

JEOPOLİMER BAĞLAYICI ÜRETİMİNDE ATIK MERMER TOZU KULLANIM OLANAKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kübra EKİZ BARIŞ* 

Alınma:19.05.2023; düzeltme:26.10.2023; kabul: 05.12.2023

Öz: Bu çalışmada Datça Pozzolanı (P) esaslı jeopolimer bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerinin gelişimi üzerinde farklı oranlarda atık mermer tozu (AMT) ikamesinin (100P:0AMT, 75P:25AMT, 50P:50AMT, 25P:75AMT ve 0P:100AMT) etkinliği değerlendirilmiştir. Numuneler 70°C'de 24 saat kürlendikten sonra ortam koşullarında 7 ve 28 gün kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, Datça Pozzolanı esaslı jeopolimerin en düşük porozite (%16,57) ve su emme oranı (%5,29), en yüksek kapilarite katsayısı (0,143 cm/ $\sqrt{\text{dk}}$), ultrases hızı (2,95 km/s), eğilmede çekme (2,34 MPa) ve basınç dayanımına (12,42 MPa) imkân veren karışım oranı 75P:25AMT olarak belirlenmiştir. Bu karışım, en küçük makro ölçekli boşluk çapına (575 μm), en dar boşluk boyutu dağılımı aralığına sahiptir ve içyapısı daha yoğun, kompakt ve homojendir. AMT oranının artmasıyla kapilarite katsayısı, ultrases hızı, eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında tespit edilen azalma, mermerin bileşimindeki silis ve alümin oranının düşük olması nedeniyle alkali aktivasyonun yeterince gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. AMT oranı yüksek olan karışımlar daha fazla boşluklu olup, en büyük boşluk çapına ve en geniş boşluk boyutu dağılımına yani en heterojen içyapıya sahiptir. P ve AMT karışımından üretilen jeopolimerin mekanik özellikleri literatürdeki araştırmaların mekanik özelliklerine yakın ya da daha yüksektir. Araştırmada atık mermer tozunun değerlendirilmesiyle daha fazla çevre dostu olan alternatif bir bağlayıcı geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık mermer tozu, Doğal pozzolan, Jeopolimer, Fiziksel özellikler, Mekanik özellikler

Evaluation of Waste Marble Powder Using Possibilities in the Production of Geopolymer Binders

Abstract: The efficiency of replacing waste marble powder (AMT) at various contents (pozzolan:marble ratios of 100P:0AMT, 75P:25AMT, 50P:50AMT, 25P:75AMT, and 0P:100AMT) on the development of the physical and mechanical properties of Datça Pozzolan-based (P) geopolymers was evaluated. After the specimens were cured at 70°C for 24 hours, they were cured under ambient conditions for 7 and 28 days. As a result of the study, mixture ratio, which allows the lowest porosity (16,57%) and water absorption ratio (5,29%), and the highest capillarity coefficient (0,143 cm/ $\sqrt{\text{min}}$), ultrasound pulse velocity (2,95 km/s), flexural strength (2,34 MPa) and compressive strength (12,42 MPa) was determined to be 75P:25AMT. This mixture has the smallest macro-scale pore diameter (575 μm) and the narrowest pore size distribution range, and its internal structure is more dense, compact, and homogeneous. The decrease observed in the capillarity coefficient, ultrasound pulse velocity, flexural and compressive strengths with the increase in marble content is due to insufficient alkali activation due to the low silica and alumina content in the composition of the marble. Mixtures with a high marble content have more pores, the largest pore diameter, and the widest pore size distribution range, i.e., a more heterogeneous microstructure. The mechanical properties of the produced geopolymer are close to or higher than the mechanical properties of the studies in the literature. In the research, a more environmentally friendly binder was developed by utilizing waste marble powder.

Keywords: Waste marble powder, Natural pozzolan, Geopolymer, Physical properties, Mechanical properties

* Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Cedit, Muzaffer Fidan Sokak, 41300, İzmit/Kocaeli
İletişim Yazarı: Kübra Ekiz Barış (kubra.ekizbaris@kocaeli.edu.tr)

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir kalkınma girişimleri, bilim adamlarını “jeopolimer” ya da “alkali aktive edilmiş bağlayıcılar” gibi üretimlerinde nispeten düşük enerji tüketimi gerektiren ve daha düşük emisyonlara yol açan alternatif yapı malzemeleri ve üretim süreçleri geliştirmeye yönlendirmektedir (Shi ve diğ., 2011). Bir bağlayıcı malzemenin sürdürülebilirliğini açıklayan, ancak, nadiren göz önünde bulundurulmuş unsurlardan biri “yerel hammadde kavramı”dır. Jeopolimer bağlayıcıların üretiminde kullanılan alüminosilikat hammadde kaynağının yerel olarak bulunması, bu malzemelerin daha düşük karbon ayak izine sahip olmasını sağlamaktadır (Provis, 2018). Jeopolimer malzemelerin üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için, yerel olarak temin edilebilen ya da atık hammaddelerin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına öncelik verilirken, ortaya çıkan atıkların ve emisyonların en aza indirilmesi önemle tavsiye edilmektedir (Kamseu ve diğ., 2021a; Kamseu ve diğ., 2021b).

Jeopolimer ya da alkali aktive edilmiş bağlayıcılar, alümin (Al_2O_3) ve silisçe (SiO_2) zengin katı alüminosilikat kaynakların alkali hidroksit ya da alkali silikat çözeltileriyle reaksiyonu sonucunda üretilen yapı malzemeleridir (Firdous ve diğ., 2018). Ekzotermik bir süreç olan çözünme, topaklaşma ve yoğunlaşma reaksiyonları sonucunda sertleşen bu bağlayıcılar, hammaddelerinin bileşiminde bulunan kalsiyum oranına göre yüksek kalsiyumlu ve düşük kalsiyumlu olmak üzere gruplandırılmaktadır (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015). Yüksek fırın cürufu gibi yaklaşık %30-40 oranında kalsiyum içeren hammaddelerin alkali aktivasyonu sırasındaki reaksiyon ürünü C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jel olup Portland çimentonun hidratasyon ürününe benzerdir. Metakaolin, uçucu kül, volkanik toprak ya da volkanik kül gibi düşük kalsiyum içeren hammaddelerin reaksiyon ürünü ise üç boyutlu inorganik bir alkali polimer, yani N-A-S-H (ya da alkali alüminosilikat hidrat) jelidir (Palomo ve diğ., 1999; Duxson ve diğ., 2007; Provis ve van Deventer, 2009). Jeopolimer bağlayıcılar, kullanılan hammadde kaynaklarının türüne bağlı olarak, geleneksel Portland çimentolu bağlayıcılara nazaran yaklaşık %80 daha az CO_2 salımına neden olduğundan (Firdous ve diğ., 2018) daha düşük karbon ayak izine sahiptir.

Mermer, kireçtaşı ve dolomitin yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşmesi sonucunda oluşan doğal bir taştır. Antik çağlardan günümüze kadar, kültürel miras anıtlarının, tarihi binaların ve birçok diğer uygulamanın inşasında mermer kullanımı yaygın olmuştur. Dünya genelinde toplam doğal taş üretiminin yaklaşık %50'si kadar büyük bir oranda mermer rezervi bulunmaktadır (Komnitsas ve diğ., 2021). Alp-Himalaya kuşağındaki Portekiz, İspanya, İtalya, Yunanistan, İran, Pakistan ve Türkiye mermer yatakları bakımından oldukça zengin ülkelerdir (Çelik ve Sabah, 2008). Türkiye, 3872 milyon m^3 mermer rezervi ile dünya genelindeki toplam mermer rezervinin yaklaşık %40'ına sahiptir (Singh ve diğ., 2019). Ülkemizde çok çeşitli renk ve dokularda 250'nin üzerinde mermer çeşidi bulunmaktadır. Özellikle %90'ı Batı Anadolu, Afyon, Balıkesir, Eskişehir, Uşak, Kütahya, Muğla, Bursa, Aydın ve İzmir'de olmak üzere faaliyette olan yaklaşık 700 mermer ocağı bulunmaktadır (Çelik ve Sabah, 2008).

Mermer işleme fabrikalarında kesme ve cilalama işlemleri sırasında 1 ton mermer işlenirken yaklaşık 1 ton mermer çamuru ortaya çıkmaktadır. Mermer çamurunun %35-45'i sudan oluşmaktadır (Singh ve diğ., 2017). Bu çamur, mermer fabrikaları ya da kesim atölyelerinden dışarı atıldığında ve kendiliğinden kurduğunda AMT elde edilmektedir (Singh ve diğ., 2019). AMT genellikle gelecekte başka uygulamalarda kullanılmak üzere depolarda depolanmakta ya da çöplüklere bırakılarak çevre sorunlarına yol açmaktadır (Komnitsas ve diğ., 2021). Ayrıca, çevreye dağılan bu tozların tarıma ve canlı sağlığına olumsuz etkileri bulunmaktadır (Çelikten ve Atabey, 2021). Mermer atıklarının biyolojik olarak parçalanamadığı göz önüne alındığında, bu atıkların bağlayıcı, dolgu maddesi ya da agrega olarak betona entegrasyonu çevresel açıdan uygun bir seçenektir. Çimento ağırlıkça %5 oranında AMT ile ikame edildiğinde, özellikle boşluk doldurma etkisiyle betonun mekanik özelliklerini geliştirmede etkili olduğu tespit edilmiştir (Ergün, 2011). Ancak, AMT alkali-reaktif olduğundan, beton matrislerine katılmaları önemli kısıtlamalar getirmektedir ve betona ağırlıkça %10'dan fazla eklenememektedir (Kamseu ve diğ.,

2021b). Portland çimentolu harca %10'dan daha fazla AMT eklediğinde, malzemenin eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında azalma olduğu tespit edilmiştir (Sharma ve Kumar, 2015; Alyousef ve diğ., 2019). Bir diğer araştırmada, AMT'nun %20 oranına kadar çimento içerisinde kullanıldığında etrenjit oluşumu nedeniyle basınç dayanımında azalmaya yol açtığı belirlenmiştir (Kechagia ve diğ., 2021).

AMT'nun jeopolimer bağlayıcı üretiminde bir alüminosilikat hammadde kaynağı ya da dolgu maddesi olarak kullanımına yönelik araştırmalar da literatürde mevcuttur (Wang ve diğ., 2011; Colangelo ve diğ., 2018; Simão ve diğ., 2020; Komnitsas ve diğ., 2021; Kamseu ve diğ., 2022; Tekin, 2016). Yüksek fırın cürufu esaslı jeopolimerlerin üretiminde agrega olarak mermer ve granit atıklar değerlendirmiştir (Wang ve diğ., 2011). Elde edilen sonuçlara göre, AMT jeopolimer matris ile daha güçlü bir ara yüzey oluşturduğundan matris ve agrega arasındaki aderansı granit esaslı numunelere nazaran arttırmıştır. Metakaolin esaslı ve EPS agrega içeren jeopolimer ısı yalıtım malzemesinin kuruma rötresini azaltmak amacıyla, dolgu maddesi olarak, AMT kullanım olanakları değerlendirilmiştir (Colangelo ve diğ., 2018). Araştırma sonucunda, AMT'nun (metakaolin:mermer ağırlıkça 41,6:7,5) malzemenin mekanik özelliklerini arttırdığı ve kuruma rötresini azalttığı tespit edilmiştir. Bir diğer araştırmada, metakaolin esaslı jeopolimer çeşitli oranlarda (metakaolin:mermer ağırlıkça 3:1, 1:1, 1:3 ve 1:9) AMT ile ikame edilmiştir. AMT, malzeme bünyesinde sadece bir dolgu etkisi yapmamış, aynı zamanda daha iyi gelişmiş bir jeopolimer jel yapısının oluşumunu sağlamıştır. Böylece, yalnızca metakaolin esaslı jeopolimere nazaran daha yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir (Simão ve diğ., 2020). Bir diğer araştırmada, NaOH ve sodyum silikat karışımıyla aktive edilmiş metakaolin esaslı jeopolimer çeşitli oranlarda (metakaolin:mermer ağırlıkça 1:0,3, 1:0,7, 1:1,5) AMT ile karıştırılmıştır. Yalnızca metakaolin esaslı jeopolimer daha yüksek (37,3 MPa) basınç dayanımına sahip olmasına rağmen, 0,3 oranında AMT içeren numunelerin basınç dayanımının (30,1 MPa) bu değere yakın olmasının hibrit sodyum-kalsiyum-alüminyum-silikat hidrat (N-C-A-S-H) fazı oluşumundan kaynaklandığı belirtilmiştir (Komnitsas ve diğ., 2021). Pirinç kabuğu külü esaslı jeopolimer bağlayıcı AMT ile karıştırarak faz değişimi ve içyapı gelişimi araştırılmıştır. Çalışma sonucuna göre, C-S-H (mermerin reaksiyonundan kaynaklanan) ve N-A-S-H (jeopolimerleşme reaksiyonlarından kaynaklanan) matrisleri karıştırıldığında, ortaya çıkan jeopolimer, N-C-A-S-H (sodyum-kalsiyum-alüminyum-silikat hidrat) kimyasal formülüne sahip ve amorf ve kristal fazlar içeren bir yapıdadır (Kamseu ve diğ., 2022).

Literatür araştırmalarından yola çıkılarak, AMT'nun jeopolimer malzeme teknolojisinde alüminosilikat kaynağı, dolgu malzemesi ve agrega olarak kullanım olanakları bulunduğu anlaşılmaktadır. Ancak, araştırmalar daha çok yüksek fırın cürufu, metakaolin, pirinç kabuğu külü gibi yapay puzolan esaslı jeopolimerlerde AMT'nun değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Doğal puzolan esaslı AMT katkılı bir araştırmada bulunmaktadır (Tekin, 2016). Ancak, bu araştırmada alüminosilikat kaynağı olarak traverten ve volkanik tüf kullanılmış ve alkali aktivatör olarak yalnızca NaOH kullanım olanakları değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın amacı ise, yalnızca volkanik tüf esaslı doğal puzolanın sodyum silikat ve potasyum hidroksit kombinasyonu ile aktive edilmesiyle üretilen bağlayıcının özellikleri üzerinde farklı oranlarda AMT ikamesinin etkinliğini belirlemektir. Çalışmada, doğal puzolan esaslı jeopolimer üretimi için ülkemiz yerel hammadde kaynağı olan volkanik tüf (Datça Puzolanı) değerlendirilmektedir. Böylece, bir bağlayıcı malzemenin sürdürülebilirliği üzerinde nadiren dikkate alınan kilit unsurlardan biri olan “yerel hammadde kullanımı” çalışmanın odak noktası olarak belirlenmiştir ve araştırmanın özgün değerini teşkil etmektedir.

2. MALZEME VE METOT

2.1. Kullanılan Hammaddeler

Datça Yarımadası'nda Knidos Antik Kenti ile doğusundaki Çeşmeköy-Cumalı arasındaki bölgede yerel halk tarafından “aktoprak” ya da “akkum” olarak adlandırılan ve bağlayıcılık

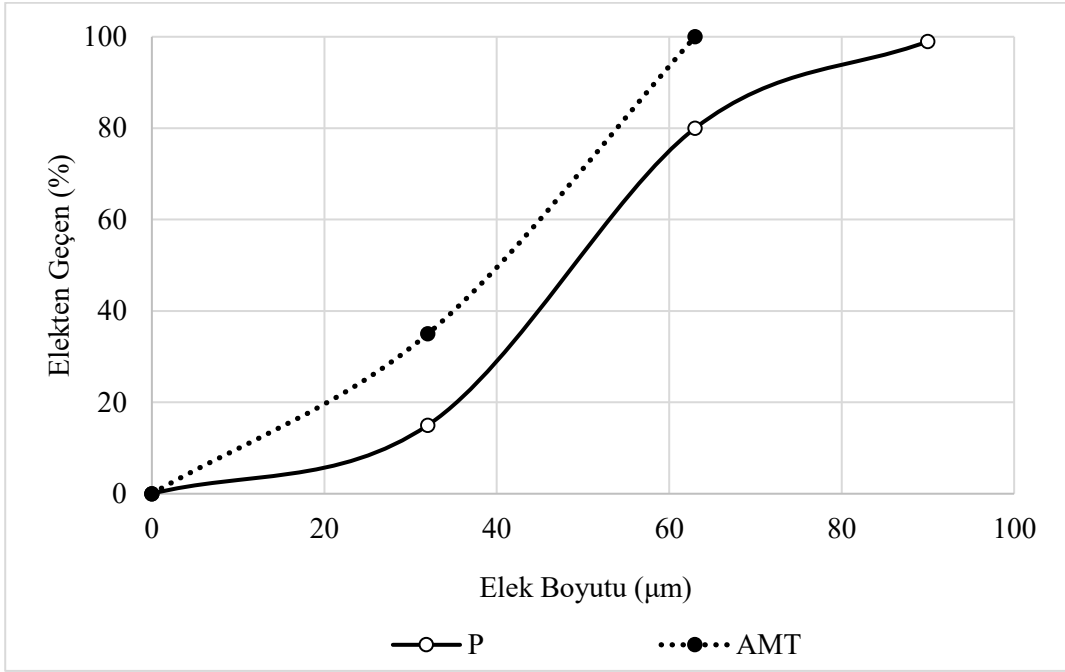
özelliği belirlenen (Akgül, 2006) volkanik tuf (Şekil 1a), jeopolimer bağlayıcı üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu sarımsı gri renkteki volkanik tufün özgül ağırlığı 2.52 g/cm^3 'tür. Malzeme, içindeki nemin uzaklaştırılması amacıyla Memmert Marka havalandırılmalı etüvde 70°C 'de kurutulmuştur. Daha sonra, bilyalı değirmende öğütülmüş, $90 \mu\text{m}$ elekten elenmiş ve polietilen (PE) kaplanarak muhafaza edilmiştir (Şekil 1b). Bu volkanik tufün puzolanik özeliğe olduğunu belirlemek amacıyla TS 25 (2008) uyarınca puzolanik aktivite deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri (sırasıyla 1.43 and 6.12 MPa), standartta belirtilen minimum gereksinimleri karşıladığından, puzolanik bir malzeme olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1:

(a) Datça Puzolanı'nın doğadaki hali; (b) Öğütülmüş haldeki Datça Puzolanı (P); (c) Atık mermer tozu (AMT); (d) Potasyum hidroksit (KOH); (e) Sodyum silikat (SS); (f) $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ jeopolimer bağlayıcı numuneleri

AMT, çamur halinde İstanbul'da bulunan bir mermer kesim atölyesinden temin edilmiştir. Parlak beyaz renge sahip AMT etüvde 70°C 'de sabit ağırlığa ulaşmaya kadar 48 saat süreyle kurutulmuş, elekten elenmiş ve PE kaplanarak muhafaza edilmiştir (Şekil 1c). P ve AMT'nun tanecik boyutu dağılımı elek sarsma makinesiyle gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Şekil 2'de verilmektedir. Buna göre P'nin en büyük tanecik boyutu $90 \mu\text{m}$ ve AMT'nun en büyük tanecik boyutu $63 \mu\text{m}$ 'dur.



Şekil 2:

P ve AMT'nin elek analizi

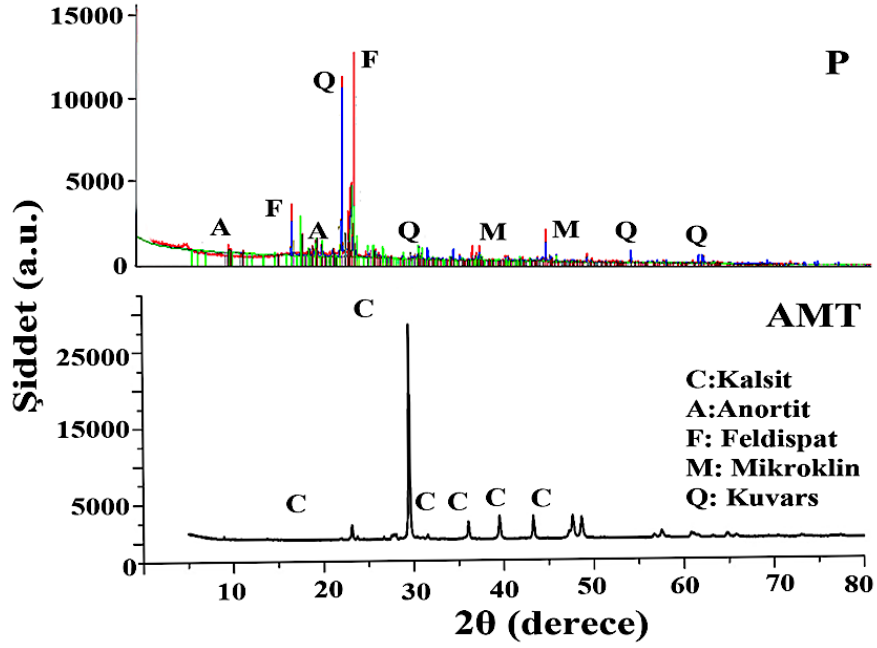
P ve AMT'nun yarı kantitatif element (X-ray floresan spektrometre-XRF) analizi sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre, P alkali aktivasyon için gereken silisyum ve alüminyum (ağırlıkça %75,29 SiO₂ ve %15,99 Al₂O₃) kaynağı iken, AMT, beklendiği gibi, yüksek CaO içeriğine sahiptir (ağırlıkça %55,7 CaO).

Tablo 1. P ve AMT'nun yarı kantitatif element (XRF) analizi sonuçları

Bileşim	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
P	75,29	15,99	0,98	1,22	0,62	0,07	3,02	2,21	0,14	0,1
AMT	0,22	0,10	-	55,7	0,21	-	-	-	-	-
Bileşim	MnO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	CuO	ZnO	Rb	SrO	Diğ.	KK	Toplam
P	0,04	0,005	0,004	0,002	0,002	0,006	0,015	0,136	0,15	100
AMT	-	-	-	-	-	-	-	-	43,77	100

“Diğ.” Diğer bileşimleri, “KK” Kızdırma kaybını sembolize etmektedir.

P ve AMT'nun kalitatif faz (XRD) analizi Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre, puzolanda kuvars, anortit, feldspat ve mikroklin gibi amorf yapı gösteren bileşikler, AMT'da ise kristal yapılı kalsit bileşiği bulunmaktadır.



Şekil 3:

P ve AMT'nun kalitatif faz (XRD) analizi sonuçları

Jeopolimerizasyon reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi için alkali aktivatör olarak %99 saflığa sahip katı potasyum hidroksit (KOH) (Şekil 1d) ve sıvı sodyum silikat ($\text{Na}_2\text{SiO}_3=\text{SS}$) (Şekil 1e) çözeltileri Merck Kimya'dan temin edilmiştir. Datça Puzolanı'nın jeopolimerleşme özelliğinin araştırıldığı bir önceki çalışmada (Barış, 2022) en yüksek mekanik özellikleri sağlamasından dolayı SS ve KOH çözeltileri birlikte kullanılmıştır. 7,5 molar (M) konsantrasyona sahip KOH çözeltisi kullanılmadan 24 saat önce deiyonize suda çözülerek kapalı bir kap içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Sıvı haldeki SS çözeltisi %7,5 Na_2O , %25,5 SiO_2 ve %67 H_2O 'dan oluşmaktadır.

2.2. Karışım Oranları

Karışımlar hazırlanırken puzolan:alkali aktivatör, SS:KOH (aktivatör oranı) ve su:toplam katı madde oranları sırasıyla ağırlıkça 1:0,3, 2,5:1 ve 0,5:1 olarak sabit tutulmuştur. Su:toplam katı madde oranı Xie ve Kayalı (2014)'e göre hesaplanmıştır. "Su", aktivatör çözeltilerinin içerisinde bulunan çözelti suyunun ve karıştırma sırasında işlenebilirliği sağlamak için eklenen ekstra suyun toplamını ifade etmektedir. "Katı maddeler" ise katı fazdaki (P ve AMT) malzemelerin ve alkali aktivatörlerin bileşimindeki katı kısımların (Na_2O ve SiO_2) toplamını ifade etmektedir.

Doğal puzolan esaslı jeopolimer malzemenin özellikleri üzerinde AMT ikamesinin etkilerini araştırmak amacıyla P:AMT oranı 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 ve 0:100 olan karışımlar hazırlanmıştır. AMT içermeyen numune (100:0), kontrol numunesi olarak kabul edilmiştir.

2.3. Üretim ve Kür Koşulları

Hammaddelerin hazırlanması, karışımların oluşturulması ve deneylerin gerçekleştirilmesi işlemleri $22\pm 2^\circ\text{C}$ ve $\%55\pm 5$ bağıl nemli ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Karışımlar hazırlanırken ilk olarak katı hammaddeler, elektrikli bir harç karıştırıcısı yardımıyla 60 rpm hızla 5 dakika karıştırılmıştır. Ardından, alkali aktivatörler ve su, bu kuru karışıma kademeli olarak eklenmiş ve homojen bir bağlayıcı elde edilene kadar 100 rpm hızla 10 dakika daha karıştırılmıştır. Üretilen taze haldeki karışım $40\times 40\times 160$ mm prizmatik çelik kalıplara yerleştirildikten sonra, karışım suyunun buharlaşarak hızlıca bağlayıcı yapısından ayrılması

için kalıplar PE kaplanmıştır. Numuneler PE kaplı halde ve kalıp içerisinde 70°C’de 24 saat etüv kürüne tabi tutulmuştur. 24 saat sonra etüvden çıkarılan numuneler (Şekil 1f) 22±2°C ve %55±5 bağıl nemli ortam koşullarında 7 ve 28. güne kadar bekletilerek fiziksel ve mekanik deneyler 7. ve 28. gün gerçekleştirilmiştir.

Üretilen numuneler “xP:yAMT” formatında kodlanmıştır. Bu kodlamada “P” puzolanı, “x” ağırlıkça puzolan oranını, “AMT” atık mermer tozunu ve “y” ağırlıkça atık mermer tozu oranını sembolize etmektedir. Örneğin, 75P:25AMT kodlu numune ağırlıkça %75 puzolan ve %25 mermer tozundan oluşan karışımı betimlemektedir.

2.4. Uygulanan Deneyler

Numunelerin birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) TS EN 1015-10 (2001) ve atmosferik basınç altındaki su emme oranı TS EN 13755 (2014) standartlarına uygun olarak tespit edilmiştir. Numunelerin porozitesi Denklem-1 uyarınca tespit edilmiştir.

$$P = [1 - (\Delta/\rho)] \times 100 \quad (1)$$

(Δ) ve (ρ) sırasıyla numunenin birim hacim ağırlığını ve özgül ağırlığını sembolize etmektedir (g/cm^3). Özgül ağırlık, boşluksuz haldeki malzemenin birim hacminin kütlesidir ve TS 699 (2009)’a uygun olarak tespit edilmiştir.

Numunelerin dinamik ultrases hızı Proceq marka ultrases ekipmanı kullanılarak TS EN 14579 (2006)’a uygun olarak tespit edilmiştir. Tahribatsız bir deney olarak ultrases hızı testi, yüzeye bağlı bir dönüştürücü (yayıcı) prob kullanılarak periyodik darbelerle ultrases dalgalarının ($2 \times 10^4 \pm 10^3$ Hz) malzemeye gönderilmesi prensibine dayanmaktadır. Malzemenin içinden geçtikten sonra, dalgalar alıcı prob tarafından toplanır. Ultrases hızı, ortam sıcaklığından, malzemenin mineralojik bileşimden, yoğunluğundan, malzeme içindeki çatlaklardan, heterojenlikten ya da süreksizlikten etkilenir. Ultrases hızı Denklem 2 uyarınca hesaplanmıştır:

$$V = l/t \quad (2)$$

(l) yayıcı ve alıcı problar arasına yerleştirilmiş olan numunenin boyu (m) ve (t) numuneden ultrasesin geçmesi sırasındaki süre (μs)’dir.

Jeopolimer malzemelerin boşluk yapısı özellikleri belirlenirken tespit edilmesi gereken temel parametreleri porozite, en büyük boşluk boyutu, boşluk boyutu dağılımı ve homojenlik olarak sınıflandırmak mümkündür (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021). Boşluk yapısı özellikleri malzemenin yoğunluğu, dayanım gelişimi, su emme oranı, ısıl ve akustik özelliklerini belirlemektedir. Özellikle, 10 μm ’dan daha büyük makro ölçekli boşluklar bu temel özellikleri belirlemede anahtar rol oynamaktadır (Cui ve diğ., 2018). Bundan dolayı, çalışmada üretilen numunelerin makro ölçekli boşluk yapısını belirlemek için numunelerin ince kesiti hazırlanmıştır. İnce kesit hazırlama işlemi sırasında numuneler öncelikle elektronik bir taş kesme makinesi kullanılarak 40x40x10 mm kalınlıkta kesilmiştir. Kesilen bölümlerin yüzeyi düzeltme diski üzerinde inceltilerek temiz ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Daha sonra, bu bölümler 1 mm kalınlığındaki camın üzerine iki bileşenli şeffaf epoksi kullanılarak yapıştırılmış ve düzeltme diskinde 600 mesh zımpara ile zımparalanarak 30 μm kalınlığa kadar inceltilmiştir. Hazırlanan ince kesitlerin mikroskopik görüntüleri Nikon LV 100 Pol Marka optik mikroskop yardımıyla (10 \times) alınmıştır. Daha sonra, bu görüntülerdeki boşluk yapısı özellikleri Image-Pro Plus yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Her bir numuneye ait boşluk yapısı özellikleri (boşluk sayısı, en büyük boşluk boyutu, boşluk boyutu dağılımı ve homojenlik) 500 ölçüm sonucundan elde edilmiştir. Boşluk boyutları eşdeğer daire çapı ile ölçülmüş ve Denklem 3 ile hesaplanmıştır (Prud’homme ve diğ., 2015):

$$\text{Deşdeğer} = 2 \times \left(\frac{Spi}{\pi}\right)^{1/2} \quad (3)$$

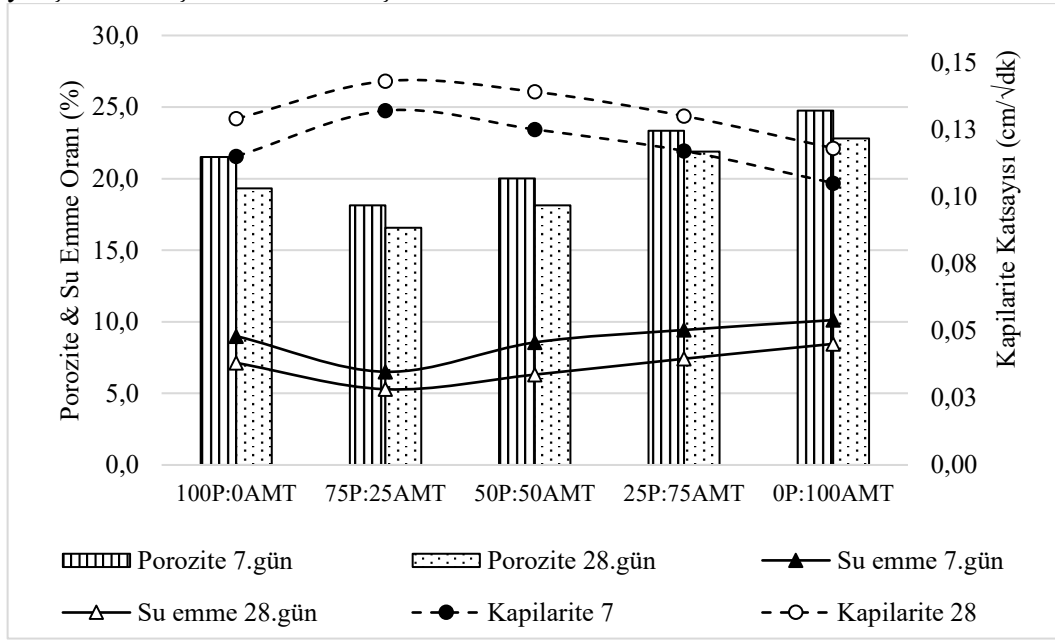
(Deşdeğer) eşdeğer daire çapı (μm) ve (Spi) boşluğun ölçülen yüzey alanıdır (μm^2).

Numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri TS EN 196-1 (2016)'e uygun olarak 100 kN kapasiteli Universal Deney Makinesiyle ($0,5 \text{ N/mm}^2$ sabit hızla) tespit edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

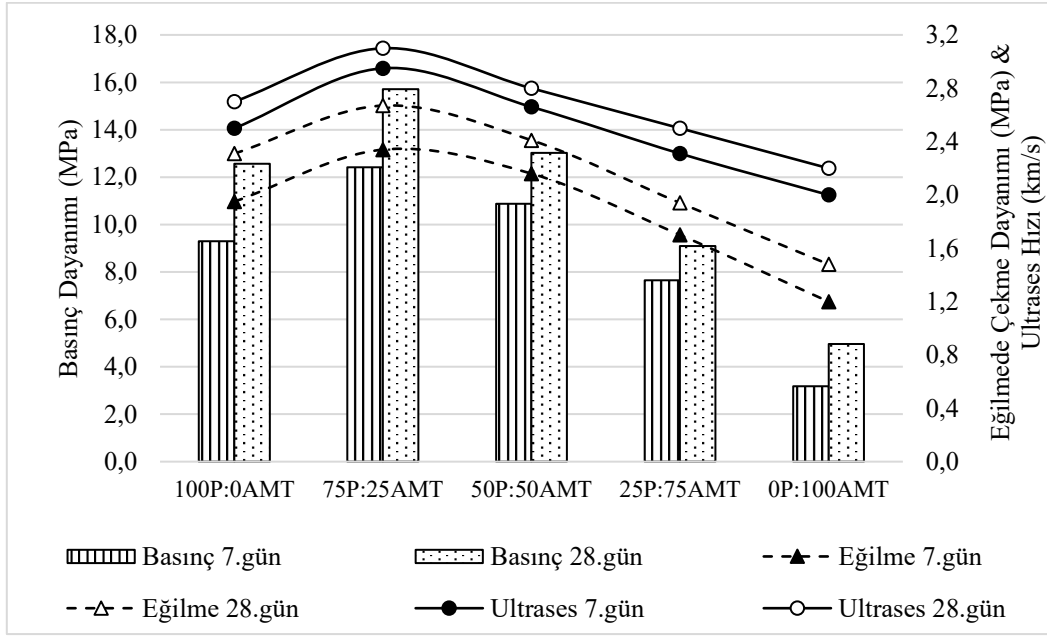
3.1. Puzolan:Atık Mermer Tozu Oranının İncelenen Özellikler Üzerindeki Etkisi

Farklı P:AMT oranlarına sahip numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4:

Farklı P:AMT oranlarına göre jeopolimer numunelerin fiziksel özellikleri



Şekil 5:

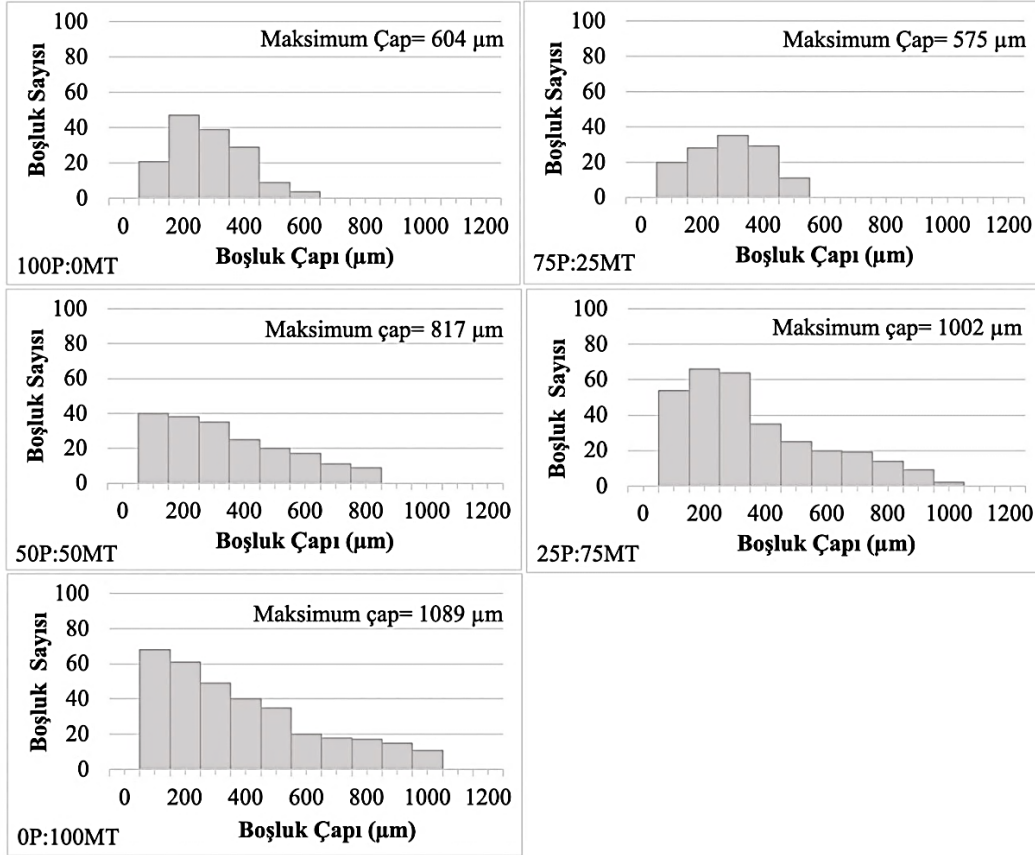
Farklı P:AMT oranlarına göre jeopolimer numunelerin mekanik özellikleri

Alüminosilikat kaynağı olarak yalnızca doğal puzolan kullanıldığında üretilen kontrol numunesi (100P:0AMT) 7. günde %21,5 porozite, %9,00 su emme oranı, 0,115 cm/ $\sqrt{\text{dk}}$ kapilarite katsayısı, 2,50 km/s ultrases hızı, 1,95 MPa eğilmede çekme ve 9,31 MPa basınç dayanımına sahiptir. Jeopolimerleşme reaksiyonları üç aşamalı olarak gelişmektedir. Birinci aşamada, alkali aktivatördeki OH⁻ iyonları, silis ve alümin içeren alüminosilikat kaynağındaki Si-O-Si bağlarını çözerek silanol (Si-OH) ve sialat (Si-O⁻) bileşenleri meydana getirir. Bu OH⁻ iyonları, Si-O-Al bağlarını da aynı şekilde çözer. İkinci aşamada, çözülmüş ürünler birbirine temas ederek topaklanmış bir yapı oluşur. Silis monomerleri arasında dimer oluşmaya başlar ve dimerler birbirleriyle birleşir. Polikondansasyon aşamasında ise, bir önceki aşamada yoğunlaşan dimerler büyüyerek üç boyutlu amorf N-A-S-H jelini (ya da alkali alüminosilikat hidrat jelini) meydana getirir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015). Yani, bu araştırmada %100 puzolandan üretilen karışımların temel bağlayıcısı üç boyutlu amorf yapı N-A-S-H jelidir ve sonuç özelliklerin elde edilmesinden sorumludur. Diğer yandan, puzolanın %25 oranında AMT ile ikame edilmesiyle (75P:25AMT), 7 günlük porozite 0,84 kat ve su emme oranı 0,72 kat azalmıştır. Kapilarite katsayısında tespit edilen 1,16 kat artış, bağlayıcının içyapısındaki boşlukların daha dar ve birbirleriyle daha fazla bağlantılı hale gelmesinden dolayı kapiler basıncın arttığını ifade etmektedir. %25 AMT ikamesiyle fiziksel özelliklerde tespit edilen değişimler bağlayıcının strüktürel olarak geliştiğini göstermiştir ve bu durum mekanik özelliklere de yansımıştır. 75P:25AMT numunelerinin ultrases hızı, eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri, kontrol numunesinin özelliklerine nazaran sırasıyla 1,18, 1,20 ve 1,34 kat artmıştır. En yüksek ultrases hızı (2,95 km/s), eğilmede çekme (2,34 MPa) ve basınç dayanımı (12,42 MPa), %75 doğal puzolan ve %25 AMT'dan üretilen (75P:25AMT) numuneye aittir. Doğal puzolanın %25 AMT ile ikame edilmesi, mermerin ana bileşeni kalsit (CaCO₃) olduğundan, karışımdaki Ca⁺² miktarının artmasına yol açmıştır. Literatür verileri, alkali koşullar altında kalsitin de reaktif olduğunu göstermektedir (Locat ve diğ., 1991; Palmero ve diğ., 2017). Jeopolimerleşmenin birinci aşaması olan çözünme sırasında, yukarıda anlatılan reaksiyonlara ek olarak, kalsiyumca zengin AMT'dan Ca⁺² iyonları çözünmektedir. Polikondansasyon sırasında ise, N-A-S-H jelinde bulunan Na iyonlarıyla çözülmüş olan bu Ca⁺² iyonları yer değiştirmekte ve bunun sonucunda katı halde (N,C)-A-S-H jeli oluşmaktadır. N-A-S-H ve (N,C)-A-S-H jellerinin aynı jeopolimerik yapıda bir arada bulunması daha yüksek dayanım gelişiminin ana etkenidir ve daha yüksek

mekanik özelliklerin elde edilmesini doğrular niteliktedir (Simão ve diğ., 2020; Komnitsas ve diğ., 2021). Yani, kalsitçe zengin kristal yapı AMT kullanımı, farklı bir jeopolimer jel yapısı oluşumuna imkân vermektedir. Ayrıca, yapıda reaksiyona girmemiş halde bulunan ve Datça Puzolanı'na nazaran daha ince tanecik boyutu dağılımına sahip olan CaCO_3 'ün de jeopolimer bağlayıcı yapısında mikro-dolgu etkisi yaptığı düşünülmektedir. Ancak, elde edilen jeopolimer jel içerisindeki faz gelişimini tam olarak tespit edebilmek için XRD, FTIR ve SEM analizleriyle daha derinlemesine araştırma yapılması gerekmektedir.

Puzolanın %50 ve daha yüksek oranlarda AMT ile ikame edilmesiyle (50P:50AMT, 25P:75AMT, 0P:100AMT), fiziksel ve mekanik özelliklerdeki gelişim tam tersine dönmüştür. 7 günlük porozite ve su emme oranının artışına bağlı olarak bağlayıcının mekanik özellikleri kademeli olarak azalmıştır. 7 günlük en yüksek porozite ve su emme oranı (sırasıyla %24,75 ve %10,12) ve en düşük kapilarite katsayısı, ultrases hızı, eğilmede çekme ve basınç dayanımları (sırasıyla 0,105 cm $\sqrt{\text{dk}}$, 2,00 km/s, 1,20 MPa ve 3,18 MPa) %100 AMT'dan üretilen (0P:100AMT) numunede elde edilmiştir. Jeopolimer malzemelerin bileşiminde yüksek oranda amorf silis ve alümin bulunması durumunda yukarıda açıklanan reaksiyonların daha iyi gelişmesine bağlı olarak daha yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir (Tchadjie ve Ekolu, 2018). %100 AMT'dan üretilen numunelerde tespit edilen en düşük mekanik özellikler, kalsitçe zengin kristal yapı AMT'daki silis ve alümin oranının çok düşük olmasından dolayı (Tablo 1) alkali aktivasyonun tam olarak gerçekleşmemesine bağlı olabilir.

Jeopolimer bağlayıcılara ait Image-Pro Plus yazılımı kullanılarak tespit edilen makro ölçekli (>10 μm) boşluk yapısı özellikleri (boşluk sayısı, en büyük boşluk boyutu, boşluk boyutu dağılımı ve homojenlik) Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6:

Farklı P:AMT oranlarına göre jeopolimer numunelerin makro ölçekli boşluk yapısı özellikleri

Şekil 6'ya göre, bütün numunelerin boşluk çapı 76-1089 µm (0,076-1,089 mm) aralığında değişmektedir. Yalnızca doğal puzolandan oluşan referans numunesinin (100P:0AMT) en büyük boşluk çapı 604 µm'dir ve boşluk boyutu dağılımı dar bir aralıkta yer almaktadır. Puzolanın %25 oranında AMT ile ikame edilmesiyle üretilen 75P:25AMT numunesi en az boşluk sayısına, en dar maksimum boşluk çapına (575 µm) ve en dar boşluk boyutu dağılımı aralığına sahiptir. Bu sonuç, söz konusu numunenin en düşük poroziteye sahip olduğu bulgusuyla örtüşmektedir. Boşluk boyutu dağılımının daha dar bir aralıkta yer almasıyla, malzeme bünyesinin boşluk morfolojisi bakımından daha fazla homojenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Yani, ideal P:AMT oranında (75P:25AMT) daha iyi gelişen jeopolimerleşme reaksiyonları, daha az boşluklu, daha kompakt ve yoğun bir malzeme bünyesinin oluşumunu ve daha yüksek mekanik özelliklerin gelişimini sağlamıştır. Diğer yandan, AMT oranının kademeli olarak artırılması (50P:50AMT, 25P:75AMT ve 0P:100AMT), boşluk sayısının artmasına, en büyük boşluk çapının 1089 µm'a kadar artmasına ve boşluk boyutu dağılımının daha geniş bir aralıkta yer almasına, yani malzeme bünyesinde daha heterojen bir boşluk morfolojisi oluşmasına yol açmıştır. Bu sonuç ise, AMT oranı yüksek olan numunelerin en yüksek poroziteye ve buna bağlı olarak en düşük mekanik özelliklere sahip olmasıyla uyumludur. Yani, AMT oranı yüksek olan numunelerde, mermer bileşimindeki silis ve alümin yetersizliği nedeniyle daha düşük reaktiviteye sahip olduğundan, jeopolimerleşme reaksiyonları daha kısıtlı kalmıştır. Bunun sonucunda, bünyede reaksiyona girmemiş öncül maddeler kalarak ve daha boşluklu bir içyapı oluşmuş ve daha zayıf bir strüktürel gelişim tespit edilmiştir. Bu sonuç literatürde yer alan diğer araştırma sonuçlarıyla da uyumludur (Komnitsas ve diğ., 2021).

3.2. Kür Süresinin İncelenen Özellikler Üzerindeki Etkisi

Çalışmada üretilen numuneler PE kaplı halde ve kalıp içerisinde 70°C'de 24 saat etüv kürüne tabi tutulmuştur. 24 saat sonra etüvden çıkarılan numuneler, 22±2°C ve %55±5 bağıl nemli ortam koşullarında 7 ve 28. güne kadar kürlenmiştir. Farklı P:AMT oranlarına sahip numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin 7 ve 28 günlük kür süresine bağlı olarak değişimleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te ifade edilmiştir. Buna göre, bütün numunelerde kür süresinin 7. günden 28. güne arttırılmasıyla porozite ve su emme oranları sırasıyla 0,88-0,94 ve 0,70-0,84 kat azalmıştır. Kapilarite katsayısında tespit edilen 1,08-1,17 kat artıştan, artan kür süresiyle bağlayıcının içyapısındaki boşlukların daha dar hale geldiği anlaşılmaktadır. Fiziksel özelliklerdeki gelişime bağlı olarak numunelerin ultrases hızı, eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 1,09-1,16, 1,17-1,27 ve 1,23-1,59 kat artmıştır. Buradan farklı kür koşulları ile farklı seviyelerde kür verimliliği sağlandığı ve jeopolimer bağlayıcının daha uzun süre kürlenmesinin içyapı gelişimini desteklediği anlaşılmaktadır.

3.3. Araştırma Bulgularının Literatür Verileriyle Karşılaştırmalı Olarak İrdelenmesi

Farklı P:AMT oranlarına sahip numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımları çeşitli alüminosilikat kaynaklarından ve AMT'dan üretilen ve benzer koşullarda kürlenmiş jeopolimerler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2). Bu karşılaştırmaya göre, %75 Datça Puzolanı ve %25 AMT'dan üretilen ve en yüksek mekanik özelliklere sahip olan 75P:25AMT numunelerin sahip olduğu eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri (sırasıyla 2,67 ve 15,71 MPa), literatürde yer alan CaCO₃-esaslı doğal taş tozu içeren numunelere nazaran (Akturk ve diğ., 2023) daha düşük; %50 AMT içeren uçucu kül esaslı jeopolimerle (Ionescu ve diğ., 2023); bir diğer çalışmada %30 AMT içeren uçucu kül esaslı jeopolimer malzemeyle (Alharthy ve diğ., 2022); %13 AMT içeren metakaolin esaslı jeopolimerle (Komnitsas ve diğ., 2021); %60 AMT içeren traverten ve Bayburt volkanik tüfü esaslı jeopolimerle (Tekin, 2016) yakın değerlerdir. Diğer yandan, çalışmada elde edilen mekanik özellikler literatürdeki %10-30 oranında AMT içeren metakaolin esaslı (Kaya ve diğ., 2022) ve %30-70 oranında AMT içeren metakaolin esaslı (Cwirzen ve diğ., 2014) jeopolimerlerin özelliklerine nazaran daha yüksektir. Buradan, ülkemiz yerel hammadde kaynaklarıyla üretilen doğal Datça Puzolanı esaslı jeopolimer malzemenin literatürde geliştirilmiş olan jeopolimerlerle uyumlu olduğu ve çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı anlaşılmaktadır.

Tablo 2. AMT içeren Datça Puzolanı esaslı jeopolimer malzemenin mekanik özelliklerinin literatür verileriyle karşılaştırılması

Referans	Alüminosilik at kaynağı	Atık hammadd e türü	Alkali aktivatör türü ve molaritesi	İkame oranı (% ağırlıkça)	Kür koşulu	Eğilmed e çekme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)
Ionescu ve diğ., (2023)	Uçucu kül	AMT	SS + 8 M NaOH	10	70°C, 24 saat	3,3	28,8
				25		2,3	26,8
				50		0,7	15,0
Alharthy ve diğ., (2022)	Uçucu kül	AMT	SS + 10 M NaOH	10	60°C, 72 saat	-	5,9
				30		-	14,7
				50		-	10,3
Kaya ve diğ., (2022)	Metakaolin	AMT	8, 10 ve 12 M NaOH	10	80°C, 24 saat	1,2	6,5
				20		1,4	7,2
				30		1,9	7,9
Cwirzen ve diğ., (2014)	Metakaolin	AMT	3 ve 5 M NaOH	30	80°C, 24 saat	-	4,5
				50		-	4,1
				70		-	3,0
Komnitsas ve diğ., (2021)	Metakaolin	AMT	SS + 6, 8 ve 10 M NaOH	13	90°C, 24 saat	-	15,5
				25		-	12,0
				37		-	7,5
Akturk ve diğ., (2023)	Metakaolin	CaCO ₃ - esaslı doğal taş	SS + 8, 10 ve 12 M NaOH	10	60°C, 24 saat	12,9	64,0
				20		11,2	58,6
				30		11,0	56,1
Tekin (2016)	Traverten, Volkanik tüf	AMT	1, 5 ve 10 M NaOH	20	75°C, 24 saat	-	35,9
				40		-	24,2
				60		-	15,7
				80		-	12,8
Bu araştırma	Volkanik tüf (Datça, Türkiye)	AMT	SS + 7.5 M KOH	25	70°C, 24 saat	2,67	15,71
				50		2,41	13,03
				75		1,94	9,10
				100		1,48	4,96

4. SONUÇ

Çeşitli oranlarda AMT içeren doğal puzolan esaslı jeopolimer malzeme geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıları farklı oranlarda AMT ile karıştırmak bağlayıcının fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir.
- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının en yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere imkân veren karışım oranı %75 P ve %25 AMT'dan oluşmaktadır. Söz konusu karışımın en dar maksimum boşluk çapına ve en dar boşluk boyutu dağılımı aralığına sahip olması, jeopolimerleşme reaksiyonlarının daha iyi geliştiğini ve malzeme bünyesinin yoğun, kompakt ve homojen olduğunu göstermektedir.
- %75 P ve %25 AMT'dan oluşan ideal karışım oranında kapilarite katsayısının artması ve böylece kapiler boşluklardan suyun yer çekimine zıt yönde ilerlemesi sonucunda, donma çözülme etkisiyle çatlama ya da suda çözünen tuzların yüzeyde birikmesi nedeniyle çiçeklenme gibi çeşitli durabilite sorunlarına yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.
- AMT oranı daha yüksek olan karışımlar daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Bu durum, mermerin bileşimindeki silis ve alümin oranının düşük olması nedeniyle alkali aktivasyonun tam olarak gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır.
- AMT oranı yüksek olan numuneler daha fazla boşluklu ve en büyük boşluk çapına sahiptir. Bu numunelerde boşluk boyutu dağılımı daha geniş bir aralıkta yer aldığından heterojen bir malzeme bünyesi elde edilmektedir.
- Datça Puzolanı esaslı ve AMT içeren jeopolimer malzemenin mekanik özellikleri literatürde yer alan yapay puzolan esaslı araştırmaların mekanik özelliklerine yakın ya da daha yüksektir. Bu bağlamda, söz konusu araştırmanın bilimsel literatür içerisindeki yeri önemlidir.
- Datça Puzolanı ile geliştirilen malzemenin literatürde beklenen performans kriterlerini sağlaması, makalenin giriş bölümünde önemi özellikle vurgulanan “yerel hammadde kullanımı ve sürdürülebilirlik ilişkisini” desteklemektedir. Ayrıca, çevre sorunlarına yol açan AMT'nun bağlayıcı içerisinde değerlendirilmesiyle, ülkemizde atık problemi yaratan malzemelerden birinin azaltılmasına katkı sağlanabilmektedir.
- Farklı AMT oranına sahip jeopolimer jellerin yapısındaki faz gelişimini tam olarak tespit edebilmek için XRD, FTIR ve SEM analizlerinin ileriki araştırmalarda gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Kübra Ekiz BARIŞ; çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, deneysel çalışma programının yürütülmesi, verilerin analizi ve yorumlanması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi.

KAYNAKLAR

1. Akgül, E. (2006) Datça bölgesindeki volkanik tüflerin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
2. Akturk, M., Turk, F., Topcu I. B. and Keskin, U. S. (2023) Heated stone powder substitute for metakaolin-based geopolymer, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-14. Doi: 10.1080/19648189.2023.2247052
3. Alharthy, S. E., Hodhod, O. A. and Abdelkadir, B. A. (2022) Developing a geopolymer pastes using marble dust, *Water Science*, 36(1), 144-153. doi:10.1080/23570008.2022.2152173
4. Alyousef, R., Benjeddou, O., Soussi, C., Khadimallah, M. A. and Mustafa Mohamed, A. (2019) Effects of incorporation of marble powder obtained by recycling waste sludge and limestone powder on rheology, compressive strength, and durability of self- compacting concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 4609353. <https://doi.org/10.1155/2019/4609353>
5. Barış, K. E. (2022) Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
6. Colangelo, F., Roviello, G., Ricciotti, L., Ferrándiz-Mas, V., Messina, F., Ferone, C. and Cheeseman, C. R. (2018) Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer composites, *Cement and Concrete Composites*, 86, 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.016>
7. Cui, Y., Wang, D., Zhao, J., Li, D., Ng, S. and Rui, Y. (2018) Effect of calcium stearate-based foam stabilizer on pore characteristics and thermal conductivity of geopolymer foam material, *Journal of Building Engineering*, 20, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.06.002>
8. Cwirzen, A., Provis, J. L., Penttala, V. and Habermehl-Cwirzen, K. (2014) The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers, *Construction and Building Materials*, 66, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.022>
9. Çelik, M. Y. and Sabah, E. (2008) Geological and technical characterisation of Isehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution, *Environmental Management*, 87(1), 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.004>
10. Çelikten, S. ve Atabey, İ. İ. (2021) Farklı silis ve alümin kaynaklarının atık mermer tozu esaslı alkali ile aktive edilmiş harçların özelliklerine etkisi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(2), 396-405. doi:10.21923/jesd.884393
11. Dhasindrakrishna, D. K., Pasupathy, K., Ramakrishnan, S. and Sanjayan, J. G. (2021) Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology, *Cement and Concrete Composites*, 116, 103886. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103886>
12. Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A. and Van Deventer J. S. J. (2007) Geopolymer technology: The current state of the art, *Journal of Material Science*, 42, 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
13. Ergün, A. (2011) Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 25(2), 806-812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>
14. Firdous, R., Stephan, D. and Djobo, J. N. Y. (2018) Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics, *Construction and Building Materials*, 190, 1251-1263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.191>

15. Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A. and Fernández-Jiménez, A. (2015) *An Overview of the Chemistry of Alkali-Activated Cement-Based Binders*, Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, 2, 19-47. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.19>
16. Ionescu B. A., Barbu, A.-M., Lăzărescu, A.-V., Rada, S., Gabor, T. and Florean, C. (2023) The Influence of substitution of fly ash with marble dust or blast furnace slag on the properties of the alkali-activated geopolymer paste, *Coatings*, 13(2), 403. <https://doi.org/10.3390/coatings13020403>
17. Kamseu, E., Alzari, V., Nuvoli, D., Sanna, D., Lancellotti, I., Mariani, A. and Leonelli, C. (2021a) Dependence of the geopolymerization process and end-products to the nature of solid precursors: challenge of the sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 278, 123587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123587>
18. Kamseu, E., Alzari, V., Rosa, R., Nuvoli, D., Sanna, D., Mariani, A. and Leonelli, C. (2021b) Marble wastes recycling: design and synthesis of low-temperature calcium silicate hydrate under various CaO:SiO₂ Ratio and alkalinity, *Materiala*, 20, 10224-10233. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101224>
19. Kamseu, E., Akono, A. T., Rosa, R., Mariani, A. and Leonelli, C. (2022) Valorization of marble powder wastes using rice husk ash to yield enhanced-performance inorganic polymer cements: Phase evolution, microstructure, and micromechanics analyses, *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100461>
20. Kaya, M., Köksal, F., Bayram, M., Nodehi, M., Gencel, O. and Ozbakkaloglu, T. (2022) The effect of marble powder on physico-mechanical and microstructural properties of kaolin-based geopolymer pastes, *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202201010>
21. Kechagia, P., Koutroumpi, D., Bartzas, G., Peppas, A., Samouhos, M., Deligiannis, S. and Tsakiridis, P. E. (2021) Waste marble dust and recycled glass valorization in the production of ternary blended cements, *Science of the Total Environment*, 761, 143224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143224>
22. Komnitsas, K., Soultana, A. and Bartzas, G. (2021) Marble waste valorization through alkali activation, *Minerals*, 11, 46. <https://doi.org/10.3390/min11010046>
23. Locat, J., Berube, M. A. and Choquette, M. (1991) Behavior of common rock-forming minerals in a strongly basic NaOH solution, *The Canadian Mineralogist*, 29, 163-173.
24. Palmero, P., Formia, A., Tulliani, J. M. and Antonaci, P. (2017) Valorisation of aluminosilicate stone muds: From wastes to source materials for innovative alkali-activated materials, *Cement and Concrete Composites*, 83, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.011>
25. Palomo, A., Grutzeck, M. W. and Blanco, M. T. (1999) Alkali-activated fly ashes - A cement for the future, *Cement Concrete Research*, 29 (8), 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
26. Provis, J. L. (2018) Alkali-activated materials, *Cement Concrete Research*, 114, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
27. Provis, J. L. and Van Deventer, J. S. J. (2009) *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing, Cambridge.
28. Prud'homme, E., Joussein, E. and Rossignol, S. (2015) *Alkali-Activated Concrete Binders as Inorganic Thermal Insulator Materials*, Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, 26, 687-728. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.5.687>

29. Sharma, N. and Kumar, R. (2015) Use of waste marble powder as partial replacement in cement sand mix, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(5), 501-504. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS050698>
30. Shi, C., Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A. (2011) New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750-763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
31. Simão, L., Hotza, D., Ribeiro, M. J., Novais, R. M., Montedo, O. R. K. and Raupp-Pereira, F. (2020) Development of new geopolymers based on stone cutting waste, *Construction and Building Materials*, 257, 119525. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119525>
32. Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S. and Bhunia, D. (2017) A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete, *Journal of Building Engineering*, 13, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.07.009>
33. Singh, M., Srivastava A. and Bhunia D. (2019) Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry, *Construction and Building Materials*, 198, 553-569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.005>
34. Tchadjie, L. N. And Ekolu, S. O. (2018) Enhancing the reactivity of aluminosilicate materials toward geopolymer synthesis, *Journal of Materials Science*, 53,4709-4733. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1907-7>
35. Tekin, I. (2016) Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes, *Construction and Building Materials*, 127, 607-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038>
36. TS 25, (2008). Doğal puzolan (tras) - Çimento ve betonda kullanılan - Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
37. TS-699, (2009). Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
38. TS-EN1015-10, (2001). Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
39. TS-EN13755, (2014). Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Atmosfer basıncında su emme tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
40. TS-EN14579, (2006). Doğal taşlar - Deney metotları - Ses hızı ilerlemesinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
41. TS-EN196-1, (2016). Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
42. Wang, Q., Ding, Z. Y., Da, J., Ran, K. and Sui, Z. T. (2011) Factors influencing bonding strength of geopolymer-aggregate interfacial transition zone, *Advanced Materials Research*, 224, 1-7. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.224.1>
43. Xie, J. and Kayali, O. (2014) Effect of initial water content and curing moisture conditions on the development of fly ash-based geopolymers in heat and ambient temperature, *Construction and Building Materials*, 67, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.047>