2.0-4.0 oranında kırıntı kauçuğu içeren beton, kırıntı kauçuğun ön işlenmesiyle en az 25 çevrimlik bir artış göstermiş olup bu artış işlenmemiş kırıntı kauçuğu içeren betona kıyasla P_n 'de %5.9-17.9 oranında bir artış anlamına gelmektedir. Kırıntı kauçuğun eklenmesi betonun mezoskopik gözenek yapısını ve beton matris ara yüzünün bağlanma performansını değiştirmiş, dolayısıyla donma direncini ve hasar durumunu etkilemiştir. Ayrıca kauçuk ilave edilmiş betonun donma direncini değerlendirmede kullanılan dayanıklılık faktörünün belirlenmesine yönelik öneriler sunulmuştur.

Sun ve diğ. (2024), tarafından yürütülen bir çalışmada, ince agregayı ikame etmek için farklı boyut, içerik ve ön işlem yöntemlerine sahip hurda lastik kauçuk parçacıkları eklenerek toplam 25 grup kauçuk ilave edilmiş beton üretilmiş ve donma/çözülme döngüleri sırasında basınç dayanımları hem makro hem de mezo perspektiflerden incelenmiştir. Sonuçlar, donma/çözülme döngüleri sırasında kauçuk parçacıklarının varlığıyla beton dayanımındaki ve ağırlığındaki azalmanın önemli ölçüde sınırlandığını göstermiştir. Daha küçük parçacık boyutlarına sahip kauçuk ince agregası betonun donma direncini daha önemli ölçüde artırmış ve 1.0-2.0 mm kauçuk parçacıklarına sahip betonun F_{100} değeri, kauçuk içeriğinin %0.0'dan %5.6'ya çıkarılmasıyla %76.6'dan %86.5'e çıkmıştır. Kauçuk ince agregasının donma/çözülme döngüleri sırasında beton basınç dayanımı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu temelde, donma/çözülme döngülerinde kauçuk ilave edilmiş betonun basınç dayanımı için bir tahmin modeli önerilmiş ve kauçuk parçacıklarının parçacık boyutu, içeriği ve ön işleminin etkileri dikkate alınmıştır. Hesaplanan sonuçlar hem bu çalışmadaki hem de ilgili diğer çalışmalarda test sonuçlarıyla iyi bir şekilde örtüşmüş ve bu da modelin soğuk ortamlarda kauçuk ilave edilmiş betonun tasarımı ve mühendislik uygulaması için iyi bir referans sağlayabileceğini göstermiştir.

2.2. Klorür Dirençli (Asit Dirençli) Beton Karışımı

Beton ve donatı tasarım ömrü boyunca korozyona karşı hassas olduğundan betonun korozyona karşı dirençli olması istenir. Korozyon, periyodik ıslanma ve klorürlere maruz kalma durumunda şiddetlenir. Ayrıca, beton sülfürik asit saldırısı nedeniyle çok ciddi şekilde hasar görebilir. Dolayısıyla, bu faktörlere karşı direnç, bir yapının uzun ömürlü olmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Oikonomou ve Mavridou (2009), çimento harçlarında kumun kısmi bir ikamesi olarak lastik kauçuk granüllerinin ilave edilmesini deneysel olarak araştırdıkları çalışmada, kauçuk karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri incelenirken, klorür iyon penetrasyonuna karşı direnç ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, mekanik özelliklerde azalma olurken, klorür iyon penetrasyon direncinde artış olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, kumun kısmi bir ikamesi olarak lastik kauçuk granülleriyle modifiye edilmiş çimento bazlı harç ve beton ürünlerinin, mekanik özelliklerinin birinci derecede öneme sahip olmadığı ancak klorür iyon penetrasyonuna karşı yüksek direncin talep edildiği uygulamalarda kullanılabileceği anlamına gelmektedir.

Azevedo ve diğ. (2012) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, kumun kısmen lastik kauçuğu atıklarıyla ikame edilmesiyle yüksek performanslı betonun özellikleri ve dayanıklılığında meydana gelen değişiklikler hakkında sonuçlar sunmaktadır. Bu çalışmada, uçucu kül ve metakaolin, kısmi çimento yerine kullanılmış, dayanıklılık performansı, kılcal su emilimi ve sülfürik asit saldırısına karşı direnç yoluyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, uçucu kül ve metakaolin arasında kauçuk atığının kullanılmasıyla ilişkili mukavemet kaybını en aza indiren bir etkinin varlığını göstermektedir. Ayrıca %15'e kadar kauçuk atığı kullanmanın ve yine de asit saldırısına karşı yüksek bir direnç sağlamanın mümkün olduğunu göstermektedir. %45 uçucu kül ve %15 metakaolin içeren karışımların, kauçuk atık içeriğinden bağımsız olarak referans karışıma göre sülfürik asit saldırısına karşı çok daha yüksek bir direnç gösterdiği belirlenmiştir.

Onuaguluchi ve Panesar (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, silika dumanı kauçuk kırıntısı içeriğiyle birlikte bağlayıcı madde olarak kullanıldığında beton mukavemet kaybının ve klorür penetrasyonuna karşı direncin en aza indirilmesinde açık bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Bu tür beton karışımları, korozyona neden olan klorürler nedeniyle hızlandırılmış bozulmaya daha çok maruz kalan deniz ortamı yapıları için oldukça uygun olmaktadır.

Sinkhonde ve diğ. (2023), kaba agrega yerine lastik kauçuğun ve çimento yerine atık kil tuğla tozunun kullanıldığı, sülfürik aside maruz bırakılmış ve suda kürlenmiş beton karışımlarının özelliklerini karşılaştırmak için bir araştırma yapmıştır. 20, 25 ve 30 MPa beton sınıflarındaki küp ve silindirik numuneler, 27 günlük nemli kürlenmenin ardından 90 güne kadar %5 sülfürik asit çözeltisine daldırılmıştır. Diğer numuneler karşılaştırma amacıyla suda kürlenmiştir. Sülfürik aside maruz bırakılan tüm numunelerin, suda kürlenene ilgili numunelere göre 90 gün sonra basınç dayanımlarının %57'sinden fazlasını kaybettiği belirlenmiştir. Buna karşılık, sülfürik aside maruz bırakılan numunelerin yarmada çekme dayanımı kayıpları, suda kürlenene kıyasla hiçbir zaman %43.1'den fazla olmamıştır. Tüm koşullarda, %5 atık kil tuğla tozu içeren beton karışımlarının, geleneksel beton karışımlarına kıyasla basınç ve yarmada çekme dayanımlarında hafif iyileşmeler görülmüştür. Numuneler görsel olarak kontrol edildiğinde, suda kürlenene numunelere kıyasla sülfürik aside maruz bırakılan numunelerin dış katmanlarında pullu veya beyaz maddelerin biriktiği gözlenmiştir. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının, basınç dayanımlarına kıyasla sülfürik aside maruz bırakılma sonucunda ciddi şekilde etkilenmediği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada kauçuk ilave edilmiş betona atık kil tuğla tozunun eklenmesi, kauçuk ilave edilmiş betonun dayanım kayıplarını en aza indirmede etkili bir yöntem olarak sunulmuştur.

Lastik kauçuğu ile diğer beton bileşenleri arasındaki bağın azalması, kauçuk ilave edilmiş betonun ilave edilmemiş betonla karşılaştırıldığında mekanik özelliklerinin kötüleştiğini göstermektedir. Buna karşın kauçuk ilave edilmiş betonun asit direncini artırdığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuç asit saldırısını destekleyen durumlarda kauçuk ilave edilmiş betonların dayanım özelliklerinde bir miktar kayıp olmasına karşın tercih edilebileceği anlamına gelmektedir.

2.3. Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı

Köprüler, hidrolik yapılar ve yüksek katlı binalar gibi birçok yapıda yüksek dayanımlı betona talebin her geçen gün artması bu konuda yapılan araştırmalara olan ilgiyi artırmaktadır.

Atık kauçuğun geri dönüştürülmesi ve betonda doğal agrega yerine kullanılması, gelecek vaat eden çevre dostu bir çözümdür. Abdelmonem ve diğ. (2019), geri dönüştürülmüş kauçuğun yüksek dayanımlı betona eklenmesinin etkisine ilişkin yürüttükleri araştırmada, kauçuğun ince agreganın kısmen yerini aldığı yüksek dayanımlı betonun performansını değerlendirmiştir. Kırıntı kauçuğun, hacimce %0, %10, %20 ve %30'u oranlarında ince

agreganın kısmen yerini aldığı dört farklı karışım üretilmiştir. Çökme (slump), basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk, aşınma direnci, kauçuk ilave edilmiş beton üzerindeki deniz suyunun etkisi, darbe direnci ve mikroyapı analizi değerlendirilmiştir. Kauçuk ilave edilmiş beton karışımları, kontrol karışımına göre iyi işlenebilirlik ve biraz daha düşük yoğunluk göstermiştir. Kauçuk içeriğinin %30'a kadar artırılmasıyla basınç, çekme ve eğilme dayanımında neredeyse %50'ye varan sistematik bir azalma görülmüştür. Kauçuk içeriğinin artırılmasıyla daha düşük aşınma direnci elde edilmiştir. Ayrıca, kauçuk ilave edilmiş beton karışımları deniz suyuyla iyi performans gösterirken kontrol karışımına kıyasla %83'e kadar daha yüksek darbe direnci sağlamıştır.

Moustafa ve ElGawady (2015), yüksek dayanımlı betonda hurda lastik kullanımının hem mekanik hem de dinamik özellikler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, iki farklı kauçuk ilave edilmiş beton karışımı tasarlanmıştır. Çökmenin (slump) değişken olduğu deney grubu kauçuğun kumun yerine kullanılmasının betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisini belirlemek, çökmenin sabit olduğu diğer deney grubu ise işlenebilirliği aynı tutmak için tasarlanmıştır. Betonun basınç dayanımı, çökmenin sabit olduğu deney grubu ile karşılaştırıldığında, çökmenin değişken olduğu deneylerde daha yüksek dayanım kaybı meydana gelerek kauçuk kullanımıyla azaltılmıştır. Bu çalışmada viskoz sönümleme oranı, basit mesnetli kirişler üzerinde darbeli çekişle yapılan serbest titreşim testleri kullanılarak ayrıca araştırılmıştır. Kumun %30'a kadar kauçukla değiştirilmesi, çökmenin sabit olduğu durum kirişlerinde daha fazla olmak üzere sönümlemede bir artışa neden olmuştur. Döngüsel yükleme altındaki silindirler için histerezis sönümlemesi de araştırılmış ve ortalama histerezis sönümlemesinin arttığı bulunmuştur.

Sofi (2017), %0-12.5 kauçuk kırıntısı içeren numuneler için 90 günde 60 MPa basınç dayanımına ulaşıldığını rapor etmiştir. Yüksek dayanımlı betonda kauçuk kırıntısının artan oranlarında, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları daha ciddi şekilde etkilenebilmektedir. %12.5 oranında kauçuk kırıntısı eklendiğinde, 7 ve 28 günlük dayanımlar sırasıyla 44.5 MPa ve 54.8 MPa'ya düşmüştür. Bu değerler, %0 katkı ile elde edilen basınç dayanımlarının %67.9'unu ve %77.2'sini temsil etmektedir. Daha ileri deneyler, kontrol karışımlarının gevrek kırılmasını ve kauçuk ilave edilmiş numunelerin gevrek olmayan kırılmasını göstermiş ve kauçuk kırıntısı ince agrega yerine kısmen ikame edildiğinde sünek yapıda bir artış olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, basınç dayanımına benzer şekilde, eğilmede çekme dayanımının da kauçuk içeriği arttıkça azaldığı görülmüştür. Kauçuk kırıntısı ikamesinin eğilmede çekme sonuçları üzerindeki etkisi daha az şiddetli olup 7 ve 28 günde %12.5 kauçuk kırıntısı ilave edilmiş numuneler sırasıyla 5.2 MPa ve

6.6 MPa dayanım değeri vermiştir. Bu değerlerin, %0 ikame numunelerine kıyasla eğilme çekme dayanımının %83.9 ve %84.7'sine karşılık geldiği belirtilmiştir.

2.4. Ses Bariyerleri / Sönümleyiciler

Kentsel alanlarda gürültü kirliliğinin azaltılmasını sağlamak için ses bariyerleri kullanılmaktadır. Çok büyük miktarlarda ses bariyerlerine ihtiyaç duyulması bu bariyerlerin yapımına yönelik maliyetleri azaltmak için ses bariyerlerinde atık kauçuk beton karışımlarının kullanılmasına yönelik araştırmaların yapılmasını teşvik etmektedir.

Holmes ve diğ. (2014) tarafından yürütülen bir çalışmada, düşük (63, 125, 250 ve 500 Hz) ve yüksek (1000, 2000, 4000 ve 5000 Hz) frekanslarda ses emilimi ve yalıtımı açısından küçük ölçekli kırıntı kauçuk eklenmiş beton panellerin akustik performansı araştırılmıştır. Donma ve ısıtma işlemlerinden sonra dört farklı derecede kırıntı kauçuğun farklı seviyelerde (%7.5 ve %15) ince agrega yerine ikame edilmesi suretiyle akustik testler gerçekleştirilmiştir.

Kauçuk eklenmiş beton panellerin özellikle daha yüksek oranlarda (%15) ve kırıntı kauçuk sınıflarında ses emilimi açısından iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Donma ve ısıtmanın etkilerinin yalıtım özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, tüm betonlar için yalıtım performansının yüksek frekanslarda iyileştiği belirlenmiştir.

Ayrıca kauçuk eklenmiş beton panellerinin yüksek katlı kentsel yapıların etrafındaki sesi emmek için harici bir bina kaplaması olarak potansiyeli olduğu ancak sahada tam ölçekli testlerin yapılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu yöntem atık lastiklerin devam eden sorununa çevre dostu bir çözüm olabilir.

3. Geoteknik Uygulamalar

Atık kauçuk gibi hafif malzemeler, birçok arzu edilen özelliğe sahip olduklarından geoteknik uygulamalarda kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

3.1. Zemin Stabilizasyonu

Son yıllarda, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından, çeşitli atık maddelerin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği giderek daha fazla önem kazanmaktadır. İstenilen mühendislik özelliklerine sahip olmayan zeminlerin farklı atıklar kullanılarak iyileştirilmesi ekonomik bir çözüm sunarken depolama maliyetleri çok yüksek ve çevre açısından zararlı etkileri

olan bu atıkların bu yöntemle bertaraf edilmesi de çevresel sürdürülebilirlik açısından oldukça önem arz etmektedir.

Zeminlerde lastik türevi ürünlerin kullanımı son zamanlarda çok sayıda çalışmanın konusu olmuş olup kauçuk-zemin karışımlarının davranışsal özelliklerinin standart zeminlerle karşılaştırılmasına büyük önem verilmektedir (Topçu ve Seyrek, 2022).

Gücek ve diğ. (2024), yol üst yapılarının tasarımı ve inşası için temel parametreleri belirlemek ve taban zeminini hibrit atık malzemelerle iyileştirmenin yol inşaatının sürdürülebilirliğine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Mekanik ve fiziksel özellikler, optimum karışımları belirlemek için ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, atık cam tozu ve kauçuk lastik kombinasyonu için en etkili karışımın, zeminin kuru ağırlığına göre %20 cam tozu ve %3 kauçuk lastik içerdiğini göstermiştir. Atık cam tozu ve lignin (odun özü) kombinasyonu için optimum karışım, zeminin kuru ağırlığına göre %15 cam tozu ve %15 ligninden oluşmuştur. Bu sonuçlar, yol inşaatı projelerinde zemin stabilizasyonu için atık malzemelerin sürdürülebilir kullanımına ilişkin değerli bilgiler sağlamıştır.

Al-Neami (2018), zemin stabilizasyonunda kullanılan geleneksel katkıları yerine farklı yüzdelerde atık lastik parçaları kullanarak kumlu zemini iyileştirmek için yürüttüğü çalışmada, zemin ve lastik parçalarından oluşan kompozit numunelerin bazı geoteknik özelliklerini incelemiştir. Kumun kayma mukavemetindeki artış, hurda lastik parçaları kullanılarak kumun etkili bir şekilde stabilize edilebileceğini doğrulamıştır. Düşük birim ağırlığından dolayı kumdaki lastik parçaları içeriğinin artmasıyla, özgül ağırlıkta ve maksimum kuru yoğunlukta önemli bir azalma ve optimum nem içeriğinde küçük bir azalma görülmüştür. CBR testinden elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, lastik parçalarıyla stabilize edilmiş kumun CBR değerinin, saf kuma kıyasla yaklaşık 1.6 kat daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç kum parçacıkları ile lastik parçaları arasındaki fiziksel bağların artması nedeniyle işlenmiş kumun yük taşıma kapasitesinin arttığı anlamına gelmektedir.

Priyadarshee ve diğ. (2014), farklı lastik kırıntısı ve uçucu kül içerikleriyle stabilize edilmiş kaolin kil zeminlerin sıkışma ve mukavemet davranışını belirlemiştir. Lastik kırıntısı ve uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin sıkışma özellikleri, uçucu kül ve lastik kırıntısı içeriğindeki artışın zeminin maksimum kuru yoğunluğunda bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Öte yandan, uçucu kül ve lastik kırıntısı aralığındaki artış, optimum nem içeriğinde bir artışa yol açmaktadır. Çalışmada, maksimum taşıma kapasitesine %20

uçucu kül ve %5 lastik kırıntısı oranı ile ulaşılmışından dolayı kaolin kilinin stabilizasyonu için optimum seviyeler olarak önerilmiştir.

3.2. Yol Üst Yapısı Malzemeleri

Atık lastik kauçuğunun asfalt kaplamada ve yol üst yapısının diğer tabakalarında kullanılmasına yönelik çeşitli araştırmalar yürütülmekte ve başarılı sonuçlar alınmaktadır.

Tahamia ve diğ. (2019), asfalt karışımlarında dolgu maddesi olarak yüksek içerikli kırıntı kauçuk tozu kullanımını araştırmışlardır. Karışımların geleneksel dolgusu, dolgu ağırlığına göre %20, %40 ve %60 oranlarında kırıntı kauçuk tozu ile değiştirilmiş ve nem duyarlılığı, sertlik modülü, tekerlek izi performansı ve yorulma ömrü dahil olmak üzere modifiye karışımların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, asfalt karışımına kürlenme işlemi ve çok ince kırıntı kauçuk tozunun aynı anda uygulanmasının, asfalt karışımlarının bozulmalara karşı direncini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. İlave olarak, yüksek kırıntı kauçuk tozu içerikli karışımların performansının zayıflamasının bu kürlenme işlemi ile iyileştirilebileceği düşünülmüştür.

Huang ve diğ. (2024), asfaltın modifikasyonu ve ikamesi için atık lastik kauçuğunu, atık yüksek yoğunluklu polietileni ve stiren-bütadien-stireni (SBS) birlikte kullandıkları çalışmalarında, yüksek sıcaklık kararlılığı, düşük sıcaklık çatlak direnci, su kararlılığı, yorulma direnci ve yaşlanma direnci dahil olmak üzere çeşitli yol kaplama özellikleri üzerinde performans değerlendirmeleri yapmıştır. Sonuçlar, atık lastik kauçuğu ilavesinin karışımın elastik özelliklerini ve yorulma direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini, atık yüksek yoğunluklu polietilen ilavesinin ise yüksek sıcaklık kararlılığını ve yaşlanma direncini artırdığını göstermiştir. Uygun oranlarla tasarlanan stiren-bütadien-stiren, atık yüksek yoğunluklu polietilen, atık lastik kauçuğu asfalt karışımları üstün yüksek sıcaklık kararlılığı, düşük sıcaklık çatlak direnci ve yorulma direnci sergilemiştir. Bu nedenle, bu atık malzemelerin asfalt karışımlarında kullanılmasının inşaat sektörü için sürdürülebilir ve çevre dostu bir çözüm olduğu düşünülmektedir.

Arulrajah ve diğ. (2019), üç farklı boyutta ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında lastik türevi agregalarla karıştırılmış geri dönüştürülmüş beton agregalarının, yol üst yapısı alt temellerinin inşasında kullanımı için geoteknik uygunluklarını araştırmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregası-lastik türevi agrega karışımlarının geoteknik özellikleri dane boyutu dağılımı, pH, plastisite indisi, yabancı madde içeriği, modifiye Proctor sıkıştırma oranı, Kaliforniya taşıma oranı ve esnek deformasyonun ölçümü de dahil olmak üzere tekrarlı

yüklemeli üç eksenli basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregası-lastik türevi agrega karışımlarının tekrarlayan yükleme altında gelişmiş deneysel kalıcı esnek deformasyonu ve esneklik modülü, yol üst yapısı alt temel uygulamalarında uygulanabilirliğini doğrulamıştır. Lastik türevi agregaların küçük bir yüzdesinin bile kullanılmasının, bu atık malzemelerin nispeten büyük bir miktarını çöplüklerden uzaklaştırıp sürdürülebilir yol üst yapısı inşaatına yönlendireceği düşünülmektedir.

3.3. Dolgu Malzemesi

İnşaatta kullanılan dolgu malzemesi, boşluklu malzemenin boşluklarını doldurmak ve mevcut zayıf zeminin koşullarını iyileştirmek olmak üzere iki ana amaca hizmet eder. Geleneksel dolgu malzemesi genellikle ticari kum ve çakıl ocaklarından çıkarılır ve granüler haldeki bu malzeme, güvenli zemin koşullarını sağlamak için belirli miktarda sıkıştırılır. Bazı durumlarda, geleneksel granüler dolgu malzemesi çimento, su, uçucu kül ve atık kauçuk gibi katkı maddeleriyle karıştırılarak özellikleri iyileştirilebilir.

Contreras-Marín ve diğ. (2021), atık lastiklerden elde edilen kauçuk granüllerinin istinat duvarlarında hafif dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi üzerine yürüttükleri çalışmada, kauçuk granüllerinin istinat duvarlarının arkasında dolgu malzemesi olarak büyük bir potansiyele sahip olduğunu ve kum gibi geleneksel bir dolgu malzemesine göre sonuçların daha iyi olduğunu belirlemiştir.

Çetin ve diğ. (2006), saf ince ve iri taneli lastik parçalarının ve bunların kohezyonlu killi zeminle karışımlarının (%10, 20, 30, 40 ve 50) hafif dolgu malzemesi olarak kullanımı üzerine deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Killi zemin ve ince ve iri lastik parçalarının killi zemin karışımları üzerinde dane boyutu dağılımı, Atterberg limitleri, geçirgenlik, direkt kesme ve sıkıştırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kullanılmış lastik parçalarının killi zeminlerle karıştırılarak dolgu malzemesi olarak kullanılmasının mümkün olduğu belirlenmiştir. %20'ye kadar iri daneli lastik parçaları ve %30'a kadar ince daneli lastik parçaları karışımlarının düşük ağırlık, düşük geçirgenlik ve yüksek mukavemetin gerekli olduğu, özellikle düşük taşıma kapasiteli ve yüksek oturma sorunları olan zayıf zeminler üzerine inşa edilecekleri otoyol dolguları, köprü ayakları ve istinat yapılarının arkasındaki dolgular gibi dolgularda yer altı su seviyelerinin üstünde kullanılabileceği belirlenmiştir. Doygun koşullar altında dolguların yüklenmesi sırasında boşluk suyu basınçlarının gelişmesini önlemek için drenajın gerekli olduğu yerlerde kullanılmaması gerektiği, ancak bu

durumlarda, kum ve çakıl gibi yüksek geçirgenliğe sahip malzemelerle karıştırılarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

3.4. Sismik İzolasyon Sistemleri

Sismik aktivite, özellikle tektonik plakaların kenarlarına yakın olan ülkeler için önemli bir sorundur. Depremler çok büyük yıkımlara sebep olduklarından, deprem yüklerine dayanabilen yapı bileşenleri tasarlamak, birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Genellikle kesme duvarları ve çapraz destek elemanlarından oluşan bu bileşenler, ilgili yapı kodları ve standartlarında belirtilmektedir. Bu bileşenleri tamamlayan sistemler ise, sismik izolasyon sistemleri olarak bilinmekte olup zeminde sismik aktiviteden kaynaklanan yatay hareketi stabilize ederek bunun yapı üzerindeki etkisini azaltmaktadır. Sismik izolasyon sistemlerinin yüksek maliyetli olması araştırmacıları farklı alternatifler üretmeye teşvik etmektedir.

Raj ve Suppiah (2021) tarafından yürütülen bir çalışmada, hurda lastik kauçuk ped yataklarla temeli izole edilmiş üç katlı bir kesme çerçevesi analiz edilmiştir. Bu yapının tepkisi, izolasyonsuz sabit bir tabanı olan aynı yapının tepkisiyle karşılaştırılmıştır. Her iki durumda da doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmış, taban izolasyonunun temel titreşim modunda çok etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang ve Zhang (2023), sismik izolatör olarak 90 hurda lastik pedi tasarlamış ve bir dizi basınç ve kesme deneyi yapmıştır. Deneysel sonuçlar, hurda lastik pedlerinin düşey sertliğinin şekil faktörü ve yüzey basıncının artmasıyla arttığını, lastik tipi, şekil faktörü, yüzey basıncı ve yer değiştirme genliklerinin ise yatay eşdeğer sertlik ve sönümleme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Hurda lastik pedlerinin kullanılmasıyla izole yapının tepe ivmelerinin, katlar arası kaymalarının ve kesme kuvvetinin sabit tabanlı binanın yanıtına kıyasla sırasıyla %56.6, %30.0 ve %26,6 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Ho Tsang ve diğ. (2010), altyapı koruma uygulamalarında hurda lastik parçacıklarının zemin malzemeleriyle karıştırılmasını ve titreşim emilimi için karışımların inşaat mühendisliği sistemlerinin etrafına yerleştirilmesini içeren yeni bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntemin ucuz olması, altyapı koruması için pahalı kaynakların ve son teknolojinin kullanımında finansman sorunları yaşayan gelişmekte olan ülkeler için büyük faydalar sağlayabilir. Bu çalışmada enerjiyi dağıtma ve titreşimleri kontrol etme yeteneği açısından kauçuk-zemin karışımlarının etkinliğini ölçmek için geleneksel zemin-yapı etkileşimi analiz tekniklerini kullanarak, önerilen yöntemin depremde düşük ve orta yükseklikteki binaları koruma yöntemi

olarak etkinliğini ve sağlamlığını göstermek için potansiyeli olduğu sayısal modelleme ile gösterilmiştir.

3.5. Demiryolu Alt Balast Katmanları

Demiryolu traversleri için yatak teşkil eden balast tabakası, genellikle iri agregadan oluşur. Balast tabakası yükleri taşımak, su drenajını kolaylaştırmak ve alttaki bitki örtüsünün yüzeye çıkmasını önlemek gibi çeşitli işlevlere sahiptir. Bu tabakanın altında ise, daha küçük agregalardan oluşan ve üstteki balast tabakasına destek sağlayan alt balast tabakası yer alır.

Kauçuk lastikler üç boyutlu silindirik bir yapıya sahip olup taşıma kapasitesini artırarak ve çökmeyi azaltarak temelleri stabilize etmek için kullanılabilir. Bu nedenle, demiryolu mühendisliğinde kauçuk lastiklerle güçlendirilmiş bir kaplama tabakasının granüler tabaka formundaki balastın kalınlığını azaltmaya, hat taşıma kapasitesini iyileştirmeye ve bakım sıklığını azaltmaya yardımcı olabileceği düşünülmektedir. Buna karşın, kauçuk lastikle güçlendirilmiş temellerin mekanizmalarına ilişkin kavramsal teoriler ve gerçek yaşam uygulamaları arasında dikkate değer bir boşluk vardır (Indraratna ve diğ., 2017).

Indraratna ve diğ., (2017), yol mühendisliğinde taşıma kapasitesinin plaka yükleme deneyleriyle yakından ilişkili olduğu düşüncesiyle yürüttükleri bir araştırmada, alt balast malzemesiyle doldurulmuş ve düşey yüke tabi tutulmuş tek bir lastik üzerinde plaka yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu deney, lastik ile granüler ortam arasındaki etkileşimi incelemek ve ölçmek için Sonlu Elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre, kauçuk lastiğin granüler tabakanın modülünü ve nihai taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceği belirlenmiştir.

3.6. Tüm Lastik Dolguları

Tüm lastikler, lastik balyaları, parçalar, talaşlar ve kırıntı kauçuklar dahil olmak üzere atık lastiklerden elde edilen ürünler, çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Kauçuk lastik parçaları veya kırıntıları yerine, tüm lastiklerin dolgu olarak kullanılması, tüm lastiklerin enerji ve işgücü harcanarak parçalanmasına olan gereksinimi azaltabilir. Bu sonuç inşaat mühendisliği uygulamalarında ekonomikliğin sağlamlarının yanında atık yönetimini daha kolay hale getirebilir.

Sıkıştırılmış zeminle doldurulmuş ömrünü tamamlamış tüm lastikler, önemli yük taşıma kapasitesine sahip segmental lastik kaplı zemin elemanları oluşturabilir. Bu zemin elemanları, alçak binalar, demiryolu temelleri ve

geoteknik yapılar gibi çeşitli yapıların inşasında kullanılabilir (Xu ve diğ. 2022).

Zayıf zemin üzerine inşa edilmiş geri dönüştürülmüş kauçuk lastik takviyeli granüler dolgu üzerine yerleştirilen rijit dairesel temelin gerilme-şekil değiştirme davranışını belirlemek için Geçkil ve diğ. (2022) tarafından yürütülen bir çalışmada, doğal agregalar veya inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile inşa edilmiş takviyeli/takviyesiz granüler dolgu üzerinde model plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Takviye için kullanılan kauçuk lastik, hizmet ömrünü tamamlayarak atık malzeme haline gelmiş ancak tipik silindirik şeklini korumuştur. Model plaka yükleme deneylerinde, granüler dolguların, dolgu malzemesinin türünün ve granüler dolgulardaki tüm kauçuk lastik ve/veya geotekstilin yerleştirilmesinin etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, kauçuk lastik ve/veya geotekstil ile takviye edilerek taşıma kapasitesinin artırıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, taşıma kapasitesindeki en yüksek artışın granüler dolgunun kauçuk lastiğin yanında geotekstil ile takviye edilmesi durumunda meydana geldiği belirlenmiştir. Geotekstil ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile doğal agrega dolguları kauçuk lastikle birlikte zayıf zeminlerin taşıma kapasitesini %5 deformasyon oranı için sırasıyla 6.6 ve 8.5 kat artırmıştır. Öte yandan, doğal agregalar ile inşa edilmiş dolgunun taşıma kapasitesinin inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile inşa edilmiş dolgudan daha yüksek olmasına rağmen, güçlendirilmiş inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile inşa edilmiş dolgunun taşıma kapasitesinin doğal agregalar ile inşa edilmiş dolgununkine yaklaştığı bildirilmiştir.

Xu ve diğ. (2022) tarafından tüm lastik kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma, segmental lastik kaplı zemin elemanlarının yapım şekline kıyasla, kapalı zemin tipinin segmental lastik kaplı zemin elemanlarının katmanları arasındaki arayüz etkileşimleri üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, sürtünme katsayısının, ya kapalı zemin olarak iri ve köşeli agregalar kullanılması ya da kapalı zemin miktarının azaltılarak kompozit ara yüzünde yüksek oranda kauçuk-kauçuk temasının oluşturulması suretiyle artırılacağı bulunmuştur. Ayrıca tüm lastiklerin inşaat malzemesi olarak kullanılmasının düşük CO₂ emisyonuna ve önemli ekonomik faydalara sebep olduğu belirlenmiştir.

Duda ve Siwowski (2022), yumuşak zemin koşullarında lastik balyası uygulamasının verimliliğini değerlendirmek için kumlu kil ve siltli kil olmak üzere iki taban zeminini dikkate alarak yürüttükleri çalışmada, tüm yapısal durumlar için dolguların stabilite ve oturma analizi ile taban zemininin taşıma kapasitesi kontrolünü yapmıştır. Sonuçlar, lastik balyalarının uygulanmasının genellikle dolgu stabilitesini artırdığını, dolgu oturmasını

etkili bir şekilde azalttığını ve taban zeminindeki normal gerilmeyi azalttığını ortaya koymuştur. Lastik balyalarıyla yapılmış dolgularda, kayma yüzeyinin çoğunlukla dolgu eğimi içinde yer aldığı ve taban zemini koşullarından bağımsız olarak iyi bir devrilme stabilitesi gösterdiği belirlenmiştir.

4. Sonuçlar

Atık lastiklerin geri dönüştürülmesi, ilk defa kavramsallaştırılmasından bu yana büyük bir gelişme kaydetmiştir. Çevre bilincinin artması ve sürdürülebilirliğe yönelik zihniyetin değişmesi bu süreci hızlandırmaya devam etmektedir. Geri dönüştürülmüş lastiklerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması ile aşırı stokları azaltmak, faydalı kullanım sağlamak ve doğal kaynakları korumak üzere üç ana hedefe ulaşılabilir. Bu çalışmada, atık lastik ürünlerinin inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarındaki uygulamalarına ilişkin kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Atık lastik ürünlerinin betonda, yol yapım malzemelerinde ve zemin stabilizasyonunda farklı amaçlar için kullanıldığında birçok araştırmacı tarafından olumlu sonuçlar elde edildiği rapor edilmiştir. Atık lastik türevi ürünlerin inşaat mühendisliğinin farklı alanlarındaki projelerde kullanılmasının bertarafı için uygun maliyetli ve çevre dostu bir yöntem olduğu düşünülmesine karşın, bu atıklarla üretilen ürünlerin uzun dönem performansları hakkında bilgiler oldukça kısıtlıdır. Ayrıca atık lastik türevi veya diğer atık ürünlerin yeniden kullanımı düşünüldüğünde kimyasal bileşimi ve toksisitesi nedeniyle ağır metal sızıntısı birincil endişe kaynağıdır ve daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- Abdelmonem. A., El-Feky. M.S., Nasr. A.R., Kohail, M., (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber, *Construction and Building Materials*, 227, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>.
- Al-Neami, M.A., (2018). Stabilization of sandy soil using recycle waste tire chips, *International Journal of GEOMATE*, 15, 48, 175-180, <https://doi.org/10.21660/2018.48.180228>
- Arulrajah. A., Mohammadinia. A., Maghool. F., Horpibulsuk. S., (2019). Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications. *Journal of Cleaner Production*, 230, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.084>.
- ASTM, (1998). *Standard Practice for the Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*. West Conshohocken. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., Barroso de Aguiar, J.L., Camões, A.F., (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes, *Construction and Building Materials* 34 186-191.
- Cetin. H., Fener. M., Gunaydin. O., (2006). Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material, *Engineering Geology*, 88, 110-120
- Contreras-Marín, E., Anguita-García, M., Alonso-Guzmán, E. M., Jaramillo-Morilla, A., Mascort-Albea, E. J., Romero-Hernández, R., & Soriano-Cuesta, C. (2021). Use of Granulated Rubber Tyre Waste as Lightweight Backfill Material for Retaining Walls. *Applied Sciences*, 11(13), 6159. <https://doi.org/10.3390/app11136159>
- Duda, A., Siwowski, T.W., (2022). Stability and Settlement Analysis of a Lightweight Embankment Filled with Waste Tyre Bales over Soft Ground. *Transp. Infrastruct. Geotech.* 9, 467-491. <https://doi.org/10.1007/s40515-021-00184-5>
- Geçkil, T., Sarici, T. Ok, B., (2022). Model studies on recycled whole rubber tyre reinforced granular fillings on weak soil, *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 21(2), 264-280. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.2.264>
- Gücek, S., Gürer, C., Zlender, B., Taciroğlu, M.V., Korkmaz, B.E., Gürkan, K., Braňcko, T., Macuh, B., Varga, R., Jelušić, P., (2024). Use of Lignin, Waste Tire Rubber, and Waste Glass for Soil Stabilization, *Appl. Sci.* 14, 7532. <https://doi.org/10.3390/app14177532>
- Han. X., Ding. N., Chen. A., Wang. Z., Xu. Y., Feng. L., Ji. Y., Li. K., Jing. J., Sun. S., Zhang. Q., (2024). Experimental study on freeze-thaw failure of concrete incorporating waste tire crumb rubber and analytical evaluation

- of frost resistance, *Construction and Building Materials*, 439, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137356>.
- Holmes. N., Browne. A., Montague. C., (2014). Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, *Construction and Building Materials*, 73, 195-204.
- Ho Tsang, H., Lam, N.T.K., Sabegh, S.Y., Sheikh, M.N., Indraratna, B., (2010). Geotechnical Seismic Isolation by Scrap Tire-Soil Mixtures, 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Huang. J., Yan. K., Wang. M., Shi. K., Li. Y., Zhang. Y., (2024). Performance evaluation of SBS-modified asphalt mixtures incorporating waste tire rubber and HDPE, *Construction and Building Materials*, 430, 136423
- Indraratna, B., Sun Q., Grant. J., (2017). Behaviour of Subballast Reinforced with Used Tyre and potential application in rail tracks, *Transportation Geotechnics*, 12, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.006>
- Mashiri, M.S., Vinod, J.S., Sheikh, M.N., Tsang, H.-H., (2015). Shear strength and dilatancy behaviour of sand-tyre chip mixtures. *Soils Found.* 55, 517-528.
- Moustafa. A., ElGawady. M.A., (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber, *Construction and Building Materials*, 93, 249-256.
- Oikonomou, N., Mavridou, S., (2009). The use of waste tyre rubber in civil engineering works. *Sustainability of Construction Materials* 9, 213-238.
- Oikonomou, N., Mavridou. S., (2009). Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires, *Cement & Concrete Composites* 31 403-407.
- Onuaguluchi, O., Panesar, D.K., (2014). Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production* 82, 125-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.068>
- Pacheco-Torgal F, Ding Y, Jalali S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. *Construct Build Mater*,30,714-24.
- Priyadarshree A., Kumar A., Gupta D., Pushkarna P., (2014). *J. Mater. Civ. Eng.* 30(4) 1-9.
- Raj. J.C.J., Suppiah S. (2021). Seismic isolation using scrap tire rubber pads, *Materials Today: Proceedings* 43, 1404-1407.
- Sahajwalla, (2018). Turning waste tyre into 'green steel.'

- Sinkhonde, D., Onchiri, R.O., Oyawa, W.O., Mwero, J.N. (2023). Properties of concrete mixes containing tire rubber and brick powder exposed to sulfuric acid and cured in water: A comparative study. *Heliyon*, 9(6).
- Sofi, A., (2017). Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete a review. *Ain Shams Eng. J.* <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.007>.
- Sun, S., Han, X., Chen, A., Zhang, Q., Wang, Z., Li, K. (2023). Experimental analysis and evaluation of the compressive strength of rubberized concrete during freeze-thaw cycles. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17-28. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00592-6>
- Tahamia S.A., Mirhosseinib. A.F., Dessoukya. S., Morkb. H., Kavussic. A., (2019). The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process, *Construction and Building Materials*, 222, 643-653.
- Topcu. İ.B., Demir. A., (2007). Durability of Rubberized Mortar and Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 173-178., Doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(173)
- Topcu. İ.B., Demir. A., (2009). Farklı Çimentolarla Üretilen Lastik Agregalı Harçların Bazı Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 12(3), 201-206., Doi: 10.2339/2009.12.3
- Topçu, S., Seyrek, E., (2022). Evaluation of geotechnical behavior of clay soil with crumb rubber addition, *Journal of Scientific Reports-A*, Number 51, 136-148.
- Xu, Y., Zhuge, Y., Rahman, M.M., Karim, M.R., Hassanli, R., Luo, L., & Freney, M. (2022). Investigation on Civil Engineering Application of Tyre Encased Soil Element: Laboratory Direct Shear Test and Supply Chain Analysis. *Sustainability*, 14(22), 14852. <https://doi.org/10.3390/su142214852>
- Wang, M., Zhang, G., (2023). A low-cost isolator of scrap tire pads in rural construction: Evaluation of the mechanical properties and numerical assessment of the response control effects, *Journal of Building Engineering*, 67. 105996.