

Makale

Tarihi Binalarda Elektro-Osmoz ile Yükselen Nem Arıtımı: Bir Vaka Çalışması

Aliihsan Koca ^{1,*}, Mehmet Nurettin Uğural ² ve Ergün Yaman ²¹ Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Güneşsuyu, 34437 İstanbul, Türkiye² Mühendislik Fakültesi, İstanbul Kültür Üniversitesi, 34140 İstanbul, Türkiye; m.ugural@iku.edu.tr (M.N.U.); 1700004183@stu.iku.edu.tr (E.Y.)

* Yazışma: ihsankoca@hotmail.com veya akoca@itu.edu.tr

Özet: Geçtiğimiz yüzyıl boyunca, tarihi yapı binalarda suyun toprakta kapiler olarak yükselmesiyle başa çıkmak için çok sayıda teknoloji önerilmiştir. Bu çalışmanın amacı, elektro-osmoz yaklaşımını kullanan kapiler nem itme aparatının etkinliğini uzun bir süre boyunca incelemektir. Gül Camii, kılcal hareket nedeniyle suyun duvarlarındaki küçük kanallardan emilmesinden kaynaklanan yapısal sorunlardan etkilenen örnek bir tarihi yapı olarak seçilmiştir. Nem itme mekanizması, duvarlardaki nem seviyesini yaklaşık 9 ay içinde 'ıslak' durumdan 'kuru' duruma etkili bir şekilde düşürmüştür. Ekipmanın kurulumundan sonra binanın su kütlesi oranı %14,48'den %2,90'a düşmüştür. Binadaki suyun büyük bir kısmının ilk ölçüm döneminde yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, ıslak zeminle temas halinde olan yapı elemanlarını koruyarak suyun kılcal hareketle emilmesini engellemiştir. Son olarak, çeşitli ölçüm süreleri ve zaman faktörleri için kapiler su itme katsayıları (C) önerilmiştir. Su itme kuvvetinin neredeyse sabit kaldığı nokta ölçülerek ortalama C değeri $0,152 \text{ kg/m s}^{2,5}$ olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: yükselen nem; elektro-osmoz; nem; kapilarite; duvarcılık; inşaat; proje yönetimi



Atf: Koca, A., Uğural, M.N., Yaman, E. Tarihi Binalarda Elektro-Osmoz ile Yükselen Rutubet Arıtımı: Bir Vaka Çalışması. *Buildings* **2024**, *14*, 1460. <https://doi.org/10.3390/buildings14051460>

Alındı: 6 Nisan 2024

Revize: 7 Mayıs 2024

Kabul edildi: 8 Mayıs 2024

Yayınlanma tarihi: 17 Mayıs 2024



Telif hakkı: © 2024 yazarlar tarafından. Lisans sahibi MDPI, Basel, İsviçre. Bu makale Creative Commons Attribution (CC BY) lisansının hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişimli bir makaledir (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Yükselen nem, tarihi yapı binaları önemli ölçüde etkileyen ve yüksek bağıl hava nemi ile karakterize edilen kötü iç mekan koşulları ve malzemelerin korozyonu gibi istenmeyen etkilere neden olan önemli bir sorundur [1]. Malzemelerin gözeneklerindeki nemin varlığı, diğer çevresel koşullarla birlikte biyolojik bozulmaya, tuz kristalleşmesine, kimyasal bozulmaya, kil taşıyan taşlarda şişmeye, don hasarına ve nihayetinde malzeme kaybına ve yapısal sorunlara neden olabilir [2]. Yükselen nem, eski binalarda yaygın olarak görülen bir durumdur ve duvarın yakınındaki zeminde su bulunmasından kaynaklanır. Bu olgu, uzunca bir süredir kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır [3]. Rutubetin varlığı, geçirimsiz tabakaların eksikliğine ve/veya zemine yakın inşaat sırasında yoğun şekilde paketlenmiş taşların kullanılması gibi geleneksel 'su yalıtım uygulamalarının' yetersizliğine bağlanabilir [4,5]. Bir su havzasına batırılmış dikey bir kılcal kaptaki suyun yukarı doğru hareketi, su ile katı yüzeyi arasında meydana gelen kılcal kuvvetlere bağlanmaktadır. Bu olgu, bir sıvı ile katı arasındaki minimum temas açısının da gösterdiği gibi, öncelikle katı yüzeylerin güçlü ıslanabilirliğinden etkilenir. Bu olgu hidrofilik maddeler bağlamında gözlemlenmiştir [1]. Suyun kılcal yükselmesi, duvarlar üzerindeki önemli etkisi nedeniyle mirasın korunmasında çok önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir. Çok sayıda literatür çalışması, zeminden kılcal su yükselmesinin ilkelerini [6,7], olumsuz sonuçlarını ve binalardaki nem emilimini değerlendirme yöntemlerini incelemeye adanmıştır [8-10].

Nemli duvarların, havadaki bağıl nem seviyesinin yükselmesine ve soğuk yüzeylerde küf oluşumuna neden olarak olumsuz iç mekan koşullarına yol açtığı tespit edilmiştir [11]. Sonuç olarak, bu durum hava kalitesi üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir ve daha sonra bina sakinlerinin sağlığını etkiler. Yapı malzemelerinin ısı yalıtım özelliği, gözeneklerindeki su varlığından olumsuz etkilenmektedir. Su içeriğindeki ağırlıkça %1'lik bir artışın, duvarın ısı iletkenlik katsayısında %5'lik bir artışa yol açabileceği tahmin edilmektedir [12]. Sonuç olarak, gözenekli taşlar ve tuğlalar, doygunluk seviyesinin bir sonucu olarak termal iletkenlikte %100'lük bir artış bile yaşayabilir. Yapı malzemelerinin basınç ve kesme dayanımı, gözeneklerindeki suyun varlığından olumsuz etkilenir [13]. Yükselen nem, bozaların, seramik karoların, mozaiklerin ve diğer benzer bileşenlerin parçalanması da dahil olmak üzere tarihi yapı malzemelerinin bozulmasına katkıda bulunan bir faktördür [14].

Su sızmasını azaltmak veya duvar içindeki nem seviyesini düşürmek için çok sayıda metodoloji önerilmiştir. Klasik teknikler, suyun girmesini önlemek için fiziksel engellerin uygulanmasına veya suyun duvar boyunca buharlaşmasını kolaylaştırmaya dayanır [15-17]. Nem alma prosedürleri alanında, elektroosmotik fenomenleri harmanlayarak bir elektrik akımının duvar boyunca dolaşımına dayanan yaklaşımlar mevcuttur. Tipik olarak, bu prosedürler hem nemli duvara hem de uzak bir yere, genellikle toprağa elektrotların yerleştirilmesini gerektirir. Elektrik akımı tipik olarak duvarın içinde bulunan ve anot görevi gören elektroda verilirken, uzaktaki elektrot katot işlevi görür. Bu düzenleme suyun katoda doğru hareketini kolaylaştırarak duvar içindeki nem içeriğinin azalmasına neden olur. Bu tekniğin temelinde elektro-osmoz ile ilgili elektrokinetik hipotez yatmaktadır; bu hipotez, sıvı bir fazın gözeneklere akışının, gözenekli olan doymuş bir malzemeden geçen doğru bir akım tarafından oluşturulabileceğini öne sürmektedir. Suyun taşınması, hem voltaj farkının büyüklüğü hem de gözenekli maddenin özellikleri ile bir korelasyon sergiler. Elektro-osmotik akış olgusu, katı fazın yüzeyi ile sıvı arasında meydana gelen elektriksel etkileşimden kaynaklanır ve arayüzdeki yüklerin ayrılmasıyla sonuçlanır. Elektro-osmoz çift katmanın özelliklerinden etkilenir, bu da gözenekli maddenin ve gözenek çözeltisinin kimyasal formülünden etkilenir. Ayrıca, gözeneklerin şekli ve boyutu da elektro-osmozun belirlenmesinde rol oynar. Su genellikle elektrik akımına benzer bir yönde, özellikle de anottan katoda doğru akar [18].

Elektro-osmoz teknolojisi killi topraklara uygulanmıştır - örneğin kuru toprağı ıslah etmek veya diğer yandan ıslak toprakları sağlamlaştırmak için. Bu örnekte su hareketi ve toprak nemindeki değişimlere dair kanıtlar sunulmuştur [19]. Ancak, yapı malzemeleri ile kullanım için karşılaştırılabilir deneysel gösterimler bulunmamaktadır [20]. Teknik literatürde nem alma prosedürlerinin uygulanmasını takiben meydana gelen nem değişiklikleri hakkında nicel veri eksikliği bulunmaktadır ve bu da gerçek performanslarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi için çok önemlidir [15]. Harici bir DC elektrik alanının implantasyonu yoluyla, aktif elektro-osmozun nemli duvarda kullanılan elektrotlardan (anot) zemine bağlı elektrotlara (katot) kadar küçük deliklerdeki suyun taşınmasını tetikleyeceği öngörülmektedir. Gözenekli malzemelerdeki su hareketiyle ilişkili elektrokinetik süreçleri kullanan elektro-osmoz, killi toprakların nem içeriğini düzenlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Birkaç çalışma, çeşitli yapı malzemelerinde elektro osmoz yoluyla su hareketi olgusunu incelemiştir [15-22]. Çeşitli araştırmacılar, deneysel doğrulamadan yoksun olduğu [3], kullanımını savunmayı imkansız kılan çelişkili sonuçlar ürettiği [23] ve saha uygulamasında çok az başarı elde ettiği [24] için bu yaklaşımı onaylamadıklarını ifade etmişlerdir.

Yükselen neme sahip eski binalarda göç eden tuzların yarattığı hasar Torres ve Freitas tarafından incelenmiştir [25]. 20 cm kireçtaşı duvarlar üzerinde yapılan çalışmalar, en iyi tedavinin duvar tabanının havalandırılması olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, değişen duvar bileşimlerinin ve kalınlıklarının etkileri bilinmemektedir. Coimbra ve Porto Üniversitesi, çalışmalarında sunulan sayısal bir analiz gerçekleştirerek, duvarların nasıl havalandırıldığını incelemiştir.

duvar kalınlığı ve bileşimi, tarihi duvarlarda yükselen nemi gidermek için havalandırmanın ne kadar iyi çalıştığını etkiler. Çalışmanın amacı, tedavi yönteminin potansiyel uygulamalarını artırmaktır. Zhang ve Nowamooz, literatürde çok az ilgi gören bir konuyu incelemiştir: yükselen nemin, stabilize edilmemiş yığma binaların termal-hidromekanik (THM) mekanizmaları üzerindeki etkisi. Çalışma, sonlu elemanlar analizi ve doğrulanmış bir teorik çerçeve kullanarak nemden etkilenen ve kuru duvarları karşılaştırmıştır. Bulgular, artan nemin duvarları soğutup kurumayı ve yokuş aşağı su akışını hızlandırırken, zamanın kuru duvarlarda buharlaşma yoluyla THM özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Yatay taşıma kapasitesi 5 yıllık bir süre zarfında rutubet olmadan %47 oranında artarken, rutubetle birlikte %10 oranında azalmıştır. Aynı zaman aralığında, artan nem, hidrolik iletkenlik ve ısı yalıtımında daha yavaş bir bozulma oranına neden olmuştur [26]. Pratiwi ve diğerleri [27] Cakarta'nın Kota Tua mahallesindeki miras yapılarının kılcal yükselme seviyelerini Cipta Niaga yapısına odaklanarak incelemiştir. Bu mimari şaheserler, duvar nem içeriğini artıran ve yapısal bozulmaya neden olan kılcal yükselme nedeniyle ciddi tehdit altındadır. Gravimetri, araştırmacılar tarafından kılcallıkla ilgili hasarı ölçmek için kullanıldı. Çalışmaya göre, bazı duvar bölümlerinin kılcal su konsantrasyonları higroskopik su içeriğinden daha yüksekti. Bu durum, tarihi yapıları korurken kılcal büyümeyi dikkate almanın önemini vurgulamaktadır [27]. Goudjil ve arkadaşları, salım maddelerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmak ve hem çevre hem de tüketiciler için bunlara eşlik eden tehlikeleri azaltmak amacıyla yeni bir polarizasyon tabanlı giderim yöntemini incelemişlerdir. Pürüzsüz bir beton yüzey ve başarılı bir kalıptan çıkarma yaklaşımının nasıl olduğunu değerlendirmek için normal beton C25/30 üzerinde 20 °C'de deneyler yapılmıştır. Çalışma, geleneksel ayırıcı maddeler kullanılmadan kabul edilebilir kalıptan çıkarma sonuçları elde etmek için en iyi uygulamaları ve teknikleri özetlemektedir [28].

Doğal yapı taşlarının kapiler su emme özellikleri

çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Kılcal su emilimi, doğal taşıdaki su geçirgenliğinin en büyük göstergelerinden biridir [29]. Birçok doğal taş, kılcal damarlardan su emilimi ve aşırı porozite nedeniyle mekanik ve fiziksel özelliklerini kaybeder. Soğuk havalarda kılcal damarlardan emilen su donar ve buza döner. Buz kristallerinin gelişimi ve hacim genişlemesi sonucunda gözeneklerde basınç oluşur ve kayanın mukavemeti büyük ölçüde azalır. Bu durum, su doğal taşlardan sızdığında kristalleşen tuzlar için de geçerlidir [30]. Washburn, gözenekli ortamdaki kılcal su akış kinetiğini matematiksel olarak inceleyen ilk kişidir. Tomašić ve arkadaşları, türbülanslı sularda kılcal su emilimini test etmek için iki farklı kireçtaşı çeşidi kullanmış ve taşın yapısal özelliklerinin kılcal su emilimini etkileyebileceğini bulmuşlardır [30]. Mosquera ve diğerleri tarafından yapılan araştırmaya göre, üç farklı granit türünün kılcal su emme kapasiteleri 0,24 ila 1,24 kg/m² s^{0,5} arasında değişmektedir [31].

Rirsch ve Zhang tarafından yürütülen çalışma, nem ve tuz birikimi nedeniyle yapıların bozulmasına yol açan bir olgu olan yükselen nemin oluşmasında harç uygunluğunun ve su emiliminin etkisini incelemektedir. Çalışma, çeşitli harçlar kullanılarak inşa edilen duvarlarda rutubetteki dikey artışı ölçen ve ardından bu ölçümleri teorik tahminlerle karşılaştıran bir yıllık bir deneyden elde edilen bulguları sunmaktadır. Çalışma, Keskin Cephe Modelinin yükselen nem olgusunu doğru bir şekilde karakterize ettiğini ve nem cephesinin yüksekliğini etkileyen kilit faktörün su emilim oranı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yükselen nemin ele alınmasının buharlaşmayı azaltarak duvarların termal verimliliğini artırabileceğini öne sürmektedir [32]. Gözenekli yapı malzemelerinde sıvı suyun iletimi ve bunun higrotermal etkisi Lu ve diğerleri tarafından araştırılmıştır [33]. Yazarlar, nem transferinin doğru bir şekilde simüle edilmesinde kapiler su emme katsayısının önemini vurgulamışlardır. Ayrıca, geleneksel yöntemin kısıtlamalarını ele almak için geliştirilmiş bir sürekli ölçüm tekniği önermişlerdir. Yazarlar, bir vaka çalışması olarak havalandırılmış otoklav betonunu kullanarak geleneksel ve sürekli yaklaşımlardan elde edilen sonuçların karşılaştırmalı bir analizini yapmışlardır. Yazarlar, ikinci seçeneğin gelişmiş hassasiyetini, kullanım kolaylığını ve tekrarlanabilirliğini vurgulamışlardır. Araştırma, doğru ölçüm yöntemlerinin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır.

ve bu alanda gelecekte yapılacak araştırmalar için daha güvenilir metodolojilerin kullanılmasını önermektedir [33]. Çelik ve Sert tarafından yürütölen çalışma, Türkiye'deki kültürel miras alanlarında sıklıkla kullanılan bir yapı malzemesi olan Döğ er tütüñün uzun vadeli dayanıklılığı üzerinde su emiliminin ve tuz kristalleşmesinin etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Araştırma, farklı tuz çözeltilerine ve konsantrasyonlarına maruz kaldığında malzemenin bozunma özelliklerini araştırmak için kimyasal, mineralojik, petrografik ve fizikomekanik özelliklerin kapsamlı bir analizini kapsamıştır. Sonuçlar, yapıların inşasında Döğ er tütüñün kullanılmasının, kılcal suyun önemli ölçüde emilmesi ve ardından fiziksel ve mekanik özelliklerin bozulması nedeniyle dayanıklılık endişelerine yol açabileceğini göstermektedir. Binaların duvarları içindeki nem transferinin incelenmesi, dayanıklılık ve görünümlerinin bozulmasıyla ilişkili davranışların anlaşılmasında büyük önem taşımaktadır. Dayanıklılığın değerlendirilmesinde ve görsel çekiciliğin korunmasında bina duvarları yoluyla nem taşınımının önemi anlaşılmaktadır. Tarihi duvarlardaki nem ve ısı hareketinin incelenmesi, artan nem sorununu ele almak için gereklidir. Bu çalışmada çeşitli sınır koşulları altında incelenen çeşitli bilgisayar programları bu tür analizlerin yapılmasına olanak sağlamaktadır [34].

Çelik ve Köken'e [35] göre, kılcal su emilimi süreci çoğunlukla gözeneklerin boyutu ve şeklinden etkilenebilmektedir. Çelik ve Yılmaz [36] çalışmalarında kılcal suyun doğal yapı taşlarındaki ayrışma süreci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma özellikle Afyonkarahisar'daki andezit, Ayazini ve Seydiler maden yataklarını incelemiştir. Taşların özellikleri, araştırmacılar tarafından petrografik-mineralojik özellikleri, kimyasal bileşimleri, gözenek boyutlarının dağılımı ve fizikomekanik özelliklerini kapsayacak şekilde karakterize edilmiştir. Çalışmada statik, tuzlu ve asidik koşullar altında su emme sürecini değerlendirmek için deneyler yapılmıştır. Andezit, Ayazini tütü ve Seydiler tütüñün emilim oranları sırasıyla 5,83 ila 6,88 $\text{kg/m}^2 \text{s}^{0,5}$, 21,18 ila 22,46 $\text{kg/m}^2 \text{s}^{0,5}$ ve 7,05 ila 9,30 $\text{kg/m}^2 \text{s}^{0,5}$ arasında değişmiştir. pH değerı 3 en yüksek emilim oranını sergilemiştir. Bulgular, çeşitli taş türleri arasında kılcal su emme kapasitesindeki farklılıkları vurgulamaktadır ki bu da inşaatın uzun ömürlü yapısının değerlendirilmesinde çok önemlidir [36]. Karagiannis ve arkadaşları tarafından yürütölen çalışmada, yapı malzemelerinin uzun süreli dayanıklılığı ve hizmet ömrütüñün anlaşılmasında kritik bir unsur olan kılcal emilim olgusu incelenmiştir. Dinamik çevresel değerikenlerin varlığında kılcal su alımı sürecini aydınlatmak için birinci dereceden bir matematiksel model oluşturulmuştur. Daha sonra, bu model deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bulgular, emilim özelliklerinin hem malzemenin özelliklerinden hem de çevredeki koşullardan etkilendiğini göstermektedir. Çevresel verilerin dahil edilmesi, karşılaştırılabilir bir modelle yapılan bir karşılaştırmanın da gösterdiği gibi, doğruluğun artmasına yol açmaktadır. Model, şiddetli hava koşulları sırasında su emilimini tahmin etmede yüksek düzeyde doğruluk göstermekte ve iklim değerikliği ile ilgili sorunları ele almayı amaçlayan simülatörlerin ve risk değerlendirme araçlarının geliştirilmesi için değerli hale getirmektedir [37].

Literatür taraması, uluslararası araştırmaların kapsamlı bir şekilde yapılmadığını göstermektedir.

duvar neminin alınması konusunu sistematik olarak ele almıştır. Bu durum, yapı malzemelerinde yükselen nemin mekanizmalarını, etkilerini ve ölçütütüñü incelemeye adanmış uluslararası dergi makalelerinin sayısı [14] ile bu nemin giderilmesine yönelik stratejilere odaklanan makaleler arasındaki önemli eşitsizlikten açıkça görölmektedir.

Bazı yazarlar, deneysel araştırmaların aşırı maliyetli ve zaman alıcı olduğunu savunmaktadır [38]. Sonuç olarak, araştırmacılar yapı malzemelerindeki nem davranışını modellemek için hesaplamalı yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemlerden biri, ısı ve nem transferini simüle eden WUFI 2D'dir [39]. Dikkatli bir değerlendirmeden sonra, sayısal simülasyonların gerçek tarihi duvarlarda yükselen nem olgusunu doğru bir şekilde simüle etme konusunda belirli sınırlamaları vardır. Bu nedenle, onarım seçeneklerini araştırmak için yalnızca bunlara güvenemeyiz. Deneysel araştırmalar, rutubet önleyici uygulamaları incelemek için kullanılan baskın yöntem olmaya devam etmektedir ve çeşitli düzeylerde gerçekteştirilebilir.

Bazı araştırma çalışmaları, boyut ve biçim açısından farklılık gösteren laboratuvar ölçekli duvar modellerini kullanmaktadır. Küçük ölçekli duvar yapılarının doğasında karmaşıklıklar vardır ve yükselen nemin laboratuvar ortamlarında tekrarlanması, çoğunlukla yeterli sorptif özelliklere sahip harçların üretilmesindeki doğal zorluk nedeniyle önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır [1]. Herhangi bir senaryoda, gerçek yapılardan veri elde edilmesi, özellikle sistematik araştırmalar yoluyla yapıldığında oldukça değerli olabilir. Bu durum, tuz nemi olarak bilinen ve yükselen nem ile önemli ölçüde yüksek tuz konsantrasyonunun bir araya gelmesiyle karakterize edilen olgunun tarihi yapı malzemelerinde önemli ölçüde bozulmaya yol aç t ı ğ ı Güney Avustralya'nın Adelaide kenti örneğinde görülmektedir. Sonuç olarak, bu sorun geçtiğimiz on yıllar boyunca çeşitli metodolojilerin kullanıldığı kapsamlı onarım çabalarını gerektirmiştir [1].

Elektro-osmoz kavramları, kuru toprakların nemlendirilmesi veya ıslak toprakların sağlamlştırılması gibi killi topraklarda teknolojik kullanım alanları bulmuştur. Bu durumda, su akışı ve toprak nemi değişikliklerine dair kanıtlar rapor edilmiştir [19]. Ne yazık ki, yapı malzemelerine uygulanabilirliklerine ilişkin karşılaştırılabilir deneysel kanıtlar mevcut değildir [20]. Gerçek verimliliklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için gerekli olan nem alma prosedürlerinin uygulanmasını takiben nem değişikliklerine ilişkin nicel veriler teknik literatürde sınırlıdır [15].

Yukarıda gösterilen literatür taraması, elektro-osmozun yığma duvarlar üzerindeki etkisine ilişkin araştırma çalışmalarının azlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, mevcut literatürde bu sistemlerin saha incelemeleri de bulunmamaktadır [1]. Buna karşın, bilimsel araştırmalar yapı malzemelerinin nemi emme yollarını inceleyerek nem emme katsayılarının belirlenmesine yol açmıştır. Bu çalışma, elektro-osmoz teknolojisinin yapı elemanları için kurutma potansiyelini deneysel olarak analiz etmeyi ve daha önce çalışılmamış olan nem itme katsayısını önermeyi amaçlamıştır. Ayrıca, literatür incelendiğinde, deneysel araştırmaların laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu çalışma, ölçümlerin uzun bir süre boyunca toplandığı ve değerlendirildiği gerçek ölçekli bir uygulamayı içermektedir.

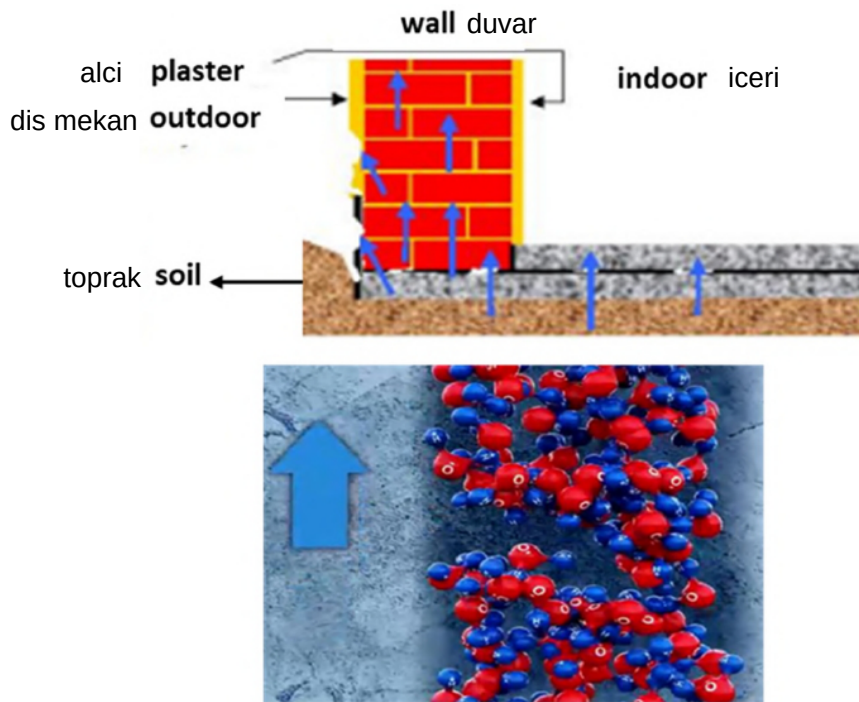
Bu makale, nemli duvarlardan nemin uzaklaştırılması için pratik uygunluğunu belirlemek amacıyla duvarcılıkta elektro-osmoz etkileyen unsurları araştırmak için yapılan deneylerin bulgularını sunmaktadır. Bu çalışmada amaç, elektro-osmoz tekniğini kullanan kılcal nem itme aparatının uzun vadeli kurutma etkinliğini araştırmaktır. Gül Camii, duvarlarındaki mikrokanelarda kılcal hareket yoluyla su emiliminden kaynaklanan yapısal sorunlardan etkilenen temsili bir tarihi yapı olarak seçilmiştir. Cihazın ilk kurulumu 24 Ocak 2017 tarihinde gerçekleştirilmiş, ardından 2 Ağustos 2022 tarihine kadar belirli aralıklarla altı ölçüm yapılmıştır. Nem itme sistemi, bina temelindeki su kılcallık yoluyla yapıya yükselirken bina duvarı ile zemin arasında doğal bir bariyer (potansiyel bariyer) oluşturarak uzun vadede yapı elemanlarının kuruluğunu korur. Bu süreç yaklaşık 277 gün sürer ve su moleküllerinin geçtiği kanallar aracılığıyla gerçekleşir. Yüksek neme sahip yapı elemanları kurutma amacıyla zemine doğru itilir. Araştırma bulguları, inşaat sektöründeki profesyoneller, araştırmacılar ve karar vericiler için önemli bilgiler sunmaktadır.

2. Materyaller ve Yöntemler

2.1. Kılcal Yükselen Nemin Giderilmesi için Elektro-Osmoz Cihazı

Gözenekli yapı malzemelerinde nemin emilmesi ve aktarılması süreci, çeşitli itici güçlerin etkileşimini içeren çok yönlü ve karmaşık bir olgudur [40]. Toprak, yapıya yükselme kabiliyetine sahip önemli miktarda su içerir. Kapilarite, yerçekimi kuvvetlerinin varlığında bile suyun yukarı doğru hareketinden sorumlu tek faktördür. Yapı elemanları, sayıları milyonları bulan, birbirine bağlı geniş bir kılcal boru ağı içerir. Suyun yapı içinde yukarı doğru hareketi kılcal damarların varlığı ile kolaylaştırılır. Yapısal bozulmanın birincil belirleyicisi, sudaki tuz moleküllerinin varlığıdır. As

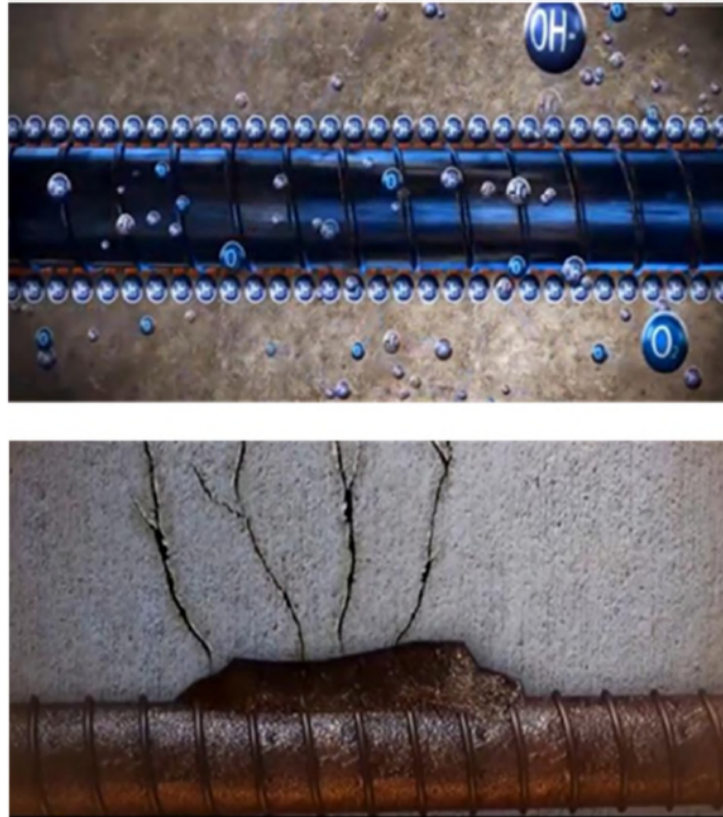
Su molekülleri kılcal hareket yoluyla yapıya yükselir, toprakta bulunan tuzları taşırlar. Su bina taşıyıcılarına ve duvarlarına yükselirken buharlaşmaya uğrar. Bu sırada tuz, betondaki boş alanlarda tutulur ve potansiyel farkın bir sonucu olarak taze tuzlu suyun yükselmesi için bir zemin oluşturur (Şekil 1). Yapının duvarları, nem ve tuzların su biriktirme şekline benzer bir şekilde duvara nüfuz ederek bir sünger andırır. Nem seviyelerindeki artış, duvar ile zemin arasındaki doğrudan etkileşime bağlanabilir. Bu durum eski yapılarda yaygın olmakla birlikte, modern yapılarda yapısal kusurların bir sonucu olarak kenetlenmede bir eksiklik yaşanabilir. Toprakta bulunan tuzlar suda çözünmeye uğrar ve daha sonra suyla birleşerek suyla birlikte duvarın içine taşınır. Zamanla tuzun taşınma süreci duvar içinde gerçekleşir ve tuz yüzeye doğru göç ederek birikir. Duvar yüzeyindeki nemin buharlaşması tuz kristallerinin oluşmasına neden olur. Tuz birikimi, sıva ve duvarın kimyasal ayrışmasına yol açarak potansiyel olarak bina yapısının tahrip olmasına neden olabilir. Bu sorun için en uygun çözüm, dışarı atılan tuzu temizlemekten ve boyamaktan kaçınmaktır, çünkü bunu yapmak duvar içindeki tuzların yeniden yüzeye çıkmasına neden olacaktır. Bu özel rutubet türünün yapısal tekniklerle ortadan kaldırılması önemli zorluklar doğurmaktadır. Rutubetin önlenmesi sadece bir taraftan tabanın kazılarak çukurlaştırılması ve bir drenajın uygulanması veya sabitlenmesi ile sağlanabilir. Bu adımların elektronik-fiziksel kurutma işlemiyle birlikte uygulanması, daha olumlu bir sonuç elde etme olasılığını artırır.



Şekil 1. Bir yapıya tırmanan su ve tuz molekülleri (Mavi oklar yükselen nemin varlığını göstermektedir) [41].

Buna karşılık, duvarlardaki yüksek nem seviyelerinden kaynaklanan takviye çeliğinin korozyonu, betonarme yapılarda önemli bir endişe kaynağı oluşturmaktadır ve maliyet sonuçları, önemli güvenlik tehlikeleri ve olumsuz çevresel sonuçlara yol açmaktadır. Çelik, kullanım ömrü boyunca doğal bir istikrarsızlığa sahiptir. Oksidasyona uğrama ve ilk haline geri dönme kapasitesine sahiptir. Betona dahil edildiğinde, betonun yüksek alkalinitesi nedeniyle pasivasyona uğrar ve korozyona karşı dirençli hale gelir. Ancak toprakta bulunan su, yapıya doğru yükselirken topraktaki tuzu da taşır. Pasif tabaka, klorür ve karbondioksit girişi ile bozunmaya uğrar. Çeşitli

Karbon, magnezyum, nitrat ve sülfat gibi tuzlar, korozyona neden olma ve beton ile çelik arasındaki yapışmayı bozma potansiyeline sahiptir. Çelik korozyonu süreci, kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle çeliğin bozulması anlamına gelir. Korozyon ürününün hacmi çeliğin hacminden daha büyüktür. Söz konusu ürün, betonda çatlakların oluşmasına ve parçalanmaya yol açabilecek mekanik gerilmelere neden olur. Tuzlu suyun varlığı, basınç kuvvetlerine maruz kaldığında hem çeliğin mukavemetinde hem de betonun mukavemetinde bir azalmaya yol açar. Ayrıca, beton korozyonu oluşumu nedeniyle betonun yapışması bozulur (Şekil 2).



Şekil 2. Bir yapıdaki çeliğin korozyona uğraması ve betonun hasar görmesi sonucu ortaya çıkan ürün [41].

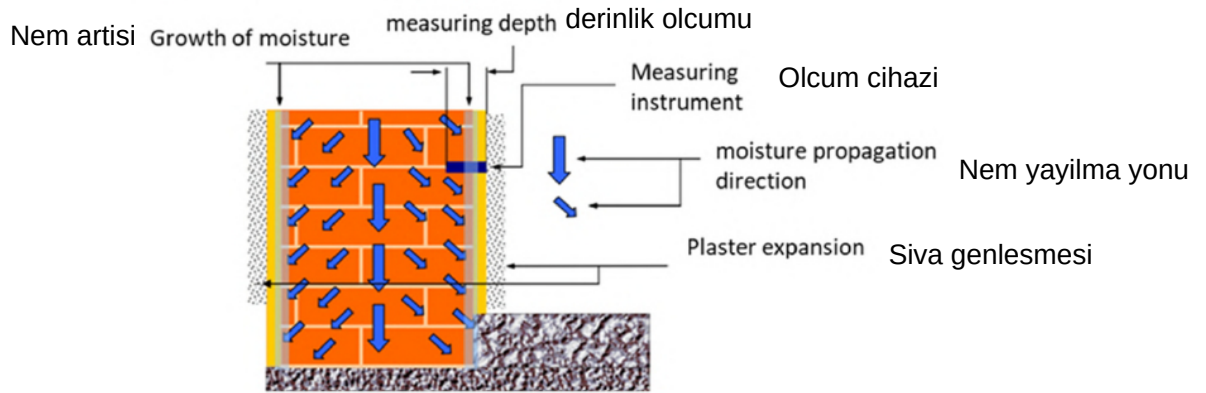
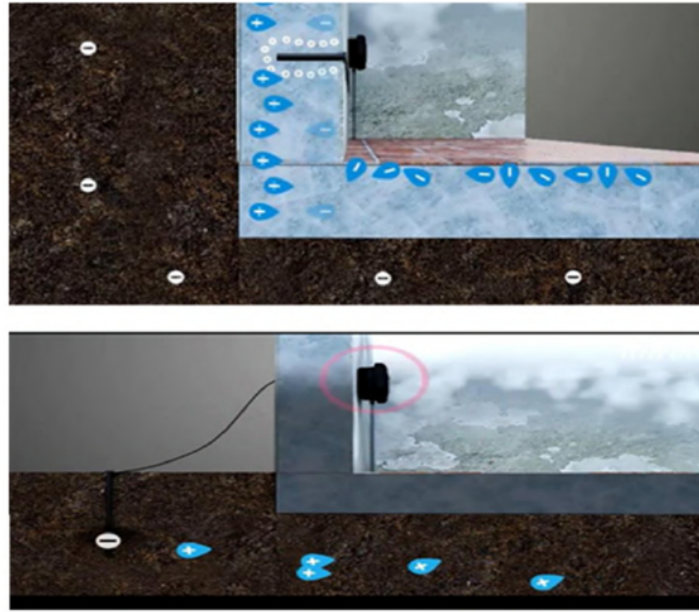
Kılcal nem itici cihazın işlevselliği, ilk kurulumundan sonra gözlemlenebilir. Bu teknoloji, binaya çıkmaya çalışan yeraltı suyuyla karşı koymak için elektro-osmoz prensibini kullanır. Hasar doğru bir şekilde teşhis edildikten ve ölçüm yerleri belirlendikten sonra kılcal nem tutucu uygulanır. Duvar birçok uyarlanabilir elektrot ile donatılmıştır. Kılcal nem itici cihaz kontrol ünitesi, bu elektrotları ya toprağa gömülü olan ya da mevcut elektrik sistemindeki topraklama hattına bağlı olan bir referans elektroda bağlar. Yapının çalışma mekanizması, aktif tuzdan arındırma ve nem alma işlemini kolaylaştırmak için harici bir elektrik voltajının uygulanmasını içerir. Kılcal nem itme cihazı, tuz hareketini düzenleyen ve elektro-osmoz olarak bilinen süreçte kılcal sıvıların hareketini engelleyen elektrik potansiyellerinin üretilmesinden sorumludur. Duvarların nem içeriğini değerlendirmek için düzenli ölçümler yapılmaktadır. Kılcal nem iticinin kesintisiz bir bariyer oluşturması ve böylece nemin yeniden girişini engellemesi beklenmektedir. Başarılı nem alma ve tuzdan arındırma süreçlerinin ardından, kılcal nem tutucunun yapı içinde kalması ve operasyonel etkinliğini sürdürmesi zorunludur. Duvar ile zemin arasında doğal bir bariyer görevi gören potansiyel bir bariyerin varlığı, nem tutucunun duvarlarda kuruluğu muhafaza etme kabiliyetini kolaylaştırır. Sistemin amacı, nem ve tuz moleküllerini yapıdan etkili bir şekilde uzaklaştırmak ve bu moleküllerin

Temelin ötesinde, ilk giriş noktalarıyla tutarlı bir şekilde, sıva ve boya gibi herhangi bir inşaat faaliyetine gerek kalmadan. Kılcal nem itme cihazları, bina duvarları tarafından uygulanan yükün toprakta bulunan mineral su ile hizalanmasını kolaylaştırır. Şekil 3'teki grafik gösterimler, cihazı ve duvarlara stratejik olarak yerleştirilen elektrotları tasvir etmektedir.



Şekil 3. Kılcal nem arıtma cihazının kurulumunun ilk aşaması [41].

Duvarlardan nemin uzaklaştırılması işlemi sırasında su, en kısa çıkış yolunu arama eğilimindedir. Özellikle duvarların geniş olduğu durumlarda, yüzeydeki buharlaşma toplam su birikimini aşabilir. Etkili ve uygun havalandırma buharlaşma oranını artırarak duvarın kuruma sürecini hızlandırır. Kabarcıkların varlığı su akışı ve buharlaşmanın meydana geldiğini gösterebilir. Kabarcıkların düzenli olarak temizlenmesi, suyun duvardan hareketi ve buharlaşması hakkında bilgi verebilir. Duvar derinliği ölçümü için ölçüm çubuklarının kullanılması tipik olarak maksimum 100 mm duvar derinliği ölçümü sağlar. Sonuç olarak, tüm ölçümler sıızan suyun en yoğun olduğu yerde yapılacaktır. Yukarıda bahsedilen ölçümler, suyun duvar içindeki dinamiklerinin ve dağılımının anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Kaldırma sürecinin etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamak için düzenli ölçümler yapmak ve kabarma gibi göstergeleri yakından izlemek zorunludur. Suyun uzaklaştırılması sürecinin izlenmesi ve uygun önlemlerin uygulanması, bina sağlığının uzun vadede korunması için çok önemlidir. Şekil 4'te gösterilen görselleştirmeler, su moleküllerinin (Şekil 4'teki mavi oklar) binadan çıkarken ve ardından kılcal nem tutmayan bir cihazın (Cihaz Şekil 4'teki kırmızı daire içinde gösterilmiştir) uygulanmasının ardından zemine geri dönerken hareketini göstermektedir. Cihazın özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 4. Yükselen nemin tedavisi [41].

Tablo 1. Cihazın özellikleri. Cihazın özellikleri.

Marka	Mirline ©
Dış gövde malzemesi	Polipropilen
Boyutlar	$W \times H \times D = 342 \times \quad \times 194135 \text{ mm}$
Kütle	8 kg
Bağlantı	220 V 50/60 Hz
Sinyal	Tüketim 11 W
Ferrit anten	frekans 141 kHz
Kuru elektrot elektrik akımı beslemesi	frekans 141 kHz
Frekans bandı	0,7-2,0 V
Elektrik rezerv alan gücünün etkin değeri	f: 0,14-0,826 MHz
Manyetik yedek alan etkin yoğunluk değeri	3 V/m
Toprak için potansiyel dengeleme çubuğu	2,35/f A/m
elektrotlar ve ferrit anten arasındaki kablo	Boyutlar: 1610 × 1000 mm, Akım: 16A/5 Cihaz, Koaksiyel kablo tipi RG58

2.2. Sistemin Uygulanması

İstanbul, Türkiye'deki Gül Camii de sistemin uygulamasına tabi tutulmuştur. Yapının inşa tarihi belirsizdir; yine de bir zamanlar Bizans kilisesiydi. Fethi takiben, cami olarak yeniden kullanılmadan önce bir süre tersane deposuna dönüştürülmüştür [42].

Cami, Bizans ve Osmanlı mimari etkilerinin açık işaretlerini sergilemektedir. Bu kilisenin dış mimarisi, Osmanlı döneminde birçok değişikliğe uğramıştır.

Türk dönemi. İki taraflı iki cephe çok sayıda pencere ile inşa edilmiş ve mahya çizgisi, birçok Osmanlı camisinde gözlemlenen mimari tarzı andıracak şekilde kademeli olarak kapatılmıştır. Bir Türk yapısı, ses çıkarmayan ve sekizgen kasnaklarla donatılmış çok basık, sekizgen kubbelerin varlığı ile karakterize edilir. Bu nedenle, antik kilisenin Türk mimarisinin klasik dönemine uygun olarak yan cepheleri, önemli destek kemerlerini ve merkezi kubbeyi kapsayan yenilemeler geçirdiği açıktır. Başlangıçta yüksek bodrumu nedeniyle etkileyici oranlara sahip olan kilise, muhtemelen uzun bir kasnakla desteklenen kubbesiyle daha da etkileyici bir görsel etki yaratmıştır. Caminin minaresi, barok profilli balkon tasarımı da dahil olmak üzere 1766 depreminden sonra inşa edilen minarelerle benzerlik göstermektedir [42].

Gül Camii tuğla tonozlu bir bodrum üzerine inşa edilmiştir. Cami yüksek bir alanda yer almaktadır. Yapı çakıl, kum, kil ve silt toprak (tortul toprak) üzerine oturmaktadır. Caminin yapı içeriği, Horasan derzli yontma taş ve klasik tuğladan oluşan alması bir üslup göstermektedir. Taş ve tuğla duvar örgüsüne karıştırılmıştır (Şekil 5). Caminin toplam dış duvar alanı 1560 m^2 'dir. Toplam 312 m^3 dış duvar hacmine sahiptir. Denize yakınlığı nedeniyle cami uzun süredir zeminden kaynaklanan nem ve rutubet sorunlarıyla boğuşmaktadır (Şekil 6 ve 7).



Şekil 5. Gül Camii.

Kılcal nem tutucu cihaz cami içinde, özellikle de Şekil 8'de gösterilen yerleşim planında (2) olarak gösterilen alana stratejik olarak yerleştirilmiştir. Cihaz, Şekil 9'da gösterildiği gibi, zemin seviyesinden yaklaşık 2,5 m dikey yükseklikte konumlandırılmıştır. Cihazın konumu, kapsama alanları ve elektrik mevcudiyetine göre belirlenmiştir. Cihazın dairesel bir etki yarattığı göz önüne alındığında, etkiyi en üst düzeye çıkarmak için merkez noktaları seçilmiştir. Ayrıca, binanın tarihi önemi nedeniyle, tarihi bütünlüğü üzerinde en az etkiyi sağlayacak bir yer dikkatle seçilmiştir.



Şekil 6 Caminin içinden genel görüntüm.

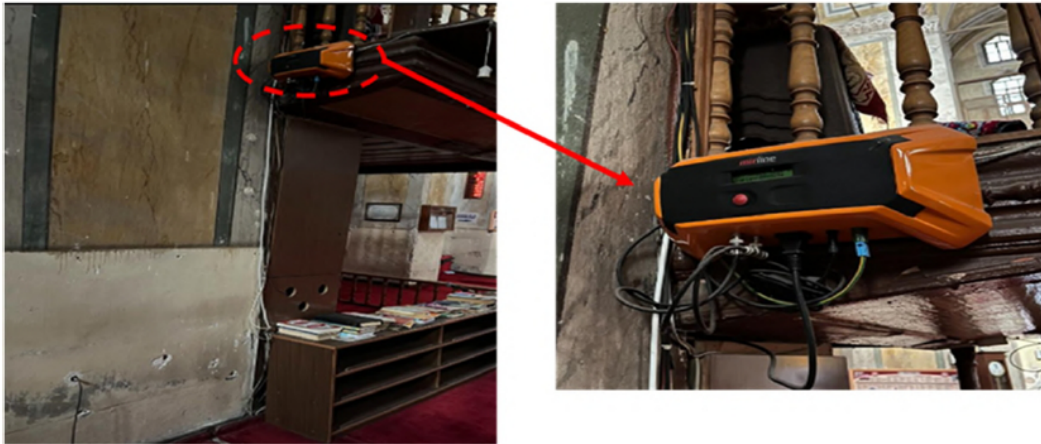


Şekil 7 Cami içinde süregelen rutubet ve nem sorunu.

Sistemin elektrotları yerleşim planında (1) ile gösterilen dört noktada duvarlara yapıştırılmıştır (Şekil 8). Elektrotlar yerden 290 cm yüksekliğe yerleştirilmiştir (Şekil 10). Cihazın dairenin merkezine yerleştirildiği göz önünde bulundurularak, elektrotlar cihaz ortada olacak şekilde birbirine taban tabana zıt dört noktaya yerleştirilmiştir. Böylece dairesel etki küresel bir etkiye dönüştürülerek nemin daha hızlı bir şekilde uzaklaştırılması sağlanmıştır. Ayrıca, yapı yığma taş kullanılarak inşa edilmiş ve herhangi bir boşluk olmaksızın tamamen birbirine bağlanmıştır. Sonuç olarak, elektrotlar tarafından iletilen elektrik sinyalinin yapıyı tamamen etkileyebilmesini garanti altına almak için taşıyıcı elemanlar ve dış duvarlar elektrotlarla donatılmıştır.



Şekil 8. Sistem düzeni. Sistem düzeni.



Şekil 9. Kılcal yükselen nem arıtma cihazının montajı.

Daha sonra, duvarlardaki su içeriğini ölçmek için 8 farklı noktaya (3.1-3.8) ölçüm noktaları dikkatlice yerleştirilmiştir. Ölçümler her ölçüm noktasında üç farklı yükseklikte elde edilmiştir: altta 50 cm, ortada 120 cm ve üstte 200 cm. Yerleştirilen ölçüm çubukları maksimum 100 mm duvar derinliğinde ölçüm yapabilmektedir ve özellikle en fazla su penetrasyonunun gerçekleştiği alanı hedeflemektedir. Bu çalışmada ölçümler 90 mm derinlikte alınmıştır. Her bir ölçüm periyodunda toplam 24 ölçüm toplanmıştır. Belirlenen ölçüm noktalarından ölçümleri toplamak için Gann Hidromet cihazı kullanılmıştır. Daha sonra, malzemede bulunan suyun ağırlığını ve hacmini belirlemek için Gann değerleri kullanılmıştır [43]. Cihazın ilk uygulamasını takiben (t_0), farklı tarihlerde (t_1 - t_6) takip eden beş ölçüm serisi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 10. Dikey eksene monte edilmiş elektrot (kırmızı daire içinde gösterilmiştir).

2.3. Ölçülen Sonuçların Değerlendirilmesi

Kılcal su emme katsayısı, bina bileşenlerinin sıvı su iletim kapasitesini değerlendirmek için pratik mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu katsayı Denklem (1) kullanılarak belirlenebilir [44]. Literatür, kılcal su emme seviyelerini belirlemek için EN 1925 [45] standardını kullanmaktadır. Kılcal su emme katsayısı daha sonra Denklem (1)'de verilen yöntem kullanılarak hesaplanır. Kapiler su itme mekanizması ile kapiler su emilimi arasındaki fiziksel benzerlik göz önüne alındığında, bu çalışmada kapiler yükselen nem arıtma sisteminin etkinliğini değerlendirmek için kapiler su itme katsayısı (C) olarak Denklem (1)'de belirtilen ifade kullanılmıştır. Bu denklem, sistemdeki kılcal su itme sürecini değerlendirmek için kullanılmıştır.

$$C = \frac{\Delta M}{A_c \times \sqrt{t}} \quad (1)$$

$\Delta M = M_i - M_s$ (kg) ifadesi, duvar üzerindeki toplam su itme kütesini temsil eder. Duvarın su itmeden önceki ağırlığının (M_i) kurutulmuş duvarın ağırlığından (M_s) çıkarılmasıyla hesaplanır. A_c duvarın su ile temas eden kesit alanını (m^2), t ise ölçümlerin yapıldığı zamanı göstermektedir. Dikkate alınması gereken bir diğer faktör de kütle azalmasıdır. Yukarıda bahsedilen ifade resmi olarak kütledeki toplam azalmanın suyla doğrudan temas eden kesit alanına bölünmesiyle elde edilen oran olarak tanımlanmaktadır.

$$\Delta M = \frac{\Delta M}{A_c} \quad (2)$$

Hesaplamalarda duvar derinliği (w) 0,55 m, duvarın toplam uzunluğu (L) 120 m, duvarın kesit alanı (A_c) $66 m^2$ ve malzeme yoğunluğu $2300 kg/m^3$ olarak belirlenmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde, yukarıda bahsedilen prosedür kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçlarının bir değerlendirmesi sunulmaktadır. Her bir ölçüm adımı sırasında sekiz farklı yatay konumunda ve üç farklı dikey noktada toplam 24 Gann Rakamı ölçüm sonucu değerlendirilmiştir. Aşağıda sunulan tablo ve grafikler, her bir ölçüm zamanı (t) için ortalama değer olarak kullanılan tekil bir Gann Rakamı değerinin kullanımını göstermektedir. Tablo 2 ve 3, ortalama Gann Rakamı ölçüm verilerinden türetilen ek değişkenleri sunmaktadır.

Binanın tüm duvarlarındaki suyun ağırlık yüzdesini, birim bina hacmi başına düşen su kütesini ve toplam su içeriğini belirlemek için, nem ölçüm cihazından elde edilen Gann Basamağı değerleri uygun dönüşüm tablosu kullanılarak hesaplanmıştır [45]. Yukarıda bahsedilen hesaplamalar her bir bina için tekrarlanmıştır.

zaman adımı ve sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Tabloda gösterilen kütle azalması, iki ölçüm aralığında yapı içindeki toplam su kütlesindeki farkın hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Birim kütle azalmasını belirlemek için toplam kütle azalması, duvarlar boyunca kılcal su hareketinin yönüne dik olan kesit alanına (A_c) bölünmüştür.

Tablo 2. Ölçüm sonuçları. Ölçüm sonuçları.

Ölçüm Adımı Rakamı ve Tarih	Gann Değer	Ağırlıkça Nem İçeriği (%)	Birim Su Kütlesi (kg/m^3) ³	Toplam Su Kütlesi M (kg)	Kütle Azaltma ΔM (kg)	Birim Kütle Azaltımı $\Delta M''$ (kg/m^2) ²
t_0 (24 Ocak 2017)	88.24	14.48	333.0	103,896	-	-
t_1 (7 Haziran 2017)	78.81	5.20	119.7	37,346	66,550	1008
t_2 (28 Ekim 2017)	72.50	3.75	86.3	26,926	10,421	157.9
t_3 (25 Mart 2018)	68.30	3.28	75.3	23,494	3432	52.0
t_4 (24 Eylül 2018)	65.20	3.02	69.4	21,653	1841	27.9
t_5 (20 Mart 2019)	63.10	2.94	67.5	21,060	593	8.9
t_6 (2 Ağustos 2022)	61.85	2.90	66.6	20,779	281	4.2

Tablo 3, referans ölçüm noktası (t_0) ile sonraki ölçüm aralıkları (t_{1-6}) arasındaki zaman aralığı dikkate alınarak türetilen kılcal nem itme katsayılarını sunmaktadır. Örneğin, t_0 - t_6 referans dönemi boyunca iki ölçüm noktası arasında 2016 günlük bir zaman aralığı vardı. Bu süre zarfında, su kütlesindeki toplam düşüş 83.117 kg olurken, birim kütledeki azalma 1259 kg/m^2 olmuştur. Kılcal nem itme katsayıları, sağlanan değerlere dayanarak t_0 - t_6 ölçüm süresi boyunca çeşitli zaman faktörleri (saniye, saat, gün) için hesaplanmıştır.

Tablo 3. Başlangıç referans değerinden türetilen hesaplamalar.

Değişkenler		Ölçüm Dönemi					
		$t_0 - t_1$	$t_0 - t_2$	$t_0 - t_3$	$t_0 - t_4$	$t_0 - t_5$	$t_0 - t_6$
Kütle Azaltımı (ΔM)	kg	66,550	76,970	80,402	82,243	82,836	83,117
Kesit Alanı (A_c)	m^2	66	66	66	66	66	66
Birim Kütle Azaltımı ($\Delta M''$)	kg/m^2	1008	1166	1218	1246	1255	1259
Arasındaki Aralık	Days	134	277	425	608	785	2016
Ölçümler (t)	seconds (s)	3216	6648	10,200	14,592	18,840	48,384
	Saniye (s)	11,577,600	23,932,800	36,720,000	52,531,200	67,824,000	174,182,400
	$s^{0.5}$	3403	4892	6060	7248	8236	13,198
Zaman Faktörü $t h^{0.5}$	$h^{0.5}$	56.7	81.5	101.0	120.8	137.3	220.0
	$\text{day}^{0.5}$	11.6	16.6	20.6	24.7	28.0	44.9
Kılcal Nem	kg/m^3	0.296	0.238	0.201	0.172	0.152	0.095
İtme Katsayıları (C)	kg/m^3	17.78	14.30	12.06	10.32	9.14	5.73
	$\text{kg/m}^2 \text{ gün}^{0.5}$	87.11	70.07	59.09	50.54	44.80	28.05

Tablo 4'teki kapiler nem itme katsayılarının hesaplanmasında, referans ölçüm noktası (t_0) ile sonraki ölçüm zamanları arasındaki süreler dikkate alınmak yerine, ardışık ölçüm noktalarında gözlemlenen süreler ve bu noktalar arasında elde edilen ölçüm sonuçları esas alınmıştır.

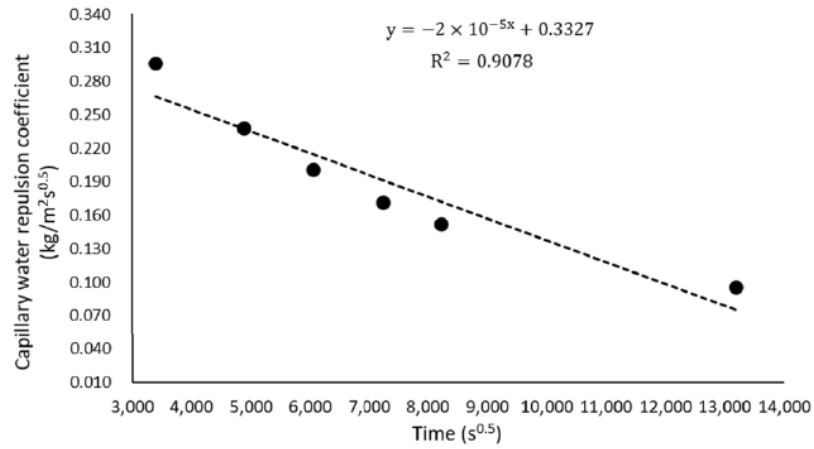
Tablo 4. Ardışık ölçüm veri noktalarından elde edilen hesaplamalar.

Değişkenler		Ölçüm Dönemi					
		t ₀ -t ₁	t ₁ -t ₂	t ₂ -t ₃	t ₃ -t ₄	t ₄ -t ₅	t ₅ -t ₆
Kütle Azaltımı (ΔM)	kg	66,550	10,421	3432	1841	593	281
Kesit Alanı (A_c)	m ²	66	66	66	66	66	66
Birim Kütle Azaltımı (ΔM)	kg/m ²	1008	157.9	52.0	27.9	8.9	4.2
Ölçümler Arası Aralık (t)	Günler	134	143	148	183	177	1231
	Saat (h)	3216	3432	3552	4392	4248	29,544
Zaman Faktörü t _{0.5}	Saniye (s)	11,370,600	12,355,200	12,787,200	15,976,200	15,392,800	106,358,400
	h ^{0.5}	56.7	58.6	59.6	66.3	65.2	171.9
Kılcal Nem	kg/m ² s ^{0.5}	11.6	12.0	12.2	13.5	13.3	35.1
	kg/m ² s ^{0.5}	0.296	0.04	0.01	0.007	0.002	0.0004
İtme Katsayıları (C)	kg/m ² s ^{0.5}	17.78	2.70	0.87	0.42	0.14	0.02
	kg/m ² gün ^{0.5}	87.11	13.20	4.27	2.06	0.68	0.12

Şekil 11, referans ölçüm noktası (t₀) ile diğer ölçüm aralıkları (t₁₋₆) arasında hesaplanan kılcal nem itme katsayılarını gösteren Tablo 3 sonuçlarını sunmaktadır. Sonuçlar, referans döneme kıyasla cihazın uygulanmasını takiben zamanla kılcal nem itme katsayısında doğrusal bir düşüş olduğunu göstermektedir. Sonuçlardaki doğrusal düşüşün nedeni şu şekilde açıklanabilir: malzemenin su iticiliği hem toplam su içeriği hem de belirli bir zaman dilimi içinde itilen su miktarı tarafından belirlenir. Başlangıçta, gövde en fazla miktarda su içerdiğinde ve neredeyse doymuş hale geldiğinde, toprak ve duvar arasındaki potansiyel fark en yüksek seviyededir. Dolayısıyla, ilk ölçüm periyodu birim zamanda itilen en büyük su miktarını ve en yüksek nem itme katsayısını vermiştir. Denklem (1)'e göre kapiler nem itme katsayısı, su ile temas eden bir yüzeyin su itme katsayısının zamanın karekökü ile ters orantılı olduğunu ifade eder. Literatürdeki deneysel çalışmalar incelendiğinde, su emme katsayısının da benzer bir fiziksel mekanizmaya atfedilebilecek doğrusal bir değişim sergilediği görülmüştür [36]. C değeri, t₀-t₁ ölçüm döneminde 0,296 kg/m² s^{0.5} iken, t₀-t₆ ölçüm dönemi referans olarak alındığında 0,095 kg/m² s^{0.5}'e düşmektedir. Bu nedenle, kılcal nem itme katsayısını belirlerken referans zaman aralığını dikkate almak çok önemlidir.

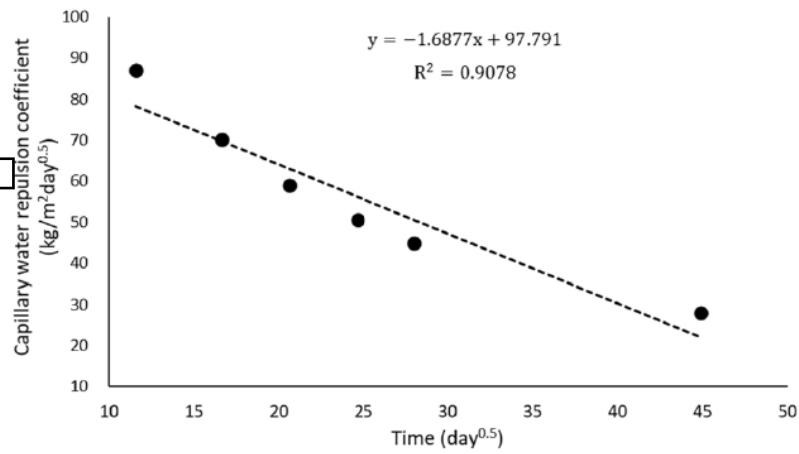
İki ölçüm periyodu arasındaki zaman aralığında elde edilen kılcal nem itme katsayıları Şekil 12'de gösterilmektedir. t₀-t₁ ölçüm döneminde C değeri 0,296 kg/m² s^{0.5} olarak kaydedilmiştir. Ancak, sonraki t₅-t₆ ölçüm döneminde bu değer yaklaşık %99 oranında önemli bir düşüş göstermiş ve C = 0,0004 kg/m² s^{0.5} olarak hesaplanmıştır. Sistemin kurulumundan önce bina alt tabakası neredeyse tamamen suya doymuş durumdaydı. Sistemin devreye girmesiyle birlikte kurutma süreci başlamıştır. Nem itme katsayısının hesaplanması boyunca, sekiz yatay konumda ölçümler alınmıştır. Her bir konumda, ölçümler üç farklı yükseklikte elde edilmiştir: En altta 50 cm, ortada 120 cm ve en üstte 200 cm. Duvardaki kütle su oranı 24 ölçüm noktasının ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir. Cihaz öncelikle elektrotların konumlandırıldığı yüksekliğin yakınında bir itme kuvveti oluşturmakta, ancak zamanla bu kuvvet duvarın alt noktalarına doğru yayılmaktadır. Bu nedenle veriler, duvarın üst kısımlarının daha hızlı kuruma yaşadığını, su kütlesi fraksiyonundaki gözle görülür değişikliklerin ise sadece alt kısımda belirli bir kuruma süresinden sonra meydana geldiğini göstermektedir. Bu bağlamda, t₅₋₆ adresindeki zaman süresi ilk ölçüm döneminden daha uzun olmasına rağmen, ilk ölçüm döneminde elde edilen C değeri son döneme göre önemli ölçüde daha yüksektir.

kılcal su itme katsayısı



(a)

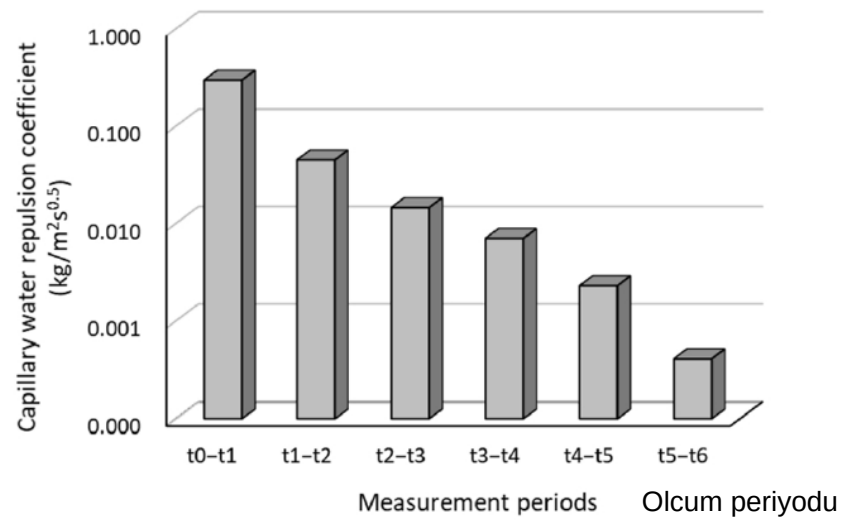
kılcal su itme katsayısı



(b)

Şekil 11. Farklı zaman faktörlerine göre elde edilen kılcal nem itme katsayıları (a) Zaman ölçeği bir saniyedir, (b) Zaman ölçeği bir gündür.

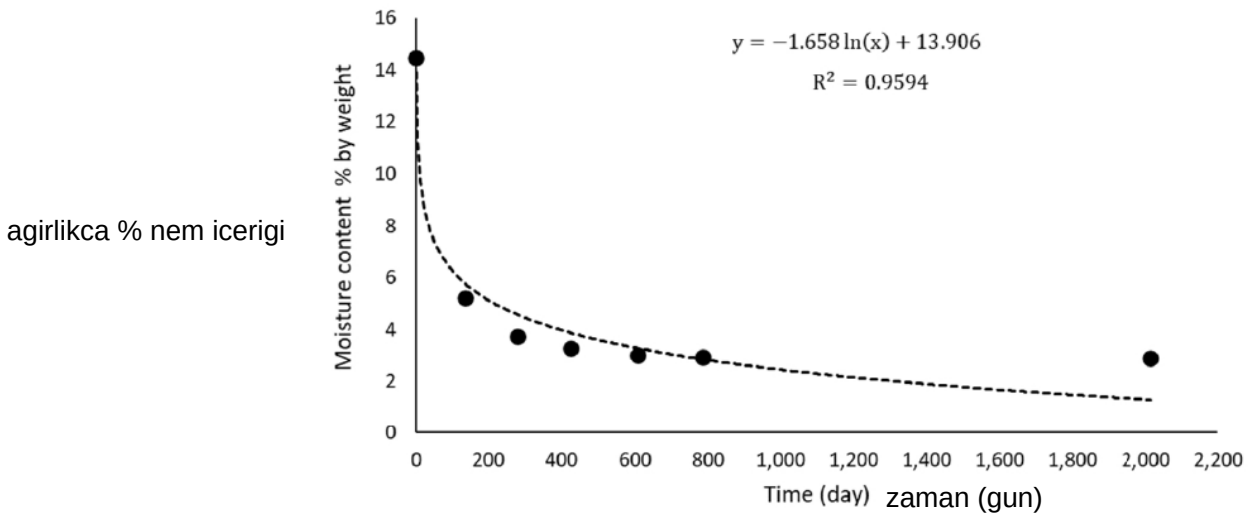
kılcal su itme katsayısı



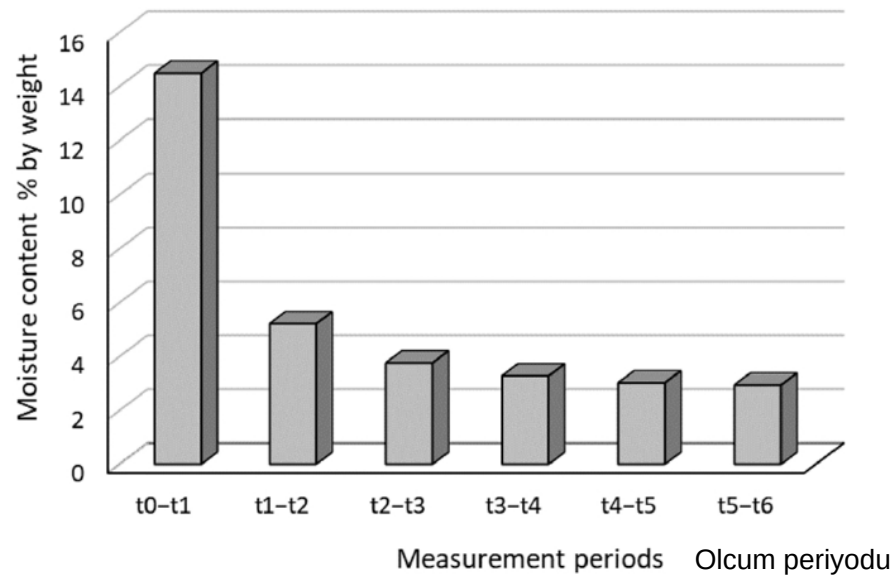
Şekil 12. Her ölçüm aralığında kılcal nem itme katsayılarındaki değişimler.

Şekil 13 ve 14, yağma duvarlardaki su kütlesinin zamanla değişen kısmının sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, kılcal nem itme aparatı etkinleştirildiğinde, nemi bina yapısından etkili bir şekilde dışarı attığını göstermektedir.

önceden var olan kılcal kanallardan geçerek toprağa karışır. Bununla birlikte, yapıdaki su miktarı zamanla azaldıkça, nem giderme oranı da azalır. Zaman içinde su kütlesi oranında logaritmik bir düşüşün varlığı, 0,96'lık bir belirleme katsayısı (R^2) ile tespit edilmiştir. Başlangıçta, yapıdaki su içeriği %14,48'dir (çok ıslak olarak sınıflandırılmıştır). Ancak zaman içinde 134. günde %5,2'ye düşmüştür (t_1). Sonunda, kritik kuruluk eşiği olan %4'ün altına düşmüş ve ölçüm zamanındaki 277. günde (t_2) %3,75'e ulaşmıştır. Nem itme mekanizması, yaklaşık 9 aylık bir süre boyunca duvarlardaki nem içeriğini etkili bir şekilde 'çok ıslak' seviyeden 'kuru' seviyeye düşürmüştür. Kritik bir noktaya ulaştıktan sonra su kütlesi nispeten sabit kalmıştır. Üçüncü ölçüm noktasında (t_3), su içeriği %3,28'e düşmüştür. Dördüncü ölçüm noktasında (t_4), su içeriği daha da azalarak %3,02'ye düşmüştür. Beşinci ölçüm noktasında (t_5), su içeriği %2,94'e düşmüştür. Son olarak, altıncı ölçüm noktasında (t_6), su içeriği %2,90'a düşmüştür. Ölçüm aralıkları arasındaki 1231 günlük süreye rağmen ($t_5 - t_6$), yapıdaki suyun kütle oranı bu süre zarfında sadece %0,04 oranında değişmiştir.



Şekil 13. Yığma duvarlardaki suyun kütle oranındaki zamana bağlı değişimler.



Şekil 14. Farklı ölçüm aralıklarında yığma duvar içindeki suyun kütle oranındaki değişimler.

Referans verilen literatür [46], belirli boyutlardaki numuneleri kontrollü su emilimine tabi tutarak ve zaman içinde emdikleri su miktarını ölçerek su emme katsayısını belirler. Malzemenin su emme katsayısı, su emiliminin sabit bir seviyeye ulaştığı zamanın (t) ve buna bağlı kütle artışının ölçülmesiyle hesaplanır. Bu çalışmada da aynı yaklaşım kullanılmış ancak kütle artışı yerine kütle azalması incelenmiştir. Bu bağlamda, farklı ölçüm aralıkları boyunca yığma duvar içindeki su kütlesi fraksiyonundaki dalgalanmalar araştırılmıştır.

Kılcal itme nedeniyle birim alan başına düşen su kütlesindeki azalmanın ve itilen suyun kuru kütleye oranının zaman değişim grafikleri (Şekil 15) incelendiğinde, yapıdaki suyun büyük bir kısmının t_{0-1} süresi boyunca yer değiştirdiği görülmektedir. 134 günlük süre zarfında, toplam 103.896 kg suyun 66.550 kg'ı gibi önemli bir miktarı yapıdan uzaklaşmış ve zemine emilmiştir. Geriye kalan 1882 gün boyunca t_{5-6} toplam 16.617 kg su toprağa salınmıştır. Ayrıca, her bir birim kesit alanı için kapiler itme aşağıdaki gibi olmuştur:

t_{0-1} döneminde $\Delta M'' = 1008 \text{ kg/m}^2$, t_{1-2} döneminde $157,9 \text{ kg/m}^2$, t_{2-3} döneminde 52 kg/m^2 , t_{3-4} döneminde $27,9 \text{ kg/m}^2$, t_{4-5} döneminde $8,9 \text{ kg/m}^2$ ve t_{5-6} döneminde $4,2 \text{ kg/m}^2$ 'dir. t_{5-6}

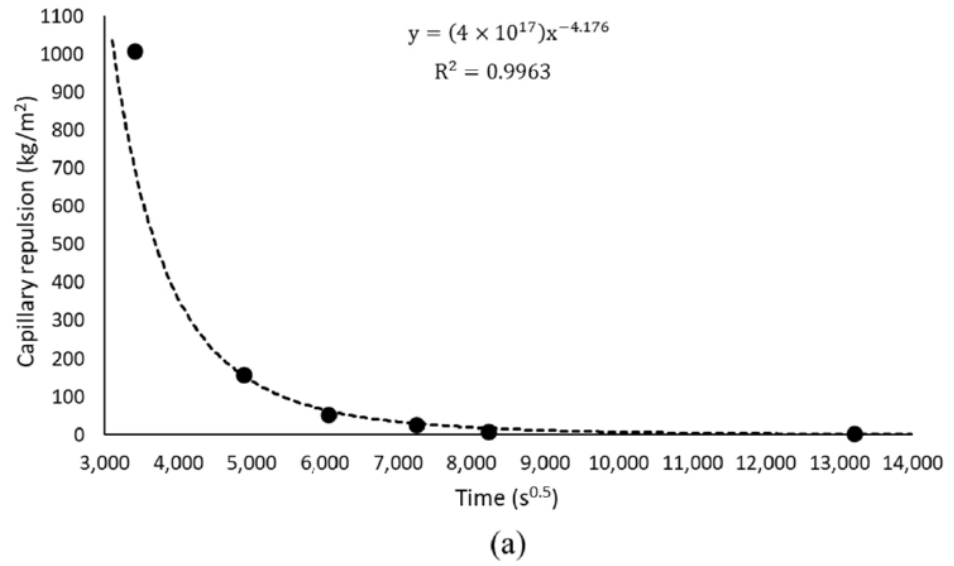
Diğer ölçüm dönemleriyle karşılaştırıldığında, kılcal itme değerinde bir önceki döneme kıyasla çok az değişiklik olmuştur. Bu nedenle, kılcal itmenin neredeyse sabit kaldığı ölçüm noktası (t_5) nihai kılcal nem itme katsayısını belirlemek için kullanılmıştır. Bu durum, t_{5-6} döneminde duvarın kuruluşunun çekilen su miktarında azalmaya neden olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, duvarların kurumasının bir sonucu olarak, suyun topraktan kılcal hareket yoluyla yukarı çekilme olasılığı daha yüksek olmuştur. Bu zaman diliminin ardından, elektro-osmoz olgusu suyun aşağı doğru itilmesine neden olmak yerine suyun yukarı doğru hareketini engelleyici bir rol oynamıştır. Birim zaman saniye cinsinden ölçüldüğünde (Şekil 15a), kılcal su itme katsayısı $0,152 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0,5}$ 'tir. Ancak, birim zaman gün olarak ölçüldüğünde (Şekil 15b), bu değer $44,8 \text{ kg/m}^2 \text{ gün}^{0,5}$.

Şekil 16, kılcal su itme katsayısı ile duvardaki suyun kütle oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, kılcal nem itme katsayısındaki değişim ile duvar yapısındaki suyun kütle oranı arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu ilişki, $0,99 R^2$ değeri ile yüksek oranda tanımlanmıştır.

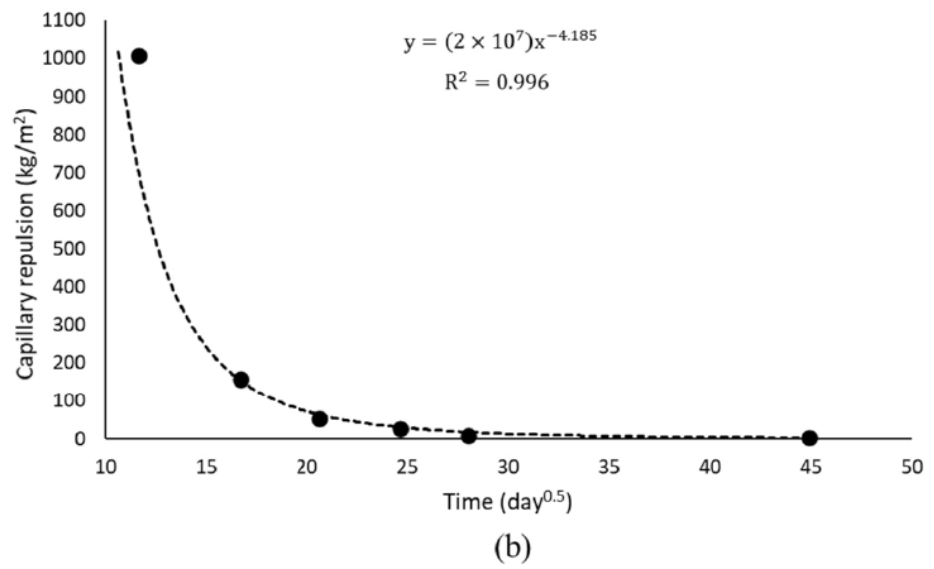
Literatür araştırmasına göre, yapı elemanlarındaki su içeriğinin artması, ısı iletim katsayılarının yükselmesine ve dolayısıyla ısı kaybının artmasına neden olmaktadır. Kaliforniya'nın iklim koşulları altında yapılan bir çalışma, nemli duvarların Aralık ve Ocak aylarında kuru duvarlara kıyasla enerji tüketiminde %19'luk bir artışa yol açtığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, duvarlarda su bulunması yaz aylarında soğutma talebini %18'e kadar azaltmaktadır [47].

Yapı malzemelerinin gözeneklerinde su bulunması, ısı yalıtım performanslarını olumsuz etkiler: nem içeriğindeki ağırlıkça %1'lik bir artışın, duvarın ısı iletkenliğinde %5'e varan bir artışa neden olduğu tahmin edilmektedir [21]. Dolayısıyla, gözenekli tuğla ve taşlar, doygunluk nedeniyle ısı iletkenliğinde %100'e varan bir artış yaşayabilir. Nemli kabuğun bu tür uygun olmayan ısı geçirgenliği, tarihi binaların ısıtılması için büyük enerji tüketimi ve büyük bir çevresel etki anlamına gelir [14]. Bu araştırma sırasında, sistem inşa edilmeden önce binadaki su kütlesi oranı başlangıçta %14,48 idi. Ancak en son yapılan ölçümde bu değer %2,90'a düşürülmüştür. Verilen referans çalışmaya dayanarak, bu senaryoda duvarlardaki iletim ısı transfer katsayısının yaklaşık %58 oranında azaldığı sonucuna varılabilir. Dolayısıyla, duvarlardan kaynaklanan ısı kayıplarının önemli ölçüde azaltıldığı ve bu oranın inşaat proje yönetimi alanında enerji verimliliği perspektifinden faydalı olduğu sonucuna varılabilir.

kılcal itme

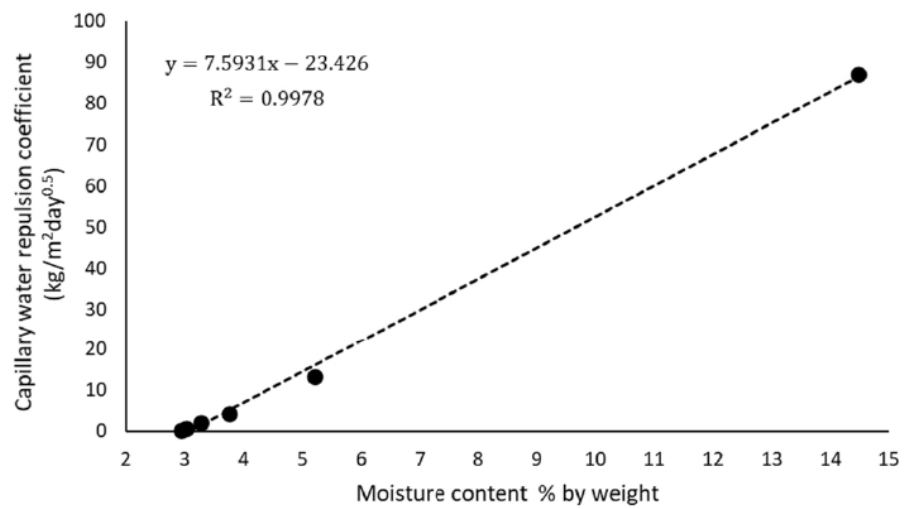


kılcal itme



Şekil 15. Zaman içinde nem itme performansı.

kılcal su itme katsayısı



Şekil 16. Kılcal su itme katsayısının suyun kütle oranı ile değişimi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, elektro-osmoz teknolojisini kullanan bir kılcal nem itme sisteminin uzun vadeli kurutma etkinliği incelenmiştir. Araştırma, duvarlarında kılcal hareketle su emilmesi nedeniyle yapısal sorunlar yaşayan Gül Camii'ne odaklanmıştır. Cihazın ilk kurulumu 24 Ocak 2017 tarihinde gerçekleştirilmiş ve 2 Ağustos 2022 tarihine kadar belirli aralıklarla toplam altı ölçüm yapılmıştır. Hem yatay hem de dikey olmak üzere toplam 24 ölçüm toplanmıştır. Bu ölçümler, binanın tüm duvarlarındaki suyun ağırlığını (%), birim bina hacmindeki suyun kütlesini ve toplam su miktarını vermiştir. Elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Zaman içinde su kütlesi fraksiyonunda logaritmik bir azalmanın varlığı $R^2 = 0.96$ hassasiyet düzeyinde tespit edilmiştir. Yapıdaki başlangıç su içeriği t_0 adresinde %14,48'dir (çok ıslak). Ancak bu değer t_1 adresinde (134. gün) %5,2'ye düşmüş ve t_2 adresinde (277. gün) önemli kuruluk eşiği olan %4'ün (özellikle %3,75) altına inmiştir. Nem itme mekanizması, duvarlardaki nem içeriğini yaklaşık 9 aylık bir zaman dilimi içinde etkili bir şekilde 'çok ıslak' seviyeden 'kuru' seviyeye düşürmüştür. Bu kritik zaman noktasından sonra su kütlesi asgari düzeyde değişiklik göstermiştir. Bu açıdan bakıldığında, sistemin sadece suyu duvardan toprağa aktarmakla kalmadığı, aynı zamanda nemli toprakla temas eden yapı bileşenlerini koruyarak suyun kılcal hareketle alınmasını engellediği görülmektedir.

Cihaz kurulduktan sonra, kılcal su itme katsayısı referans periyodunu takip ederek zaman içinde doğrusal bir şekilde düşer. Ölçüm dönemi boyunca $t_0 - t_1$, C değeri $0.296 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ 'tir. Ancak, $t_0 - t_6$ ölçüm periyodu referans olarak kullanıldığında, C değeri $0.095 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ 'e düşer.

t_0 ile t_1 arasındaki ölçüm döneminde C değeri $\text{kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ idi. Ancak, t ile t_{56} arasındaki ölçüm döneminde bu değer yaklaşık %99 oranında düşmüş ve $0.0004 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ olarak hesaplanmıştır.

Binadaki suyun büyük bir kısmının t_0 ile t_1 arasındaki zaman diliminde yer değiştirdiği sonucuna varılmıştır. 134 gün boyunca, başlangıçtaki 103.896 kg suyun toplam 66.550 kg'ı toprağa karışmıştır. t_{5-6} döneminin geri kalan 1882 günü boyunca toplam 16.617 kg su toprağa karışmıştır.

Nihai su itme katsayısı, su itme kuvvetinin neredeyse sabit kaldığı ölçüm noktası (t_5) kullanılarak belirlenmiştir. Birim zaman saniye cinsinden ölçüldüğünde, kılcal su itme katsayısı $0.152 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ 'tir. Ancak birim zaman gün cinsinden ölçüldüğünde bu değer $44,8 \text{ kg/m}^2 \text{ gün}^{0.5}$ olarak hesaplanmaktadır.

Ekipmanın kurulumundan sonra binanın su kütlesi oranı %14,48'den %2,90'a düşmüştür. Bu senaryo, duvar boyunca ısı iletkenliğini %58 oranında azaltma potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, duvarlar yoluyla ısı kaybında önemli bir azalma olduğu görülmektedir.

Küresel ısınma ve sera etkisi nedeniyle sıcaklıktaki değişimler, yağış düzenindeki değişikliklerin neden olduğu bağıl nemdeki dalgalanmalar, seller ve yükselen deniz seviyelerinin yanı sıra kasırga, tayfun ve hortumların neden olduğu hava hızındaki değişimler gibi aşırı hava olayları, gelecekteki iklim değişikliğini karakterize etmek için kullanılan başlıca göstergeler arasındadır. Hem tarihi hem de çağdaş binalar bu iklimsel etkilere karşı özellikle savunmasızdır. Sıcaklık, yağış ve toprak nemindeki artan dalgalanmaların ve değişikliklerin olumsuz etkilerini yaşarlar. Ayrıca, yapı malzemeleri bozulmaya ve güç kaybına uğrar [48]. Binanın yapısal sorunları varsa, mevsimsel etkiler yaşıyorsa veya aşırı hava koşullarıyla karşılaşılıyorsa, kılcal nemi önlemek için tasarlanmış olan elektro-osmoz sistemi tek başına önemli su girişini kontrol etmede etkili olmayacaktır. Bu tür durumları ele almak için, öncelikle büyük miktarlarda su akışını önlemek ve ardından daha güvenilir ve garantili bir çözüm sunan bir elektro-osmoz sistemi uygulamak tavsiye edilir.

Daha kapsamlı bir bilimsel araştırma için, kılcal nem itme sisteminin bina enerji tüketimi ve maliyet etkinliği üzerindeki etkisinin bir yaşam döngüsü analizi kullanılarak değerlendirilmesi tavsiye edilir.

Yazar Katkıları: Kavramsallaştırma, A.K. ve M.N.U.; Veri Düzenleme, E.Y. ve A.K.; Araştırma, A.K., E.Y. ve M.N.U.; Metodoloji, A.K. ve M.N.U.; Yönetim, A.K. ve M.N.U.; Yazım-Orijinal Taslak Hazırlama, A.K., E.Y. ve M.N.U.; Yazım-İnceleme ve Düzenleme, A.K., E.Y. ve M.N.U. Tüm yazarlar makalenin yayınlanan versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Finansman: Araştırma Unico Bina Enerji Çözümleri San. ve Tic. A.Ş. şirketinden (İstanbul, Türkiye) finansal destek almıştır.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Veriler makale içerisinde yer almaktadır.

Teşekkür: Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. (İstanbul, Türkiye) şirketine değerli teknik destekleri için en içten teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışmaları: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemişlerdir. Fon sağlayıcıların çalışmanın tasarımında; verilerin toplanmasında, analiz edilmesinde veya yorumlanmasında; makalenin yazılmasında veya sonuçların yayınlanması kararında hiçbir rolü olmamıştır.

Referanslar

1. Franzoni, E. Kagit yapılarında yükselen nemin azaltılmasına yönelik yöntemlerin durumu- of-the-art. *J. Cult. Herit.* **2018**, *31*, S3-S9. [CrossRef]
2. Sandrolini, F.; Franzoni, E. Eski yapıların gözenekli malzemelerinde güvenilir nem ölçümleri için bir çalışma protokolü. *Yapı. Environ.* **2006**, *41*, 1372-1380. [CrossRef]
3. Vos, B.H. Yeraltı Suyunun Emilmesi. *Çalışma. Conserv.* **2014**, *16*, 129-144. [CrossRef]
4. Yousuf, H.; Al-Kheetan, M.J.; Rahman, M.M.; Ghaffar, S.M.; Braimah, N.; Chamberlain, D.A. Yığma yapılarda yeni bir fitil drenaj konseptinin tanıtılması. *J. Build. Eng.* **2022**, *51*, 104332. [CrossRef]
5. Al-Kheetan, M.J.; Rahman, M.M.; Chamberlain, D.A. Kristalleşen nem engelleme işlemi ile duvar yapılarının iyileştirilmesi ve korunması. *Int. J. Build. Pathol. Adapt.* **2018**, *36*, 77-92. [CrossRef]
6. Lieff, M.; Trechsel, H.R. *Binalarda Nem Göçü: Bir Sempozyum*; ASTM: West Conshohocken, PA, ABD, 1982.
7. Karoglou, M.; Moropoulou, A.; Giakoumaki, A.; Krokida, M.K. Bazı yapı malzemelerinin kapiler yükselme kinetiği. *J. Colloid Interface Sci.* **2005**, *284*, 260-264. [CrossRef] [PubMed]
8. Jiménez-González, I.; Rodríguez-Navarro, C.; Scherer, G.W. Kumtaşının fizikomekanik bozulmasında kil minerallerinin rolü. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* **2008**, *113*, 1-17. [CrossRef]
9. Kim, R.L.; Tore, K.; Hans, O.H.; Jan, V.T.; Knut, H. Gözenekli, mineral yapı malzemeleri için bir don çürütmesine maruz kalma indeksi. *Yapı. Environ.* **2007**, *42*, 3547-3555.
10. Franzoni, E.; Sassoni, E. simüle edilmiş asit yağmuruna maruz kalan doğal taşların mikroyapısal özellikleri ve ağırlık kaybı arasındaki korelasyon. *Sci. Total Environ.* **2011**, *412-413*, 278-285. [CrossRef]
11. Pleyers, G.J. Islak koşullarda yükselen nemin yeni hidrofobik gözenek doldurucu reçinelerle tedavisi. *Hydrophobe III, Su İtici Maddelerle Yüzey Teknolojisi 3. Uluslararası Konferansı Bildirileri, Universität Hannover, Hannover, Almanya, 25-26 Eylül 2001*; Aedificatio Verlag: Freiburg, Almanya, 2001; s. 247-256.
12. Salmon, D.R.; Williams, R.G.; Tye, R.P. Yığma Malzemelerde Termal İletkenlik ve Nem Ölçümleri. *Yalıtım içinde Malzemeler: Test ve Uygulamalar*; ASTM International: West Conshohocken, PA, ABD, 2002; Cilt 4, s. 58-75.
13. Gentilini, C.; Franzoni, E.; Bandini, S.; Nobile, L. Tuz Saldırısının Duvarın Kesme Davranışı Üzerindeki Etkileri: Bir Deneysel Kampanyasının Ön Sonuçları. *Anahtar Müh. Mater.* **2017**, *747*, 512-517. [CrossRef]
14. Franzoni, E. Tarihi duvarlardan yükselen nemin uzaklaştırılması: Hala açık bir meydan okuma. *İnşaat. Build. Mater.* **2014**, *54*, 123-136. [CrossRef]
15. Bertolini, L.; Coppola, L.; Gastaldi, M.; Redaelli, E. Gözenekli yapı malzemelerinde elektroosmotik taşınım ve duvarcılıkta nem alma. *İnşaat. Yapı. Mater.* **2009**, *23*, 254-263. [CrossRef]
16. Collepardi, M. Tarihi binaların yığma duvarlarının bozulması ve restorasyonu. *Mater. Struct.* **1990**, *23*, 81-102. [CrossRef]
17. Heiman, J.L. Yükselen Nemi Arıtma Yöntemleri Üzerine Bir Değerlendirme. *Binalarda Nem Göçü içinde*; ASTM International: West Conshohocken, PA, ABD, 1982; s. 121-137.
18. Hampel, C.A. *The Encyclopedia of Electrochemistry*; Reinhold Pub. Corp: New York, NY, ABD, 1964.
19. Azzam, R.; Oey, W. Elektrokinetiğin Geoteknik ve Çevre Mühendisliğinde Kullanımı. *Transp. Gözenekli Ortam* **2001**, *42*, 293-314. [CrossRef]
20. Andrade, C.; Castellote, M.; Sarria, J.; Alonso, C. Gözenek çözümleri kimyasının evrimi, elektro-osmoz ve inşaat demiri korozyon hızı realkalizasyonun neden olduğu. *Materyal. Struct.* **1999**, *32*, 427-436. [CrossRef]
21. Casagrande, L. Zeminlerin Elektro-Osmotik Stabilizasyonu. *J. Boston Soc. Civil Eng.* **1952**, *39*, 51-83.
22. Paz-García, J.M.; Johannesson, B.; Ottosen, L.M.; Alshawabkeh, A.N.; Ribeiro, A.B. Tuğlaların elektrokinetik tuzdan arındırılmasının modellenmesi. *Electrochim. Acta* **2012**, *86*, 213-222. [CrossRef]

23. Sharpe, R.W. Nem geçirmezlik için enjeksiyon sistemleri. *Yapı. Environ.* **1977**, *12*, 191-197. [CrossRef]
24. Young, D. *Salt Attack and Rising Damp: Tarihi ve Eski Binalarda Tuz Nemi Kılavuzu*; NSW Miras Konseyi, Victoria Miras , Güney Avustralya Çevre ve Miras Departmanı, Adelaide Şehir Konseyi: Kilkenny, Birleşik Krallık, 2008.
25. Torres, I.; de Freitas, V.P. Duvar kalınlığının ve özelliklerinin tarihi binalarda yükselen nemin tedavisi üzerindeki etkisi. *İnşaat. Build. Mater.* **2010**, *24*, 1331-1339. [CrossRef]
26. Zhang, X.; Nowamooz, H. Stabilize edilmemiş sıkıştırılmış toprak (URE) duvarlarda yükselen nemin etkisi. *İnşaat. Build. Mater.* **2021**, *307*, 124989. [CrossRef]
27. Pratiwi, S.N.; Wijayanto, P.; Putri, C.A. Miras binalarda kılcal damar yükselmesinin teşhisi. *IOP Konf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2021**, *780*, 012076. [CrossRef]
28. Goudjil, N.; Vanhove, Y.; Djelal, C.; Kada, H. Betonun Kalıptan Çıkarılması için Elektro-Osmoz Uygulaması. *J. Adv. Concr. Technol.* **2012**, *10*, 301-312. [CrossRef]
29. Peruzzi, R.; Poli, T.; Toniolo, L. Koruyucu uygulamaların değerlendirilmesi için deneysel test: "Kapiler absorpsiyon indeksi" üzerine eleştirel bir inceleme. *J. Cult. Herit.* **2003**, *4*, 251-254. [CrossRef]
30. Tomašić, I.; Lukic, D.; Pec, N.; Kršinić, A. Doğal taşta kapiler su emiliminin dinamikleri. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2011**, *70*, 673-680. [CrossRef]
31. Washburn, E.W. Kılcal Akışın Dinamiği. *Phys. Rev.* **1921**, *17*, 273-283. [CrossRef]
32. Rirsch, E.; Zhang, Z. Yığma duvarlarda yükselen nem ve harç özelliklerinin önemi. *İnşaat. Build. Mater.* **2010**, *24*, 1815-1820. [CrossRef]
33. Lu, J.; Wang, K.; Qu, M.-L. Gözenekli yapı malzemelerinin kapiler su emme katsayısının deneysel olarak belirlenmesi: Aralıklı ve sürekli emilim testleri arasında bir karşılaştırma. *J. Build. Eng.* **2020**, *28*, 101091. [CrossRef]
34. Çelik, M.Y.; Sert, M. Kültürel mirasların yapı taşı olarak kullanılan Döğ er tüfünde (Afyonkarahisar-Türkiye) farklı tuz çözeltileri ve konsantrasyon oranlarına bağlı kılcal su emme değişimlerinin değerlendirilmesi. *J. Build. Eng.* **2021**, *35*, 102102.
35. Çelik, M.Y.; Köken, I. Volkanik Kayaçların Kapiler Su Emme Kapasitesine Sıcaklık ve Tuzlu Suyun Etkisi Yapı Taşı Olarak Kullanılır. *J. Innov. Civ. Mühendislik. Technol.* **2023**, *5*, 17-47.
36. Çelik, M.Y.; Yılmaz, S. *Statik, Tuzlu ve Asidik sulu Ortamların Poroziteli Yapıtaşlarının Kapiler su Emme Potansiyeline Etkisi*; Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi: Ankara, Türkiye, 2018; s. 611-628.
37. Karagiannis, N.; Karoglou, M.; Bakolas, A.; Krokida, M.; Moropoulou, A. Dinamik çevre koşullarının yapı malzemelerinin kılcal su alımı üzerindeki etkisi. *J. Build. Phys.* **2018**, *42*, 506-526. [CrossRef]
38. Torres, M.I.M.; de Freitas, V.P. Tarihi yapılar da yükselen nemin modellenmesi. *Tarihi Yapılar içinde. Possibili-Ties of Numerical and Experimental Techniques, Proceedings of the 3rd International Seminar, Guimaraes, Portugal, 7-9 November 2001*; Lourenço, P.B., Roca, P., Eds.; University of Minho: Guimarães, Portugal, 2001; pp. 381-390.
39. Holm, A.; Künzle, H.M. WUFI2d ile yükselen nemin iki boyutlu geçici ısı ve nem simülasyonları. *Research in Building Physics içinde*; CRC Press: Boca Raton, FL, ABD, 2020; pp. 363-367.
40. Baker, P.H.; Bailly, D.; Campbell, M.; Galbraith, G.H.; McLean, R.C.; Poffa, N.; Sanders, C.H. X-ışını absorpsiyonunun bina nem taşıma çalışmalarına uygulanması. *Ölçüm* **2007**, *40*, 951-959. [CrossRef]
41. Mirline. Uygulama Süreci Nedir: Nem ve Tuz Giderme Teknolojisi. 7 Mart 2021. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://www.mirline.com/sistemimiz/uygulama-sureci-nasildir> (15 Aralık 2023 tarihinde erişilmiştir).
42. Merkezi, T.I. *A. TDV İslâm Ansiklopedisi*; Türkiye Diyanet Vakfı (TDV): Ankara, Türkiye, 1988; Çevrimiçi erişim: <https://islamansiklopedisi.org.tr/gul-camii> (erişim tarihi: 15 Aralık 2023).
43. GANN. GANN El Kitabı 30 (HB30). Çevrimiçi olarak mevcuttur: https://www.gann.de/_Resources/Persistent/71d36426de8dc0f29a536_5dc197efe99841a380c/HB30_EN.pdf (15 Aralık 2023 tarihinde erişilmiştir).
44. Chassagne, R.; Dörfler, F.; Guyenot, M.; Harting, J. Eksenel simetrik geometrilerde kapiler tahrikli akışların modellenmesi. *Hesaplamalı. Fluids* **2019**, *178*, 132-140. [CrossRef]
45. *BS EN 1925:1999*; Doğal Taş Test Yöntemleri. Kapilarite ile Su Emme Katsayısının Belirlenmesi. İngiliz Standartları Enstitüsü (BSI): Londra, Birleşik Krallık, 15 Ağustos 1999.
46. Adan, O.C.G.; Eindhoven, T.U. *On the Fungal Defacement of Interior Finishes*; Eindhoven University of Technology: Eindhoven, The Hollanda, 1994.
47. Gawin, D.; Kos'ny, J.; Desjarlais, A.O. Nemin Hafif Beton Duvarlı Binaların Termal Performansı ve Enerji Verimliliği Üzerindeki Etkisi. *Commer. Build. J. Technol. Des. Perform. Anal.* **2000**, *3*, 149-159. Çevrimiçi olarak mevcuttur: https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/ACEEE_buildings/2000/Panel_3/p3_12/ (15 Aralık 2023 tarihinde erişilmiştir).
48. D'Ayala, D.; Aktas, Y.D. Rüzgarla gelen yağmur ve sele maruz kalan tarihi binaların kagır dokusundaki nem dinamikleri. *Yapı. Environ.* **2016**, *104*, 208-220. [CrossRef]

Sorumluluk Reddi/Yayıncının Notu: Tüm yayınlarda yer alan ifadeler, görüşler ve veriler yalnızca yazar(lar)a ve katkıda bulunan(lar)a aittir, MDPI ve/veya editör(ler)e ait değildir. MDPI ve/veya editör(ler), içerikte atıfta bulunulan herhangi bir fikir, yöntem, talimat veya türünden kaynaklanan insanlara veya mallara gelebilecek herhangi bir zarar için sorumluluk kabul etmez.