**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGA VE ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN İNŞAAT SEKTÖRÜNDE KULLANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Arş. Gör. Dilan Çankal1\*, Prof. Dr. Ali Uğur Öztürk1

1 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**ÖZET**

Dünya nüfusunun ve endüstriyel üretimin hızla artması nedeniyle doğal hammadde kaynaklarımız gittikçe tükenmektedir. Endüstriyel gelişimle beraber aynı zamanda endüstrilerden kaynaklanan atıklar da önemli ölçüde artmaktadır. Çok çeşitli atıklar geri dönüştürülebilmekte, hammadde veya yan ürün olarak kullanılıp yeni bir üretim sürecine dahil edilebilmektedir. İnşaat sektörü, onu destekleyen alt malzeme sektörleri ile birlikte doğal kaynakların en büyük küresel sömürücülerinden biridir. İnşaat sektörü içerisinde çevresel açıdan en zararlı etki sınıfında üretim süreçlerine sahip olan yapı malzemesi şüphesiz betondur. Betonda kullanılan çimentonun üretimi ve agreganın temini için gerekli maden faaliyetleri çevreye oldukça zarar vermektedir. Beton üretiminde bağlayıcı olarak çimentoya ikame edilebilen endüstriyel atıklar ve agrega olarak da geri dönüştürülmüş agregaların kullanımı sürdürülebilirlik açısından oldukça faydalıdır. Çalışma kapsamında, inşaat sektöründe geri dönüştürülmüş agrega, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların beton üretiminde bir hammadde kaynağı olarak kullanılmasının teknik özellikleri de göz önünde bulundurularak ekolojik faydalarının değerlendirilmesi yapılacaktır. Bahsedilen atık malzemelerin faydalı geri kazanım yöntemleri ile tekrar kullanılabilirliğinin değerlendirildiği bu çalışmada, beton üretiminde atıkların birlikte kullanımı da değerlendirilmiştir. Atıkların beraber betonun üretim sürecine dahil edilmesi ile birlikte çevresel, ekonomik ve teknik açıdan çok önemli faydalar elde edilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstriyel Atık, Geri Dönüştürülmüş Agrega, Atık Kullanımı, Geri dönüşüm

**EVALUATION OF THE USE OF RECYCLED AGGREGATE AND INDUSTRIAL WASTES IN THE CONSTRUCTION SECTOR**

**ABSTRACT**

Due to the rapid increase in the world population and industrial production, our natural raw material resources are increasingly depleted. With industrial development, waste from industries is also increasing significantly. A wide variety of wastes can be recycled, used as raw materials or by-products and included in a new production process. The construction industry is one of the largest global exploiters of natural resources, with the sub-material industries supporting it. The building material, which has the most environmentally harmful production processes in the construction sector, is undoubtedly concrete. The mining activities required for the production of cement used in concrete and the supply of aggregate cause considerable damage to the environment. The use of industrial wastes that can be substituted into cement as binders in concrete production and recycled aggregates as aggregates are very beneficial in terms of sustainability. Within the scope of the study, the ecological benefits of using industrial wastes such as recycled aggregate, fly ash and blast furnace slag as a raw material source in concrete production will be evaluated, taking into account the technical characteristics of the construction industry. In this study, where the reusability of the mentioned waste materials is evaluated with useful recycling methods, the combined use of wastes in concrete production is also evaluated. With the inclusion of wastes into the concrete production process, very important benefits can be obtained in environmental, economic and technical terms.

**Keywords:** Industrial Waste, Recycled Aggregate, Waste Usage, Recycling

1. **GİRİŞ**

Küresel ekonomik büyümenin ve nüfus artışının önemli bir sonucu olarak enerji tüketimi artmıştır. Bu durum, katı atıkların üretiminde artış meydana getirmiştir. Katı atıklar ticari ve endüstriyel birçok faaliyetlerden üretilmektedir. Bu atıklar toplumsal ve çevresel birçok soruna yol açmaktadır. Dünya'da betonun sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzeme olduğu düşünülürse, bu atıkların çok büyük bir kısmının inşaat endüstrisinden kaynaklandığı yadsınamaz bir gerçektir. İnşaat endüstrisi, insan yaşamında ulaşım ve barınma gibi temel gereksinimleri karşılamada kilit bir rol oynamaktadır (Nwakaire vd., 2020). 2050 yılında Türkiye'de toplam nüfusun 100 milyon ve şehirleşmenin de yaklaşık %80 olacağı öngörülmektedir. Bu da inşaat endüstrisi faaliyetlerinin ve büyük şehirlerde konut ihtiyacının hızla artması demektir (Yılmaz, Y., 2014). Bu sebeple, inşaat atıklarının yeniden kullanımı ve geri dönüşümü sürdürülebilirlik kavramı için önemli bir konudur. İnşaat endüstrisinde artan farkındalık ve daha çevreci stratejilerin benimsenmesi nedeniyle, bu atıklarının bir kısmı tekrardan üretime dahil edilmektedir ve giderek daha da etkili kullanımları ile ilgili çalışmalar artmaktadır.

Sürdürülebilirliğin 3 temel prensibi; ihtiyacı azaltmak, yeniden kullanmak ve son olarak da geri dönüştürmektir. Malzemeleri yeniden kullanmanın bir yolu olmadığında, geri dönüşüm birincil kaynakları azaltmanın mümkün olan en etkili yoludur. Sürdürülebilir tüketim ve üretim politikaları çevreye zarar vermeden ekonomik büyümeyi amaçlamaktadır (Dovers ve Hussey, 2013). Maden kaynaklarının tükenmesi, yalnızca yerel bakış açısından değil, özellikle küresel bir bakış açısından da çok gerçek bir sorundur. Endüstrilerdeki, özellikle madencilik endüstrisindeki, sürdürülebilir kalkınma anlayışı, 1990'ların başında araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Birçok araştırmacı, madenlerin sürekli olarak geliştirilmesinin, teknolojik yeniliklerin ve çevresel iyileştirmenin madenciliğin sürdürülebilir gelişimi ile uyumlu olması gerektiğini belirtmektedir. Madencilik faaliyetleri, dünyanın sınırlı kaynakları olduğu düşünülürse temelde sürdürülemez gibi görünse de en az tüketim ile gelecek nesillere daha çok kaynak bırakılması açısından kontrollü bir şekilde yapılmalıdır (Sereshki ve Saffari, 2016). Aynı prensip ile inşaat endüstrisi için sürdürülebilirlik sadece karbon ayak izini azaltması ve çevresel zararların azaltılması değil, aynı zamanda sürekli büyüme için çok önemli olan doğal kaynakların korunmasına da katkıda bulunması gerektiği anlamına gelir.

İnşaat endüstrisi, doğal kaynakların %50’sini ve enerjinin %40’ını tüketen, atıkların da %50’sini oluşturan kontrollü üretimin gerçekleştirilmesi gereken önemli bir endüstridir (Oikonomou, 2005). İnşaat endüstrisinde kullanılan yapı malzemelerinin hammadde kaynaklarının doğal yenilenme oranları gittikçe önemli ölçüde azalmaktadır. Hammaddelerin doğal kaynaklardan çıkarılması, inşaat endüstrisinin neden olduğu dünyadaki en büyük çevresel etkilerden biridir. Bir diğer en büyük çevresel etkilerden biri de inşaat atıklarıdır. Atıkların bir kısmı genellikle düzenli depolama alanlarına atılırken, gayri resmi bir şekilde insan yaşam alanlarını çevreleyen su kütlelerine, kanallara ve gelişi güzel alanlara da ayrım gözetmeksizin atılmaktadır. Özellikle, son yıllarda artan kentsel dönüşüm çalışmaları ile bu atıkların geri dönüştürülmesi, eğer dönüştürülemiyorsa da uygun koşullarda bertarafının önemi artmaktadır.

Beton, inşaat endüstrisi atıklarında en fazla paya sahip ve üretiminde çok fazla enerji gerektiren bir yapı malzemesidir. Sürdürülebilir beton üretimi için kullanılacak çimento miktarı ve agrega kullanımının azaltılması önemli iki faktördür. Betonda çimento miktarını azaltmak için çimentoya ikame olarak bağlayıcı özellikte malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Bunun için inşaat veya başka endüstrilerden oluşan atıklar kullanılabilmektedir. Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş agrega ve çeşitli endüstriyel atıkların yeni bir beton karışımı içinde kullanımı değerlendirilecektir.

1. **GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGA**

Yapısal atıklardan en fazla hacme sahip olan atık beton atığıdır. Yıkılan betonların ezilmesiyle, agregalar geri kazanılabilir ve inşaat süreci dahilinde yeniden kullanılabilir veya diğer inşaat uygulamalarında geri dönüştürülebilir (Tam ve Tam, 2006). Bu tür agregalar, geri dönüştürülmüş agrega (GDA) olarak adlandırılır. Kullanım ömrünü tamamlamış veya afet kaynaklı hasarlı yapıların yıkımının yanı sıra yeni inşaat çalışmaları, hazır ve prekast beton santralleri, püskürtme beton işlemleri ve test edilen numunelerin laboratuvar uygulamalarından kalan betonlar gibi faaliyetler de beton atığı üretimini arttırmaktadır. GDA beton alanındaki araştırmalar 1940'lara kadar uzanmaktadır (Hansen, 1992). GDA farklı yapısal uygulamalarda, altyapı çalışmalarında, çeşitli iyileştirme yöntemlerinde ve beton karışım tasarımlarında bazı modifikasyon biçimleri ile standartlara uygun olarak ve etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Behera vd., 2014).

Beton üretiminde normal agrega yerine GDA kullanımında teknik özelliklerinde bazı olumsuz durumlar söz konusu olmaktadır (Rao vd., 2019). GDA kullanılarak üretilen betonların yoğunluklarının düşük olması, yeni matris ile arasındaki kenetlenme, işlenebilirlik ve su emme yüzdelerinin fazla olması gibi olumsuz özellikleri çeşitli yöntemlerle iyileştirilebilir. Sürdürülebilirliğe de katkısı olan ve en çok tercih edilen yöntemlerden biri yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların kullanımıdır. (Çakır ve Topgül, 2021), yüksek fırın cürufu kullanılarak ürettikleri betonların su emme oranının ve boşluklu yapının azaldığı sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda erken yaşlarda dayanımı azalsa dahi uzun dönemde betonların basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir. (Raovd., 2019), beton üretiminde kullanacağı GDA’ları öncesinde mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile %60 oranında GDA kullanımı gerçekleştirmiştir. (Majhi ve Nayak, 2020), %60 yüksek oranda granüle yüksek fırın cürufu, %50 GDA ve 7 kireç kullanarak ürettiği betonlarda su emme değerlerinde, boşluk yapısında ve bir takım durabilite özelliklerinde iyileşme gözlemlemiştir. Sonuçta çimento tüketimini %67 azaltan ve %50 normal agregadan tasarruf ile doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamış ve çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltan beton karışımı sunmuştur. (James vd., 2011), yıkılmış beton yapılardan elde edilmiş GDA ile uçucu kül kullanımının beton yollarda uzun dönemde kullanımının potansiyelini incelendiği bir çalışmada %25 GDA kullanımında çok düşük oranda basınç dayanımında azalma olduğu ve %15 oranında uçucu kül kullanıldığında sadece doğal agrega kullanılarak hazırlanan karışımın dayanımı ile arasında kayda değer bir fark olmadığı sonucuna varılmıştır.

(Donalson vd., 2011), tamamlanan yaşam döngüsü maliyet analizi ile geri dönüştürülmüş beton agregasının hem ekonomik olarak sürdürülebilir hem de otoyol yapımında temel malzeme olarak uygulanması için uygun olduğunu belirtmiştir. Ancak otoyol kaplamalarında en üstte bulunan aşınma tabakasında kullanımı gevşeklik sebebiyle pek önerilmemektedir (Söylemez, H. ve Bayraktar, 2019). (Savaş, 2002), deprem gibi doğal afetlerin etkisiyle dayanımını tamamen yitirip yıkılan binalardan elde edilmiş GDA’ların yüksek dayanım gerektiren taşıyıcı betonlarda değil, grobeton, stabilize yol dolguları, yürüyüş ve bisiklet yolu gibi dayanımın çok önem arz etmediği uygulamalarda kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

Türkiye’de son yıllarda kentsel dönüşüm çalışmaları yoğunlaşmıştır. Yıkılan ve yıkılması düşünülen binaların çok büyük bir kısmının iskelet sistemi betonarmedir. Beton atığı, inşaat ve yıkım atıklarının önemli bir parçasıdır. Kentsel dönüşüm çalışmalarıyla yıkılmış ve yerine yenisi yapılmış binaların olduğu yerlere ulaşım ve altyapı çalışmaları da gerekli olmaktadır. Yeniden yapılan binaların betonarme ve yol çalışmalarının da asfalt tercih edildiği ülkemizde agrega ihtiyacı da gün geçtikçe artmaktadır ve artmaya devam edecektir (Esin ve Cosgun, 2007). Betonun yaklaşık %70 (Demirel, 2012), asfaltın da %95’ini agrega oluşturmaktadır. 1 km’lik bir otoyolun yapımı için yaklaşık olarak 32.200 kg agreganın tüketildiği bilinmektedir (Zoorob ve Suparma, 2000). 2017 yılında yaklaşık 45 milyar ton doğal agrega çıkarılmış ve 2025 yılında çıkarılacak miktarın 66 milyar tona çıkacağı tahmin ediliyor (de Brito ve Agrela, 2018). Doğal hammadde kaynaklarını tüketmek yerine bu büyük miktarda agrega ihtiyacının karşılanması için yapılan çalışmalarda GDA kullanılmalıdır. Kentsel atıklardan elde edilen GDA’ların beton ve çimento harçlarında kullanılması taş ocaklarından çıkarılan hammaddelerin azalmasını sağlamaktadır (Kenai vd., 2014). Asıl önemli olan konu GDA’ların teknik özelliklerinin belirlenmesinden sonra hangi uygulamalarda nasıl ve ne oranda kullanılacağının bilinmesi ve bu atıkların en verimli şekilde değerlendirilmesidir.

(López-Gayarre vd., 2009) çalışmalarında GDA türü, kalitesi ve kullanım oranları ile ilgili bazı çıkarımlar elde etmişlerdir. Kullanılan GDA’nın kalitesinin üretilen betonun basınç dayanımını doğrudan etkilemektedir. Bunun çözümü olarak da toplam su-çimento oranı sabit tutularak GDA’dan kaynaklanan işlenebilirlik kaybı katkı maddesi kullanımı ile telafi edilebilmektedir. Bu çalışma aynı zamanda, çalışmanın sonuçlarının pratik kullanım için mevcut GDA’ların gerçek kalitesinin doğrulanmasının ihtiyacını gündeme getirmektedir.

İşlenmemiş agregaların çıkarılması ve parçalanması, önemli miktarda enerji kullanımına ve daha fazla CO2 emisyonuna neden olur (Limbachiya vd., 2012). Ancak, normal agrega ve GDA üretiminde harcanan enerjinin nihai değerlendirme sonuçları arasında çok bir fark olmadığını (Braunschweig vd., 2011) ve CO2 salınımında önemli değişiklik yaratmadığını ifade eden çalışmalar (Kleijer vd., 2017) mevcuttur. Agrega üretimi, betonun toplam CO2 emisyonunun yalnızca %13 ile %20'sini temsil etmektedir. Bu sebeple çimento ile kıyaslandığında emisyona olan katkısı azımsanabilmektedir. Ancak yine de doğal kaynakların tüketimini %44'e varan oranlarda azaltabilmesi, deniz kenarından veya nehir yatağından kum çıkarılmasının azalması ve yerel ekosistemler üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir (Yu vd., 2020). Beton üretim maliyetinde çimentodan sonra agreganın önemli bir maliyet kalemi olduğunu düşünürsek, ekolojik faydalarının yanı sıra maliyette de %34 ile %41 arasında bir düşüş sağlamaktadır (Kadiroğlu vd.). Ayrıca, GDA ve normal agrega kullanımının çevresel ve ekonomik karşılaştırmalarda nakliye aşamasının etkisi oldukça önemlidir. Bunun için teknik özelliklerini de göz önüne alarak yaşam döngüsü sürecinde değerlendirilmeli ve kapsamlı bir karşılaştırma yapılmalıdır.

1. **ENDÜSTRİYEL ATIKLAR**

Endüstriyel atıkların artması ve uygun depolama alanlarının yetersizliği gittikçe daha büyük çevresel zararlara sebep olmaktadır. Atıkların yok edilmesinin gerektirdiği enerji ve maliyetlerin çok olmasından ötürü atık üreticileri bertaraf tesisine göndermek yerine atıkları biriktirmeyi tercih etmektedir. Özellikle ülkemizde bu tür atıkların geri dönüştürme süreçleri dahilinde uygun bir şekilde değerlendirilmemesi bu atıkların yeniden değerlendirmesinde ek maliyet, çevre kirliliği ve enerji tüketimine sebep olmaktadır (Siddique ve Singh, 2011).

Endüstrilerin birbirine yakın bağımlılıklarından dolayı, bir sektördeki atık başka bir sektörde üretilen malzemenin hammaddesi veya yan ürünü olarak kullanımına olanak tanımaktadır. Enerji sektöründe sürdürülebilirliğin en etkili şekilde gerçekleşebilmesi için tüm sektörleri içine alan sürdürülebilirlik teknolojileri geliştirilmeli ve endüstriyel atıkların alternatif kullanımları ile ilgili çalışmalara yoğunluk verilmelidir (Kaplan vd., 2020).

Çevresel etki kategorilerinin tümünde çimento üretiminin katkısı en yüksek değere sahiptir (Braunschweigvd., 2011). Bir ton çimento üretiminde, klinker üretim süreçlerinde ve fosil yakıtların yanması sonucunda atmosfere yaklaşık bir ton CO2 salınmaktadır. Ayrıca, portland çimentosu üretiminin dünya çapında toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %7'si olduğu tahmin edilmektedir (Vairagade vd., 2015). Buna rağmen, yıllara göre artış ve azalışları değişkenlik gösterse de ülkemizde çimento üretiminde durağanlık pek görülmemektedir. 2020 yılı Çimento Sektör Raporu’na göre, 2019 yılında çimento üretimi 2016 yılına göre yaklaşık %25 azalsa da alternatif hammaddelerin kullanımında %40 artış gözlenmiştir (Bakanlığı, 2020).

Beton gibi çimento esaslı malzemelerin üretiminde bazı endüstriyel atıklar agrega, çimentoya ikame, dolgu malzemesi olarak başarılı bir şekilde kullanılabilir. Bu şekilde, betonun kalitesinden ödün vermeden doğal hammaddelerin kaynaklarını daha az kullanarak ve karbondioksit salınımını azaltarak sürecin verimliliğini artırmak mümkün olmaktadır. Ayrıca bu zararlı endüstriyel atıkları kalıcı olarak beton içerisinde katılaştırarak faydalı bir uygulamada kullanmak çok iyi bir çözümdür.

* 1. **Uçucu Kül**

Uçucu kül, enerji üretimi gerçekleştirilen termik santrallerde linyit ve taş kömürü gibi fosil yakıtların yüksek sıcaklıklarda yakılması ile baca gazlarıyla yükselerek çeşitli yöntemlerle toplanan uçucu kül hava, su ve toprak kirliliğine neden olan, ekolojik döngüleri bozan ve çevresel tehlikeleri tetikleyen bir endüstriyel atıktır. Üretilen santralin türü, işletme yöntemi, fosil yakıt türü, yakma şekli gibi etkenlere bağlı olarak uçucu kül özelliklerinde ve tipinde değişkenlik görülmektedir. Özellikle linyit kömürünün yakılmasında taş kömürünün yakılmasına göre çok daha fazla uçucu kül elde edilmektedir (Kaplan ve Gültekin, 2010). Uçucu külle ilgili sorun, yalnızca bertaraf edilmesinin büyük miktarlarda toprak, su ve enerji gerektirmesi gibi sadece çevresel etkileri değil, iyi yönetilmediği takdirde, hafif olmalarından dolayı havayla taşınıp insan sağlığı açısından da tehlikeli olmasıdır (Keskin ve Mert, 2002).

Türkiye'de her yıl 15 milyon ton uçucu kül termik santrallerin yanmasından endüstriyel yan ürün olarak üretilmekte ve bunun sadece %1'i inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Muhedin vd., 2016). Uçucu kül sadece normal dayanımlı beton üretiminde değil aynı zamanda uzun açıklıklı köprüler, yüksek katlı binalar, barajlar ve tüneller gibi yüksek dayanım gerektiren çeşitli yapılarda dayanıklılık sağlamak ve çok fazla hidratasyon ısısından kaynaklanan mikro çatlakları önlemek için de kullanılır.

İnşaat endüstrisinde çimento, beton, cam, plastik, boya, seramik, tuğla ve gazbeton üretiminde, temel, yol ve asfalt uygulamalarında dolgu malzemesi olarak uçucu kül kullanımına rastlanmaktadır (Alkaya vd., 2002; ARUNTAŞ, 2006). Bunların en başında çimento ve beton üretimi gelmektedir. Çimento ve beton üretiminde ikame ve katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanımlarında enerji tüketimi azalmakta, daha çevreci ve ekonomik bir üretim söz konusu olmaktadır. Çimento üretimde ayrıca klinker elde edilme sürecinde hammadde olarak da kullanılabilmektedir (Güler vd., 2005). Uçucu külün öğütülme gereksinimi olmadan çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılması enerji tasarrufu açısından faydalı bir durumdur (Mehta, 2001). Tuğla ve gazbeton üretiminde öğütme ve kalıplama sürecinin daha kolay gerçekleşmesi ve su emme değerlerini azaltarak kuruma sürelerinden tasarruf sağlamaktadır (Osmanoğlu, 2019; Söylemez, M. ve Yıldırım, 2016). Uçucu külün yol çalışmalarında temel malzemesi (Kumar ve Patil, 2006), asfalt içerisinde ince taneli malzeme (Likitlersuang ve Chompoorat, 2016), zemin stabilizasyonunda (Yılmaz, F., 2020), geçirimsizliğin gerekli olduğu altyapı ve zemin çalışmalarında (Demiröz, 2009) dolgu malzemesi olarak kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Kimyasal yapıları gereği puzolanik özelliğe sahip, iyi mekanik ve durabilite özellikleri sayesinde inşaat endüstrisinde en çok kullanılan endüstriyel atıklardan biri durumundadır.

Çimento üretimi, betonun toplam somutlaştırılmış enerjisinin yaklaşık %90'ını temsil etmektedir. Çimento üretimi, küresel bir sera gazı kaynağıdır (Marinković vd., 2014). Bu nedenle beton üretiminde kullanılacak çimento malzemesinin azaltılması çevresel açıdan önemlidir. Uçucu küllerin beton ve çimento endüstrisinde değerlendirilmesi ile çimento kullanım miktarı azalacak, depolama alanları gereksiz yere işgal edilmemiş olacak ve çevresel zararlar asgariye indirilecektir. Ayrıca teknik açıdan birçok fayda sağlanmış ve ekonomik bir üretim süreci gerçekleştirilmiş olacaktır.

(Tangüler vd., 2015), çalışmalarında Türkiye’de belli oranlarda uçucu kül kullanılarak elde edilmiş betonları yaşam döngüsü analizi ile değerlendirmişlerdir. Beton üretiminin sebep olduğu küresel ısınma potansiyellerini çimento yerine uçucu kül kullanarak büyük oranda azaltılabileceğini göstermişlerdir. Çevresel açıdan faydalarıyla beraber teknik özelliklerde de iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca uçucu külün depolama alanlarından kullanılacak yere taşıma mesafesinin eşdeğer CO2 salınım miktarında kayda değer bir fark olmadığı görülmüştür. Türkiye’nin en uzak iki bölge arasında taşınsa dahi uçucu kül kullanılarak elde edilen betonun eşdeğer CO2 salınımı uçucu külsüz betona nazaran çok daha az olmaktadır.

Literatüre bakıldığında, uçucu külün standart beton üretiminde çimentoya ikame olarak yaklaşık %15 ile 25 arasında kullanıldığı görülmektedir. Daha fazla kullanımında betonun basınç dayanımında belirgin düşüşler meydana gelmektedir. Ancak, kullanılan en uygun miktar uçucu külün özelliklerine, uygulamaya, spesifikasyon sınırlarına ve iklime bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Temel ve baraj gibi büyük sıcaklık artışını kontrol etmek için daha yüksek seviyelerde (%30-%50) kullanılmaktadır. Hatta iyi mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahip beton üreten yapısal uygulamalarda daha yüksek kullanıma (%40-% 60) rastlanmaktadır (Marceau vd., 2002). Uygulamada da uçucu kül kullanım miktarı betonun kullanım yeri, inşaat programı ve sıcaklığa bağlı olarak optimize edilmiştir. Örneğin, kışın yol yapımında kullanımında uçucu kül miktarı %20 ile sınırlandırılmıştır. Zamanla uçucu kül ile yapılan çalışmaların artması, karakterizasyonlarının daha iyi anlaşılması ve yeniden kullanım teknolojilerinin gelişmesiyle daha yüksek hacimli uçucu kül kullanımları mümkün olmaktadır (Thomas, 2007).

Çeşitli kuruluşlar ve ajanslar mevcut uçucu kül anlayışı üzerine standartlar geliştirmiştir. Bu standartlar, uçucu külü karakterize etmek için kimyasal bileşim, incelik, özgül ağırlık, tutuşma kaybı ve puzolanik aktivite gibi bilgileri içermektedir (Hemalatha ve Ramaswamy, 2017). Herhangi bir inşaat uygulaması için kullanılacak uçucu külün seçiminde bu standartlar önemli rol oynamaktadır. Kül bazlı ürünlerde partikül boyutu dağılımının mekanik ve fiziksel özelliklerinde önemli bir etkendir. Daha ince parçacıklar normal bir üretim prosesinde ve belli oranlarda kullanıldığında fazla yüzey alanı sağlayarak daha iyi puzolanik reaksiyonlara sebep olmaktadır. (Sevim ve Demir, 2019), optimum parça boyutu dağılımının kompakt kül bazlı bir ürünle sonuçlandığını ve bunun daha iyi mekanik özelliklere yol açtığını göstermiştir. Uçucu kül kullanımının derecelendirilmesindeki basit değişikliklerle önemli ölçüde geliştirilebileceği gibi, fiziksel karakterizasyonun anlaşılması, uçucu kül katkılı uygulamaların iyileştirilmesi için oldukça önemlidir.

* 1. **Yüksek Fırın Cürufu**

Demir ve çelik endüstrisinin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu (YFC), demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşının çok yüksek sıcaklıklarda eritilmesiyle gerçekleşen demir üretimi sırasında elde edilir. Erimiş halde olan YFC çeşitli soğutma işlemlerine tabi tutularak farklı özelliklere ve formlara sahip ürünler elde edilir. YFC atmosfer koşullarında yavaş ve kendiliğinden soğumaya bırakılırsa iri kristal taneli; kontrollü bir şekilde su, basınçlı hava ve buhar ile soğutulursa gözenekli ve iri; çok fazla su kullanılarak ani bir şekilde soğutulursa kum gibi amorf ve granüle bir yapı elde edilir. Bu malzemenin öğütülmesi ile puzolanik özelliğe sahip öğütülmüş granül YFC elde edilir (Çam, 2019).

YFC betonda dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik ve ekonomik faydalar dahil olmak üzere birçok faydası vardır. Beton üretiminde bu endüstriyel atığın kullanılması, sürdürülebilir beton tasarımına ve daha yeşil bir çevre sağlayacaktır (Ulubeyli ve Artir, 2015). YFC kullanımı betonda erken yaşlardaki dayanımın azalmasına sebep olurken, nihai dayanımlarda artış sağlamaktadır. Bu durum, YFC’nin çimentonun hidratasyonundan açığa çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)2) ile tepkimeye girerek, betona dayanım sağlayan C-S-H yapısını oluşturmasıyla ilgilidir. Bu tepkime daha çok betonun ileriki yaşlarında gerçekleştiği için erken dayanımdan ziyade nihai dayanımda daha net bir iyileşme söz konusudur.

YFC, inşaat endüstrisinin çevreci kimliğini iyileştirmek için alternatif çimento esaslı malzemelerde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ancak endüstriyel faaliyetlerdeki artış ve büyük hacimli YFC’nin bertarafı, giderek daha maliyetli hale gelmiş ve çevresel kaygılara da neden olmuştur. Bu durumun bir etkisi olarak yapılan son çalışmalar daha çok farklı endüstriyel atıkların beraber ve yüksek hacimlerde kullanımı ile ilgili olmaktadır (Gholampour ve Ozbakkaloglu, 2017).

Granüle YFC’nin çimento ile ikame edilmesi genellikle erken dayanımda bir azalmaya ve priz süresinde bir artışa yol açar. Bu da büyük oranda YFC kullanımını sınırlar. YFC kullanımı betonun mekanik özelliklerinin iyileştirmekle birlikte zayıf asitlere ve tuzlara karşı direncini de iyileştirir. Yol, kanalizasyon gibi taban beton katmanları olan inşaat uygulamalarında, zemin ve dolgu işlemlerinde yüksek oranlarda ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kullanılması beton dayanımı açısından ve ekonomik açıdan oldukça etkilidir (Václavík vd., 2012). Ayrıca, zemin stabilizasyonu, yol yapımında alt temelleri ve alt dereceleri iyileştirmek için, demiryolu, sağlam olmayan yamaçlarda toprak değişiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Sülfat içeren killi toprakların kireç stabilizasyonunda aşırı şişmesi problemlerine çözüm olarak öğütülmüş granüle YFC kullanılmaktadır (Nidzam ve Kinuthia, 2010).

(Işıkdağ ve Topçu, 2013), geleneksel horasan harçlarında fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için öğütülmüş granüle YFC kullanmışlardır. Öğütülmüş granüle YFC, çeşitli oranlarda agrega olarak kırma karo ve kiremit tozu yerine kullanılmış ve bağlayıcı olarak da kireç kullanılmıştır. Mikroyapı, kimyasal bileşim ve termal analiz ile elde ettiği deney sonuçlarını yorumlamıştır. Sonuca göre, kiremit tozu ile %40 yer değiştirilmiş YFC’nin olduğu numunelerde daha yüksek basınç ve eğilme dayanımları gözlenmiştir.

(Jamshidi vd., 2015), havaalanı beton kaplamaların yapısal ve sürdürülebilirlik performanslarını incelemişlerdir. Bu bağlamda, çeşitli uçak tasarım versiyonları ve taban dayanımları için trafik yüklerine dayanması gereken beton levhanın kalınlığını belirlemek için birkaç yapısal tasarım ve uygun YFC kullanım olanakları geliştirilmiştir. Beton kaplamaların sürdürülebilirliği, yakıt gereksinimleri ve sera gazı emisyonları açısından değerlendirilmiş ve basit bir grafiksel yöntem ile ön YFC içeriği seçimi için alternatifler önerilmiştir. Böylelikle, en önemli fiziksel kamu altyapılarından biri olan havalimanları için daha temiz beton kaplamaların inşası için yapısal ve sürdürülebilirlik tasarımı iyileştirmesi beklenmektedir.

Beton karışımında uçucu kül ve YFC’nin birlikte kullanımıyla betonda mekanik ve durabilite özellikleri açısından olumlu sonuçlar elde edilmektedir. (Li ve Zhao, 2003), öğütülmüş granüle YFC ve uçucu kül kombinasyonunun yüksek dayanımlı betonun özellikleri üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Beton karışımlarının değerlendirmeleri, betonun kısa ve uzun vadeli performansları hem deneysel hem de taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, uçucu kül ve YFC kombinasyonunun normal dayanımlı betonun hem kısa hem de uzun vadeli özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir. Ancak, yüksek dayanımlı betonlarda olumlu sonuçlar elde etmek için nispeten daha uzun bir süre gerektiği belirtilmiştir.

1. **SONUÇLAR**

GDA’ların beton üretim tesislerinden elde edilmesiyle agrega kaynakları tüketiminden, agregaların madenlerden temin edilme sürecinde gerçekleşecek enerji kaybından ve çevresel zararlardan kaçınılarak üretim yapma alternatifleri ile ilgili çalışmaların daha kapsamlı yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda, ciddi çevresel zararlara sahip endüstriyel atıklardan olan uçucu kül ve YFC’nin kullanılmasıyla depolama alanlarının gereksiz yere işgal edilmemesine katkı sağlanmış olmaktadır. Uçucu kül ve YFC’nin beton karışımına ikame edilmesiyle kullanılan çimento miktarının azalması, daha çevreci ve ekonomik bir üretim süreci gerçekleşmesine katkı sağlamıştır.

Küçük veya büyük tüm üretim gerçekleştiren firmaların üretimlerindeki süreçleri çevresel, ekonomik ve teknik özellikleri açısından değerlendirmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, alternatif hammaddelerin üretim yapan firmalara tanıtılması ve bu konularda yapılan akademik çalışmaların sektörlere kazandırılması ile en verimli şekilde bu atıkların değerlendirilmesine katkı sağlanmalıdır.

**KAYNAKLAR**

Alkaya, D., Erken, A., Alyanak, T. ve İnançlı, G. (2002). Uçucu Küllerin Toprak Sanayinde Kullanılabilirliği. *Uluslar arası Pişmiş Toprak Sempozyumu, Tepebaşı Belediyesi, Eskişehir*, 287-295.

ARUNTAŞ, H. (2006). Uçucu Küllerin Inşaat Sektöründe Kullanim Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21*(1).

Bakanlığı, T. C. S. v. T. (2020). *Çimento Sektör Raporu*. Retrieved from

Behera, M., Bhattacharyya, S., Minocha, A., Deoliya, R. ve Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete–A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials, 68*, 501-516.

Braunschweig, A., Kytzia, S. ve Bischof, S. (2011). *Recycled concrete: Environmentally beneficial over virgin concrete.* Paper presented at the life cycle management conference.

Çakır, Ö. ve Topgül, S. S. (2021). Physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete with ground granulated blast furnace slag. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36*(2), 939-951.

Çam, A. (2019). *İnce agrega yerine kullanılan granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi.* Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

de Brito, J. ve Agrela, F. (2018). *New trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*: Woodhead Publishing.

Demirel, C. (2012). *Yaşı ve Sınıfı Belli Geridönüşüm Agregalarının Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması.* Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,

Demiröz, A. (2009). UÇUCU KÜLLERİN GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMI. *Selçuk-Teknik Dergisi, 8*(3), 212-221.

Donalson, J., Curtis, R. ve Najafi, F. (2011). *Sustainable Assessment of Recycled Concrete Aggregate (RCA) Used in Highway Construction*.

Dovers, S. ve Hussey, K. (2013). *Environment and sustainability: a policy handbook*: Federation Press.

Esin, T. ve Cosgun, N. (2007). A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey. *Building and Environment, 42*(4), 1667-1674.

Gholampour, A. ve Ozbakkaloglu, T. (2017). Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production, 162*, 1407-1417.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye, 19*, 419-423.

Hansen, T. C. (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry*: CRC Press.

Hemalatha, T. ve Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics–Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production, 147*, 546-559.

Işıkdağ, B. ve Topçu, İ. B. (2013). The effect of ground granulated blast-furnace slag on properties of Horasan mortar. *Construction and Building Materials, 40*, 448-454.

James, M. N., Choi, W. ve Abu-Lebdeh, T. (2011). Use of recycled aggregate and fly ash in concrete pavement. *Am. J. Eng. Applied Sci, 4*, 201-208.

Jamshidi, A., Kurumisawa, K., Nawa, T. ve Hamzah, M. O. (2015). Analysis of structural performance and sustainability of airport concrete pavements incorporating blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production, 90*, 195-210.

Kadiroğlu, İ., Öz, E., Tezcan, O. ve Kuru, E. B. Geri Dönüşümlü Agreganın Beton Üretiminde Kullanılabilirliği.

Kaplan, G., Çankal, D. ve Özrtürk, U. A. (2020). ENDÜSTRİYEL VE KENTSEL DÖNÜŞÜM ATIKLARININ DÖNGÜSEL EKONOMİ AÇISINDAN İNŞAAT SEKTÖRÜNE FAYDALARI In F. Sayın (Ed.), *DÖNGÜSEL EKONOMİ-Makro ve Mikro İncelemeler* (pp. 528-529).

Kaplan, G. ve Gültekin, A. B. (2010). *Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi* Paper presented at the International Sustainable Buildings Symposium (ISBS).

Kenai, S., Menadi, B. ve Khatib, J. M. (2014). *Sustainable construction and low-carbon dioxide concrete: Algeria case.* Paper presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability.

Keskin, M. ve Mert, A. (2002). Türkiye’de enerji ve çevre konusunda yapılan en büyük hataların bir laboratuarı: Yatağan-Yeniköy-Gökova termik santralleri. *Mühendis ve Makine, 509*.

Kleijer, A., Lasvaux, S., Citherlet, S. ve Viviani, M. (2017). Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. *Resources, conservation and recycling, 122*, 210-218.

Kumar, S. ve Patil, C. (2006). Estimation of resource savings due to fly ash utilization in road construction. *Resources, conservation and recycling, 48*(2), 125-140.

Li, G. ve Zhao, X. (2003). Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites, 25*(3), 293-299.

Likitlersuang, S. ve Chompoorat, T. (2016). Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology, 9*(5), 337-344.

Limbachiya, M., Meddah, M. S. ve Ouchagour, Y. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials, 27*(1), 439-449.

López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M. ve López-Colina, C. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste management, 29*(12), 3022-3028.

Majhi, R. K. ve Nayak, A. N. (2020). Production of sustainable concrete utilising high-volume blast furnace slag and recycled aggregate with lime activator. *Journal of Cleaner Production, 255*, 120188.

Marceau, M. L., Gajda, J. ve VanGeem, M. (2002). Use of fly ash in concrete: Normal and high volume ranges. *PCA R&D Serial*(2604).

Marinković, S., Malešev, M. ve Ignjatović, I. (2014). Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates. In *Eco-Efficient construction and building materials* (pp. 239-266): Elsevier.

Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete international, 23*(10), 61-66.

Muhedin, D., hama rash, A. ve Hamakareem, M. (2016). *Sustainable Concrete by Using Fly ash as a Cement Replacement*.

Nidzam, R. ve Kinuthia, J. M. (2010). Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag–a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 163*(3), 157-165.

Nwakaire, C. M., Yap, S. P., Onn, C. C., Yuen, C. W. ve Ibrahim, H. A. (2020). Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review. *Construction and Building Materials, 235*, 117444.

Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites, 27*(2), 315-318.

Osmanoğlu, O. Y. (2019). *Farklı minerallerin ve uçucu külün gazbeton üretiminde değerlendirilmesi.* Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü,

Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K. ve Barai, S. V. (2019). *Systematic approach of characterisation and behaviour of recycled aggregate concrete*: Springer.

Savaş, Ö. (2002). *Atık betonların geri kazanımı.* Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi,

Sereshki, F. ve Saffari, A. (2016). Environmental impact assessment and sustainability level determination in cement plants (Case study: Shahrood cement plant). *Iranian Journal of Earth Sciences, 8*(2), 90-101.

Sevim, Ö. ve Demir, İ. (2019). Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness. *Construction and Building Materials, 195*, 104-114.

Siddique, R. ve Singh, G. (2011). Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resources, conservation and recycling, 55*(11), 885-892.

Söylemez, H. ve Bayraktar, O. Y. (2019). *İnşaat Yıkıntı Atıklarının Asfalt Agregası Olarak Kullanılma Stratejisi.* Paper presented at the 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, April19–21, Ankara, Turkey.

Söylemez, M. ve Yıldırım, A. (2016). Termik santral uçucu külünün tuğla dayanımına etkisi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3*(4), 19-31.

Tam, V. W. ve Tam, C. M. (2006). A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, conservation and recycling, 47*(3), 209-221.

Tangüler, M., Gürsel, P. ve Meral, Ç. (2015). Türkiye’de uçucu küllü betonlar için yaşam döngüsü analizi. *9. Ulusal Beton Kongresi*, 431-441.

Thomas, M. (2007). *Optimizing the use of fly ash in concrete* (Vol. 5420): Portland Cement Association Skokie, IL.

Ulubeyli, G. C. ve Artir, R. (2015). Sustainability for blast furnace slag: use of some construction wastes. *Procedia-social and behavioral sciences, 195*, 2191-2198.

Václavík, V., Dirner, V., Dvorský, T. ve Daxner, J. (2012). The use of blast furnace slag. *Metalurgija, 51*(4), 461-464.

Vairagade, V., Parbat, D. ve Dhale, S. (2015). Fly ash as sustainable material for green concrete-a state of art. *Int J Res Eng Sci Technol, 1*(02), 17-24.

Yılmaz, F. (2020). ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA DEĞERLENDİRİLMESİ. *Mimarlık Bilimlerinde Güncel Araştırmalar*, 68.

Yılmaz, Y. (2014). *Beton üretiminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmasının etkileri ve maliyet analizi.* Namık Kemal Üniversitesi,

Yu, B., Wang, J., Li, J., Lu, W., Li, C. Z. ve Xu, X. (2020). Quantifying the potential of recycling demolition waste generated from urban renewal: A case study in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production, 247*, 119127.

Zoorob, S. ve Suparma, L. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement and Concrete Composites, 22*(4), 233-242.