

# Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi

Editör: Dr. Öğretim Üyesi Hakan ÇAĞLAR

YIL: 2021 CİLT:4 SAYI:2  
ISSN: 2651-3544

## İçindekiler

**Aerojel' in Çimentoda Kullanımı**  
Gürkan ALPARSLAN

**Tuğla, Bims ve Gazbetonun Isıl Verimlilik ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması**  
Çağrı AVAN, Hamit YILDIZ, Emrullah AVAN

**Heterojen Rüzgâr Çiftliği Saha Seçimi**  
Pınar BAYRAM, Ezgi Esi CELEP, Sultan KOSTAK, Zehra KAMIŞLI ÖZTÜRK

**Havalimanlarında Güneş Enerji Sistemlerinin Kullanılması İle İşletme Maliyetinin Azaltılması**  
Duygu YILMAZ, Fatih KORKMAZ

**Perlitin Dünyada ve Türkiye'de Çimento ve Beton Sistemlerinde Kullanımı**  
Lutfullah Turanlı, Cihan Dernek

**Geleneksel Sistemlerden Sürdürülebilir Akıllı Sistemlere Geçişte Model Önerisi**  
M. Batuhan ZEYBEK, Leyla Y. TOKMAN

**İç Mekânda Enerji Verimliliği ve Teknoloji İlişkisi: Güncel Uygulamalar Bağlamında Bir İrdeleme**  
Filiz TAVŞAN, Cevgiz TAVŞAN, Edanur FETTAHOĞLU

**Hydrological and Meteorological Drought Forecasting for the Yesilirmak River Basin, Turkey**  
Utku ZEYBEKOĞLU, Aylar BOUSTANI HEZARANI, Aslı ÜLKE KESKİN

**Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi uluslararası bilimsel hakemli bir dergidir.**

Haziran ve Aralık Aylarında yılda 2 defa çevrimiçi olarak yayınlanır.

Taranmakta olunan indeks:



Aralık - 2021

**Editör:**

Dr. Öğretim Üyesi Hakan ÇAĞLAR

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

**Editör Yardımcısı:**

Dr. Çağrı AVAN

Kastamonu İl Milli Eğitim Müdürlüğü

**Editör Kurulu:**

Prof. Dr. Uğur ÖZCAN  
Prof. Dr. Bahattin AYDINLI  
Prof. Dr. Mustafa KURT  
Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN  
Prof. Dr. Savaş CANBULAT  
Prof. Dr. Serkan URANBEY  
Prof. Dr. Yunus PAMUKOĞLU  
Doç. Dr. Abdullah CANDAN  
Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU  
Doç. Dr. Ali SAYGIN  
Doç. Dr. Arzuhan Burcu GULTEKİN  
Doç. Dr. Burak ARICAK  
Doç. Dr. Cennet YAMAN  
Doç. Dr. Gizem KARAKAN GÜNAYDIN  
Doç. Dr. Gökhan SURUCU  
Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT  
Doç. Dr. Lenka KOUŘIMSKÁ  
Doç. Dr. Arch. Milena Nanova  
Doç. Dr. Arch. Panayot SAVOV  
Doç. Dr. Arch. Sonia PARVANOVA-YONCHEVA  
Doç. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN  
Doç. Dr. Süleyman GÖKÇE  
Doç. Dr. Yasin ERDOĞAN  
Doç. Dr. Zeynel BAŞIBÜYÜK  
Dr. Öğretim Üyesi Adem AHISKALI  
Dr. Öğretim Üyesi Ali Kemal ÇAKIR  
Dr. Öğretim Üyesi Asude ÇAVUŞ  
Dr. Öğretim Üyesi Arzu ÇAĞLAR  
Dr. Öğretim Üyesi Behçet DÜNDAR  
Dr. Öğretim Üyesi Emin Sertaç ARI  
Dr. Guang-jie Zhao  
Dr. Öğretim Üyesi Melis ALPASLAN TAKAN  
Dr. Mohamad Mazen HAMOUD-AGHA  
Dr. Öğretim Üyesi Reza ABDİ  
Dr. Öğretim Üyesi Tahir AKGÜL  
Dr. Öğretim Üyesi Utku ZEYBEKOĞLU

Gazi Üniversitesi  
Kastamonu Üniversitesi  
Marmara Üniversitesi  
Ege Üniversitesi  
Kastamonu Üniversitesi  
Ankara Üniversitesi  
Süleyman Demirel Üniversitesi  
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi  
Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi  
Gazi Üniversitesi  
Gazi Üniversitesi  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Yozgat Bozok Üniversitesi  
Pamukkale Üniversitesi  
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi  
Sinop Üniversitesi  
ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
University of Architecture Civil Eng. and Geodesy  
University of Architecture Civil Eng. and Geodesy  
University of Architecture Civil Eng. and Geodesy  
Gazi Üniversitesi  
Bayburt Üniversitesi  
İskenderun Teknik Üniversitesi  
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi  
Kastamonu Üniversitesi  
Aydın Adnan Menderes Üniversitesi  
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi  
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi  
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi  
Beijing Forestry University  
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi  
Institute Polytechnique UnilaSalle  
University of Bonab  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi  
Sinop Üniversitesi

**Sayı Hakemleri:**

Prof. Dr. Turhan BİLİR  
Doç. Dr. Elif SÖNMEZ  
Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN  
Doç. Dr. Mehmet CANBAZ  
Doç. Dr. Şebnem ERTAŞ BEŞİR  
Dr. Öğretim Üyesi Arzu ÇAĞLAR  
Dr. Öğretim Üyesi Berrin KÜÇÜKCAN  
Dr. Öğr. Üyesi FATMA KÜRÜM VAROLGÜNEŞ  
Dr. Öğretim Üyesi Hülya ÖZTÜRK TEL  
Dr. Öğretim Üyesi İsmail TOPALOĞLU  
Dr. Öğretim Üyesi Melis ALPARSLAN TAKAN  
Dr. Öğretim Üyesi Mustafa TEKE  
Dr. Öğretim Üyesi Sennur HİLMİOĞLU  
Dr. Öğretim Üyesi Sinan NACAR  
Dr. Öğretim Üyesi Utku ZEYBEKOĞLU  
Dr. Öğretim Üyesi Vahdettin DEMİR

İstanbul Üniversitesi  
Altınbaş Üniversitesi  
Kırıkkale Üniversitesi  
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Akdeniz Üniversitesi  
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi  
İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi  
Bingöl Üniversitesi  
Atatürk Üniversitesi  
Çankırı Karatekin Üniversitesi  
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi  
Çankırı Karatekin Üniversitesi  
Haliç Üniversitesi  
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi  
Sinop Üniversitesi  
KTO Karatay Üniversitesi

## **Aerojel'in Çimentoda Kullanımı**

### **Use Of Airgel in Cement**

Gürkan ALPARSLAN

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Doi: 10.51764/smutgd.947702

Geliş Tarihi : 03.06.2021

Kabul Tarihi : 05.07.2021

#### **ÖZET**

Bu çalışmada 'Yeryüzündeki en hafif katı madde' olarak tanımlanan Aerojelin çimentodaki kullanımı incelenmiştir. Aerojeller %99 düzeylerinde havadan oluştukları için oldukça gözenekli ve hafif malzemelerdir. Aerojeller doğa dostu olmaları, ileri kimyasal ve termal kararlılıkları ve oldukça yüksek dayanımları sayesinde çimento içeriğine dâhil edildiğinde çimento katkılı malzemelerin termal ve akustik izolasyon performanslarına ve birçok özelliğine ilave sağlamaktadır. Bu nedenle aerojel katkılı çimento önümüzdeki yıllarda oldukça popüler bir malzeme olma özelliğini taşıyacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Çimento, Malzeme, Aerojel

#### **ABSTRACT**

In this study, the use of Airgel, which is defined as 'the lightest solid substance on earth', in cement has been investigated. Since aerogels consist of 99% air, they are very light and porous materials. Aerogels contribute to the acoustic and thermal insulation performance and many properties of cement-based materials when included in the cement content, thanks to their environmental friendliness, improved thermal and chemical stability and relatively high strength.

**Keywords:** Airgel, Cement, Material

## GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle sürekli karşımıza yeni malzemeler çıkmakta, karşımıza çıkan bu malzemeler, yapı sektörü de dâhil birçok alanda kullanılmaktadır. (Altın, 2014).

Mevcut binaların yaklaşık sıfır enerji binalarına doğru yenilenmesini teşvik etmek için yenilikçi malzemeler ve çözümler düşünülmektedir. Bu bağlamda, inşaat sektörü son zamanlarda nanoteknoloji tarafından üretilen çeşitli materyalleri kullanarak geleneksel malzemeleri geliştirmeye çalışmaktadır. Nano teknolojinin uygulanması yapı malzemelerinin performansını kuvvet ve dayanıklılık açısından önemli ölçüde artırabilir ve kendi kendini temizleyen cepheler, akıllı pencereler, süper yalıtım malzemeleri ve benzeri gibi kullanışlı özellikler ekleyebilir. Aerojel, enerji verimliliği yüksek binalarda ve pencerelerde kullanılabilir en umut verici nano malzemelerden biridir ayrıca vakum koşullarında 0.010 W/m<sup>2</sup>. K'den daha düşük ısı iletkenliğe ve iyi optik şeffaflığa (ışık geçirgenliği) sahip çok gözenekli bir nano yapı malzemesidir. (ZAIDI, 2017).

Aerojel, yapı sektöründe bir çeşit şeffaf izolasyon malzemesi olarak tercih edilen bir malzemedir. Samuel S. Kistler isimli bilim adamı 1930'lu yıllarda bu maddeyi keşfetmiş ve geliştirmiştir. "Dünya Üzerinde keşfedilmiş ağırlığı en az olan katı cisim" olarak nitelendirilmektedir. Buz tutmuş sis görünümünde, cam gibi şeffaf bir maddedir. Cam gibi şeffaf olduğu için bina dış cephelerinde ve binaların çatılarında kullanımı olağandır. Madde bir de "süper yalıtkan" olarak isimlendirilmektedir. Bu da yapılarda şeffaf izolasyon maddesi olarak kullanımını izah etmektedir. Aynı zamanda aerojelin yanmazlık performansı da oldukça iyidir. Henüz bu yöntem benimsenmemiş olsa da bu malzemenin gelecekte binaların yangın ve ısı yalıtımında da kullanılacağı söylenebilir. (Altın, 2014).

## AEROJELLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

### Aerojel

Günümüz teknolojisinin yeni bir icadı gibi görünse de, aerojelin icadı 1930'ların başlarına kadar uzanıyor. Steven S. Kistler California'daki Pacific College'da çalışıyordu ve ıslak jel malzemesiyle aynı boyut ve şekilde katı bir jel yapmanın bir yolunu arıyordu. Bunu elde etmenin en basit yolu da bu yaş jelin kimyasına zarar vermeden bünyesindeki suyu ayırmak olarak görünmüştü. Fakat bu işlemin öncesinde bazı engeller ortaya çıkmıştı; örneğin suyu içerisinden atmak için kurumaya terk edildiğinde jel, büzülerek boyu kılalacak ve şekli de değişecekti. Kistler bu yerde doğru bir fikir ortaya atmayla jelin katı bölgesinin mikro tanecikli olduğunu, buğulaşan suyun da bu tanecikli yapıyı bozacak bir gerilim yüzey kuvveti ortaya koyacağını düşündü ve sonuca ulaşmanın yolunu bu sayede anladı. Kistler, Aerojel oluşturmak için en sağlam ve güzel yolun, jelin bünyesindeki suyun yerine havanın geçmesiyle oluşacağını düşünmüştü. Gerçekte "Aerojel" kelimesini de bu yerde buldu (air gel, demek ki hava jeli kelimelerinden geliyor). Kistler'e göre, akışkan buhar basıncından çok daha yüksek basınç altında barındırıp sıcaklığı yükselttiğinizde hassas sıcaklıkta bu akışkan gaz halini alacak ve bu sayede akışkanın yerine gaz geçecekti. Bu usulde ilk aerojelini ortaya çıkaran Kistler'in bu ilginç maddeyle ilgili makalesi de 1931 yılında Nature dergisinde ilan edilmişti. (BiLiMveTEKniK, 2008)

"Dünya Üzerinde keşfedilmiş ağırlığı en az olan katı cisim" olarak belirtilen aerojeller, içinde %95 ve %99,9 mertebelerinde hava barındıran havalandırılmış sünger olarak nitelendirilmekte olup kalan bölüm ise şeffaf bir maddedir. Mesela silika ismiyle tanınan silikon dioksit. Çok küçük ebatlarda sıkışan hava molekülleri yer değiştiremezler. Bu nedenle bu malzeme yüksek ısı izolasyon özelliğine sahip olur. Bu olay sayesinde aynı şekilde ses izolesi için de sağlanır, yer değiştiremeyen hava molekülleri sebebiyle maddenin ses dalgalarını en düşük oranda geçirmesi meydana gelmekte bu nedenle aerojel madde çok iyi bir ses izole maddesi de olmaktadır. Bunun sayesinde farklı kimyasal ve fiziksel özelliği içinde bulundurur. Aerojel, buz tutmuş sis görünümünde şeffaf bir madde olup, bu nedenle de bina dış cephelerinde kullanımı muhtemeldir. (Altın, 2014).

### Aerojelin Yapısı ve Fiziksel Özellikleri

Aerajeller, çok düşük yoğunluğa, çok düşük ısı iletimine ve düşük dielektrik sabitine sahip olmakla birlikte çok fazla özgül yüzey hacmine sahip olmakla birlikte çok küçük gözenekli üç boyutlu örgü yapı katı malzemelerdir. Günümüzde çok türlü aerajeller üretilmekte ve gaz uyarıcı sensörleri, sorbent, ısı izolasyon levhaları ve hidrojen biriktirme gibi çok farklı sektörde kullanılmaktadırlar. Bu sebeple aerajeller hususunda yapılan araştırmalar son zamanlarda çok büyük bir hıza sahip olmuştur. (ÖZ, ÖZ, & KAYA, 2017).

Çok fazla ısı iletkenlik yeteneğine sahip olan aerojelin ısı iletimi katsayısı yalnızca 0.018 W/mK olup, epey düşük bir değere sahiptir. Bu nedenle yapının ısı kaybını azalttığı ve aynı şekilde sıcak hava bölgelerinde yazları dışarıdan ısı kazanımını da azaltmaktadır. Böylece malzeme hem soğutma hem de ısıtma yüklerini önemli düzeyde düşürmektedir.

Aerojel maddenin ışığı belirgin ve eşit yayma niteliği vardır. Bu sebeple iç mekânda aynı şekilde parlamanın da önüne geçerek görsel rahatlık koşullarını meydana getirir. Hidrofobik özelliğe malik olup bu sebepten dolayı yapıyı nem ve küf gibi etkilerinden korur. Üstelik aerojel maddenin fiziksel mukavemeti de oldukça yüksektir. (Altın, 2014).

Aerojeller ilk olarak jöle halindedir. Bu jöle, etanol ve silika gibi bir akışkan çözücünden meydana gelir ve alkojel olarak isimlendirilir. Silikon alkoksitin ( $\text{Si(OR)}_4$ ) bir çözücü içerisinde su ile polimerize edilmesiyle Alkojeller meydana gelir. Buradaki reaksiyonda alkoksit zerrelere hidrolizle birleşerek silikon-oksijen bağlanması meydana getirir ve bu sayede mini polimerler yani oligomerler meydana gelir. Bu oligomerler birleşerek daha sonradan jölenin katı kısmını meydana getirecek olan büyük tanecikleri meydana getirir. Alkojellerdeki silika dizilimi çok küçük etanol kutucuklarıyla doludur. Jöle bünyesindeki bu çok küçük etanol kutucuklarına nano-gözenek ismi verilir. Bu sebeple aerojel, alkojellerin kurutulması ile katı silika katkılarından akışkanın ayrıştırılmasıyla meydana getirilir. Buğulaşan akışkan çözücü malzemenin jöleden tamamıyla ayrışması jölenin biraz küçülmesine ve boyutunun da %10 oranlarında küçülerek daha sıkı bir katının meydana gelmesine sebep olur. Bu katı maddeye xerojel (bu kısımdaki “xero” ön eki sert anlamına gelmektedir) ismi verilir. Aerojel meydana getirilirken çözücü maddeyi buharlaştırmaktansa jölenin süper kritik koşullarda kurutulması yoluna gidilir. Süper kritik kurulum, jölenin şeklini bozmadan akışkanın uzaklaştırılması yoludur. Bu yolda kullanılan süper kritik sıvılar çoğu zaman yüksek basınç ve yüksek sıcaklıktaki yarı-gaz/yarı-sıvılardır. Gerçekte bütün sıvıları süper kritik sıvı hale dönüştürülebilir. Bu sıvıların gazlara benzeyen genleşebilme özelliği olsa da yoğunlukları ve ısı iletimi yetenekleri akışkan hale daha benzemektedir. Süperkritik olarak alkojelin kurulumu işleminde jel içerisindeki ayrıştırıcının hassas ısısına varabilmesi için ilk başta ısıtma işlemi olaya dâhil olur. Hassas ısıya varıldığında jöleden ayrılan akışkanın yerine gaz doldurulur. Neticede meydana gelen mavi renkli katı cisim, silikadan üretilmiş, içi %50 ile %99 oranında hava ile dolu çok küçük paketler bulunduran aerojeldir. Aerojellerin mavi boyalı olmasının nedeni havanın mavi renkli olmasıyla aynı nedene dayanır. Her iki olayda da mavi rengi ortaya koyan süreç Rayleigh saçılımıdır. Rayleigh dağılımı, beyaz bir ışık süzmesinin kendi dalga boyundan çok daha küçük olan (örneğin 5-200 nm) taneciklerin dağılmasıyla açıklanan optik bir gerçektir. Bu çok küçük tanecikler, üzerlerine gelen renksiz ışık süzmesinin bünyesindeki küçük dalga boylarını büyüklerinden çok daha kolay dağılmaya uğratır. Bu olayın nedeni de mavi ve mor renge karşılık gelen dalga boylarında daha fazla saçılma olacağıdır. Gözlerimiz mor dalga boylarına değil de mavi dalga boylarına daha fazla duyarlı olduğu için yalnızca mavi rengi görürüz. Aerojellerde de atom parçalarından sadece yüz iki yüz kat daha büyük olan hava dolu çok küçük delikler bulunur. Beyaz ışık renginin dağılmasından ve aerojelin mavi gözükmesinden mesul olan bu çok küçük boyuttaki deliklerdir. Bu mavi renginden dolayı ve hafif olması sebebiyle aerojellerin “mavi sis” olarak isimlendirildiği de doğrudur. (BiLiMveTEKNIK, 2008).

Yıllar boyunca, çok sayıda araştırmacı ve şirket, birçok benzersiz katı özelliğe sahip olduğu bilinen yüksek Silika Aerojel potansiyelinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalarla ilgilenmiştir. Tablo 1’de, Silika Aerojellerin özelliklerinden bazıları verilmiştir. (CIZA, 2021).

**Tablo 1.** Silika Aerojellerin Özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
Partikül çapı	nm	2-5
Gözenek çapı	nm	2-100
Ortalama gözenek çapı	nm	20-40
Porozite	%	85-99,9
İç yüzey alanı	m <sup>2</sup>	600-1000
Kütle yoğunluğu	kg/m <sup>3</sup>	3-350
İnşaat amaçlı kütle yoğunluk	kg/m <sup>3</sup>	70-150
Termal iletkenlik	W/mK	0,004
İnşaat amaçlı termal iletkenlik	W/Kg	0,013-0,014
Basınç dayanımı	KPa	300
Çekme dayanımı	KPa	16
Sıcaklık kararlılığı	°C	600 kadar
Yanma	-	Evet
Reaktif	-	Hayır
Yangın sırasında zehirli gazlar salması	-	Hayır

### Aerojelin Kullanım Alanları

Aerojel; termik izolasyon, akustik izolasyon, havacılık ve uzay kullanımları, katalizör ile katalizör dolguları, yakacak gözleri, kimyasal uyarıcılar, ilaç yayma sistemleri, kapı ve pencere uygulamaları gibi pek çok sektörde kullanılmaktadır. Sızıntı temizlemede kimyevi adsorbant, boyalarda izole edici sıkılaştırıcı ve emici olarak kullanım özellikleri bulunmaktadır. Çin ülkesindeki çalışmalar sonucunda ham petrol kaçaqları ile mücadelede çok önemli bir siper görevine sahip olmak gibi çok fazla kullanım alanına sahiptir. Aerojeller izolasyon yeteneği sayesinde gemi kazanlarında minimum izolasyon kalınlığı ve maksimum enerji korunumu sağlamaktadır. Bu maddelerin estetik binalarda kullanımı çok yaygındır. Genelde binaların dış cephelerinde gün ışığını geçiren dolgu maddesi olarak pencere benzeri bina bileşenlerinde, dış cephede giydirmede kullanılan geleneksel yapı materyallerinin yerine lif ilaveli aerojelden yararlanma şeklindedir. Aerojeller, boşluklu izolasyon panellerinin içine konularak da kullanılmaktadır. (Saraç & Toplan, 2016).

### AEROJEL'İN ÇİMENTODA KULLANIMI

Enerjinin hesaplı bir şekilde kullanılması fikri bütün endüstriyel sektörlerde olduğu gibi yapı sektöründe de kullanımı kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir. Yapı sektöründe ilerletilen çalışmalar fazla düzeyde enerji harcanmasını getirmektedir. Çoğalan enerji tüketimi ve dünya çapında ısınma seviyesi de artmaktadır bu durumda gerek ekonomi gerekse ekosistem açısından düzeltilmesi mümkün olmayan sorunlar doğurmaktadır (Karahan, 2017). Çimento gelişiminde 1 kg çimento meydana getirilmesi esnasında yaklaşık olarak 1,0 kg CO<sub>2</sub> salınımı meydana gelmekte ve aynı zamanda da kg başına 1,5 kWh enerji tüketilmektedir. Çimento üretiminin fazla maliyeti ve CO<sub>2</sub> yayılımı göz önüne getirilerek günümüzde çimento hamurları yerine bağlayıcı madde içeriğinde çimento oranının azaltıldığı doğa-dostu harç dizaynları üzerine sürekli deneysel çalışmalar meydana getirilmektedir (Boştancı, 2018).

Malzeme iliminde çimento içerikli malzemelerin işlevsel ve izolasyon performanslarının geliştirilmesi için nano boyuttaki maddelerin çimento içeriğine dâhil edilmesi konusunda da sıkça çalışılmaktadır. Nano maddeler, kalsiyum silikat özelliği içerisinde çoğu zaman boşluk doldurarak mini yapı niteliklerini geliştirmekte ve kökenlerine bağlı olarak hem de hidrolik aktiviteleri yardımıyla da hidrasyon sürekliliğine ciddi seviyede etki edebilmektedir (Morsy, & El-Khodary, 2018). Son zamanlarda mini-maddeler arasında silika aerojelleri temel alan çalışmalar hızla çoğalmaktadır. Silika aerojeller, su gerektiren aktive göstermemekle beraber kendilerine has por yapısı ve yüksek seviyede hava bulundurmasına rağmen katı iskeletlerini değiştirmeyecek biçimde üretilmektedir. Dünya üzerinde bilinen en hafif katı madde olarak kabul edilen silika aerojellerin çimento bulunduran karışımlarda kullanılması çoğu zaman malzemelerin ısı yalıtım veya ses yalıtım performanslarının çoğaltılması üzerine odaklıdır.



Fakat silika aerojeller %99,8 mertebelerine erişebilen por yoğunluğuna rağmen kendi ağırlıklarının 1600 katı seviyelerinde yük taşıyabilmektedirler. Parçacık yoğunluklarının hava parçacıklarına kıyasla 4 -5 kat daha çok olduğu ortadadır. Alkali- aktive edilmiş karışımlarda silika aerojellerin çok düşük katkı oranlarında kullanılmasına yönelik geliştirilen çalışmalar sınırlı seviyededir. Ortaya konan çalışmalar eşit aktivatör karışımı için dozajlarda uygun değerli seviyede artan aerjel katkıları ve kısmi olarak mukavemet artışının saptanabileceğini göstermektedir. (Boştancı, 2020 )

Çimento içerikli maddelerde silika aerojeller çoğu zaman fazla izolasyon hedefleri doğrultusunda toprak ile yer değiştirilerek fazla seviyede kullanılmakta ve mecburen basınç ve eğilme mukavemetlerinde büyük düşüşler gözükmemektedir. Çok fazla dayanımlı hazır beton üretiminde %50 oranlarında kullanılan silika aerjel muhtevası sebebiyle basınç mukavemetleri 20 MPa düzeylerine indirgenmektedir. Ortaya çıkan dayanım düşüşleri esasında silika aerojellerin çimento içeren malzemelerde hafif çakıl olarak işlevsel rol üstlenmesi ile ilgilidir. 28 günlük kaptaki yüksek seviyedeki silika aerjel muhtevası için 1187 kg/m<sup>3</sup> 'lük atom hacim ağırlığına göre basınç mukavemetini 18.63 MPa olarak ortaya koymuşlardır. Aynı kür zamanı sonunda ise burulma dayanımı 3.66 MPa olarak tespit edilmiştir. Liu vd. ye göre hacimce %60 seviyelerinde aerjel içeren örneklerde 2.15 MPa'lık basınç mukavemeti ve 0.45 MPa'lık eğilme mukavemeti ortaya konmuştur. Diğer yandan karışımlarda silika aerjel maddesinin çimento katkı malzemesi olarak kullanımında da silika aerjel karışımının az olması nedeniyle mekanik mukavemetlerde çoğu zaman ciddi seviyede düşüşler gözlenmemektedir. Silika aerjel muhtevasının % 0,1 den % 0,7 seviyelerine doğru olan artışı basınç mukavemetlerinde benzer mukavemet değerlerini görürken %1,0 aerjel katkı oranındaysa kontrol numunesine göre 56,5 MPa' dan 57,0 MPa' seviyelerine kadar kısmi bir artışında gözlenebileceğini ortaya çıkarmıştır. (Boştancı, 2020 ).

Silika aerojellerin gelişimi için yakın zamanda yapılan deneysel çalışmalar, silika aerojellerin fazla gözeneklilik değerlerini düşünerek genellikle örneklerin ses, yangın ve sıcaklık izolasyon performanslarına olan faydaları üzerine çalışılmıştır. Çalışmanın odak merkezi aşağı yukarı 20 MPa basınç mukavemetine sahip karışım örneklerindeki bozulma tutumunun silika aerjel katkıları ile artıp azalmasının araştırılması konusundadır. Silika aerjel katkılarının eşdeğer basınç mukavemetleri altında örneklerin deformasyon olayına olan etki işlevinin anlaşılması önemle bina duvarlarında kullanılacak çimento içerikli ve silika aerjel içerikli blok elemanların önümüzdeki yıllarda dizayn girişimleri için çok önemlidir (Provis, 2014)

## **ÇİMENTO İÇERİĞİNDE AEROJEL KULLANIMININ AVANTAJLARI**

- Hafiflik: Aerjel katkıli çimentolar sayesinde daha hafif beton üretilebildiği için bu da depreme karşı daha dayanıklı yapı oluşmasını sağlıyor.
- Alandan tasarruf: Aerjel katkıli malzemeler sayesinde daha ince izolasyon malzemeleri üretilebildiği için alandan tasarruf sağlanıyor.
- Aerjel katkıli betonlar Karbon salınımını ciddi düzeyde azaltarak doğaya zararı önüyor.
- Konut binalarında kullanımda çok ince seviyelerde ses yalıtımını da sağlaması çok önemlidir.
- Aerjel katkıli malzemeler su yalıtımını da sağlıyor.
- Aerjel katkıli dış cephe kaplama malzemeleri solmaya karşı direnç gösteriyor.

## **SONUÇLAR**

- Aerjeller, çimento içeriğine dâhil edildiklerinde fazla gözenekli yapıları sayesinde çimento içerikli malzemelerin ses ve ısı izolasyon performanslarına katkı sağlayabilirler.
- Düşük ısı iletkenliği sayesinde Aerjel katkıli çimento ve harçlar izolasyon malzemesi olarak kullanılabilir.
- Aerjellerin yangın dirençleri de çok iyi olduğu için bu maddenin henüz bu amaç için kullanılmasa da önümüzdeki yıllarda yapılarda yangın izolasyonunda da kullanılabileceği tartışılmaz.
- Aerjeller sayesinde ortaya çıkan tokluk kazancı, çimento üretiminde aerjel katkısını kullanmak için bir nedendir.
- Kalsiyum – silikat matrisine dâhil olan silika aerjeller, zorluk yaşayan kalsiyum-silikat liflerinin çok daha az zorlanan liflere germe aktarabilme yeteneğini geliştirebilmektedir.
- Çok az aerjel katkı seviyesinde artan aktivatör miktarı işlevsel özelliklerin gelişimine katkı sağlarken çok fazla aerjel katkı miktarında çok az aktivatör miktarı uygun değer işlevsel verim için tercih edilebilir.

## KAYNAKLAR

- 196-1, T. E. (2016). Çimento deney metotları- Bölüm 1:Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Altın, D. D. (Haziran 2014). Sürdürülebilir Yapılarda Aerojel Kullanımı. Yalıtım. BiLiMveTEKniK. (Eylül 2008).
- Boştancı, L. (2018). Mechanical properties and thermal conductivity of aerogel incorporated alkali-activated slag mortars. Adances in Civil Engineering.
- Boştancı, L. (2020 ). Silika Aerojel katkılı Alkali-Aktive Edilmiş Uçucu Kül . BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi , 588.
- CIZA, B. (2021). VOLKANİK TÜF ATIKLARINDAN SİLİKA AEROJEL SENTEZİ VE YÜKSEK TERMAL YALITIM ÖZELLİKLERİ İÇİN ALÇI ESASLI KOMPOZİTLERDE DEĞERLENDİRİLMESİ. Yüksek Lisans Tezi.
- Karahan, O. (2017). Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature. Construction and Building Materials.
- Morsy, M. S., S., H., M. M., & El-Khodary. (2018). An investigation into its effect on compressive strength, pore structure and microstructural . Construction and Building Materials.
- ÖZ, D. C., ÖZ, B., & KAYA, N. (2017). BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi.
- Provis. (2014)). Y.,Nedeljković, M.,Ye, G. Geopolymers and related alkali-activated materials, Annual Review of Materials Research, 44 .
- SARAÇ, N., & TOPLAN, N. (2016). Dünyanın En Hafif Katı Malzemesi: Aerojeller. Metal Dünyası.
- Türk Standartları Enstitüsü, A. (2000). Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini,. TS EN 1015-11.
- ZAIDI, I. K. (Ağustos 2017). NANO SiO<sub>2</sub> - AEROJEL KATKILI SÜPER ISIL YALITIM .



## **Tuğla, Bims ve Gazbetonun Isıl Verimlilik ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması**

### **Comparison of Brick, Pumice and Aerated Concrete in terms of Thermal Efficiency and Cost**

Çağrı AVAN<sup>1</sup>, Hamit YILDIZ<sup>2</sup>, Emrullah AVAN<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kastamonu

<sup>3</sup> Çaldağ Ortaokulu, Eskişehir İl Milli Eğitim Müdürlüğü, Eskişehir

Doi: 10.51764/smutgd.948311

Geliş Tarihi : 01.07.2021

Kabul Tarihi : 25.07.2021

#### **ÖZET**

Enerji tüketimi günümüzün ve geleceğin en önemli konuları arasındadır. Dünya üzerinde artık topraktan çok enerji için savaşlar çıkmaktadır. Bu noktada enerji kayıplarının minimuma indirilmesi gerekliliği açıktır. Uzun ömürlü yapılar şeklinde üretilen binalar enerji verimliliği açısından etkili olmaktadır. Ülkemiz farklı iklim kuşaklarını barındırmakta ve buda yapıların farklı özelliklerde olmasını mecbur kılmaktadır. Özellikle soğuk bölgelerde ısı kayıplarının azaltılması enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir.

İnsanoğlunun yaşamını sürdürebilmesi için enerji verimine ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde artan nüfus ve sanayileşme gibi faktörler enerjiye olan talebi artırmakta, enerjinin daha az kullanılarak aynı faydayı sağlayacağı yeni yöntemler geliştirmeye zorlamaktadır. Enerjinin en çok tüketildiği alanlardan biri de ısıtma-soğutma enerjisi olarak kullanıldığı yaşadığımız binalardır. Binalarda duvar malzemesi olarak tuğla, bims ve gazbeton sıklıkla kullanılan malzemelerdir. Bunlar birbirinden oldukça farklı özelliklere sahiptirler.

Çalışma kapsamında 3 katlı bir konut için ısı kayıplar hesaplanmıştır. Bims, gazbeton ve tuğla için maliyet ve ısı verimlilik hesapları yapılmıştır. Hesaplar sonucunda verimlilik açısından en iyi malzemenin bims olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça ısı verimlilik arttığı, aynı oranda maliyetin de arttığı görülmektedir. Bu noktada gazbetonun maliyet verimlilik oranı en düşüktür.

**Anahtar Kelimeler:** Isı yalıtımı, bims, tuğla, gazbeton, ısı verimlilik.

#### **ABSTRACT**

Energy consumption is among the most important issues of today and the future. In the world, wars are breaking out for energy rather than land. At this point, the necessity of minimizing energy losses is obvious. Buildings produced as long-lasting structures are effective in terms of energy efficiency. Our country has different climatic zones and this obliges the buildings to have different characteristics. Reducing heat losses, especially in cold regions, directly affects energy consumption. Human beings need energy efficiency to survive. Today, factors such as increasing population and industrialization increase the demand for energy and force the development of new methods that will provide the same benefit by using less energy. One of the areas where energy is consumed the most is the buildings we live in, where it is used as heating-cooling energy. Brick, pumice and gas concrete are frequently used materials as wall materials in buildings. They have quite different properties from each other.

Within the scope of the study, thermal losses were calculated for a 3-storey residence. Cost and thermal efficiency calculations were made for pumice, gas concrete and brick. As a result of the calculations, it has been revealed that the best material in terms of efficiency is pumice. In addition, it is seen that as the material thickness increases, the thermal efficiency increases and the cost increases at the same rate. At this point, the cost efficiency ratio of aerated concrete is the lowest.

**Keywords:** Thermal insulation, pumice, brick, gas concrete, thermal efficiency.

Çağrı AVAN, Orcid: 0000-0002-3269-8015, cagriavan@gmail.com

Hamit YILDIZ, Orcid: 0000-0003-3655-0197, yldzz.hamit@gmail.com

Emrullah AVAN, Orcid: 0000-0002-7435-3402, emrullahavan@hotmail.com

## GİRİŞ

İlk insandan günümüze kadar insanlar doğadan faydalanmak ve olumsuz etkilerine karşı korunmanın yollarını aramıştır. Bu amaçla ilk yaptığı kendini dış etkilerden koruyacak yaşam alanları oluşturmaktır. Bu yaşam alanları günümüze kadar büyük bir değişim geçirse de temel de hepsi bu alanın konforunu artırarak doğanın zorlu koşullarından korunmak için yalıtımlı alanlar sağlamaktır (Şen, 2006).

Yalıtım (İzolasyon), kullanılma amacına göre yapıyı dış etkilerden ayırmak anlamına gelmektedir. Yalıtımın temel amacı ise öncelikle kendi bütünsel yapısını korumak ve içerisindeki canlı ile cansız varlıklara konforlu, yaşanabilir bir ortam sağlamak üzere alınan önlemler paketidir (Ülker, 2009). Bina yalıtımı ise 'malzemelerin üretilmesinden uygulanmasına ve sonrasında uzun ömürlü olmasına kadar çok boyutlu bir çalışma gerektirmektedir. Ayrıca birçok bilim dalını da ilgilendirmektedir (Bayer, 2006).

Yalıtım yapının bulunduğu doğa ortamına göre farklı amaçlar için yapılabilmektedir. Ülkemizde ise binalarda yapılan yalıtımın temel hedefi ısınma giderlerini azaltmak ve daha konforlu bir alan oluşturmaktır. Bu noktada birçok amaca hizmet eden malzemeler üretilmektedir (Akıncı, 2006; Karakaya, 2018). Binalarda ise tablo 1 incelendiğinde görüleceği gibi en çok ısı kaybı dış dünya ile teması bulunan yüzeyleri örten duvarlardan kaynaklanmaktadır (Demircan, 2020). Bu durum çok katlı binalarda %40 oranlarında kayıplara neden olmaktadır. Isı kayıpları duvar elemanlarının seçimini önemli kılmaktadır (Aydın, Akgül, Aydın & Vural, 2011).

**Tablo 1.** Yapılarda ısı kayıp oranları (Bayer, 2006)

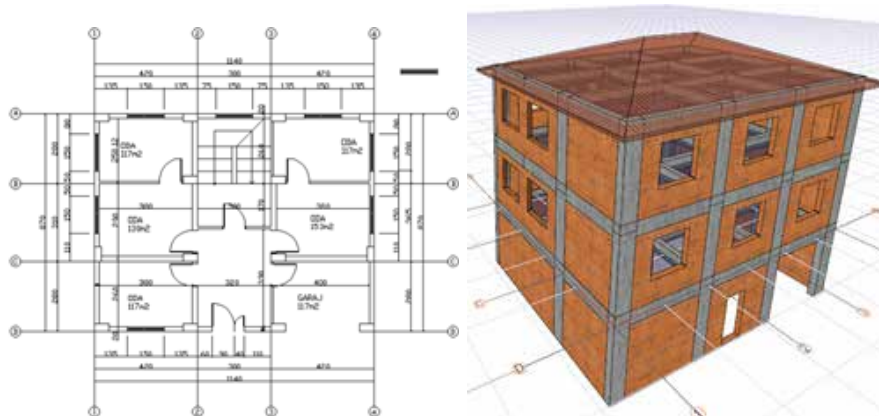
	Duvar	Çatı	Bodrum	Pencere	Hava Kaçağı
Tek katlı yapılar	25	22	20	20	13
Çok katlı yapılar	40	7	6	30	17

Binalarda dış duvar malzemelerinin başında tuğla, bims ve gaz beton gelmektedir. Bu malzemeler farklı yalıtım düzeylerine sahiptir. TS 825'e göre yalıtım özellikleri bakımından aynı kalınlıktaki bu malzemelerden en iyisi gaz beton olarak görülmektedir. Ancak uygulama alanında kullanımı diğerlerine göre daha düşüktür. Tuğla ise kullanımı en yaygın olan malzemedir (Çelik, Yörükoğlu, Sürdem, Türker & Erdoğan, 2019). Bunların yanında bims ise daha az yaygındır. Bimsin diğerlerinden en önemli farkı ise geri dönüştürülebilir bir yapıda olmasıdır (Url-1). Ayrıca bu konudaki çalışmalar yaygınlaşmaya başlamıştır.

Bu çalışma kapsamında binalarda kullanılan duvar yapı elemanlarının ısı değişimleri ele alınarak yıllık enerji kayıpları incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca duvar malzemelerinin cinsine ve kalınlığına göre ısı kayıpları ile maliyetleri arasındaki ilişkiler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

## YÖNTEM

Çalışma kapsamında aşağıda verilen 3 katlı bir konut projesi ele alınmıştır.



**Şekil 1.** Bina kat planı ve 3 boyutlu modellemesi

Isı, su, ses ve yangın yalıtımcıları derneği tarafından TS-825 standartlarına göre geliştirilen İzoder programı ile ısı kayıplar yüzeylere bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama sürecinde yüzeylere bağlı olarak metraj hesapları yapılarak programa girilmiştir. Sonrasında tuğla, gazbeton ve bims için ısı kayıp analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden sonra duvar kalınlığının ısı kayba etkisini ortaya koymak için 13.5 cm, 19 cm ve 25 cm'lik malzemeler için hesaplamalar yapılmıştır. Tüm hesaplamalar karşılıklı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır. Maliyet hesapları için 2020 yılı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı metraj çizelgesi kullanılmıştır.

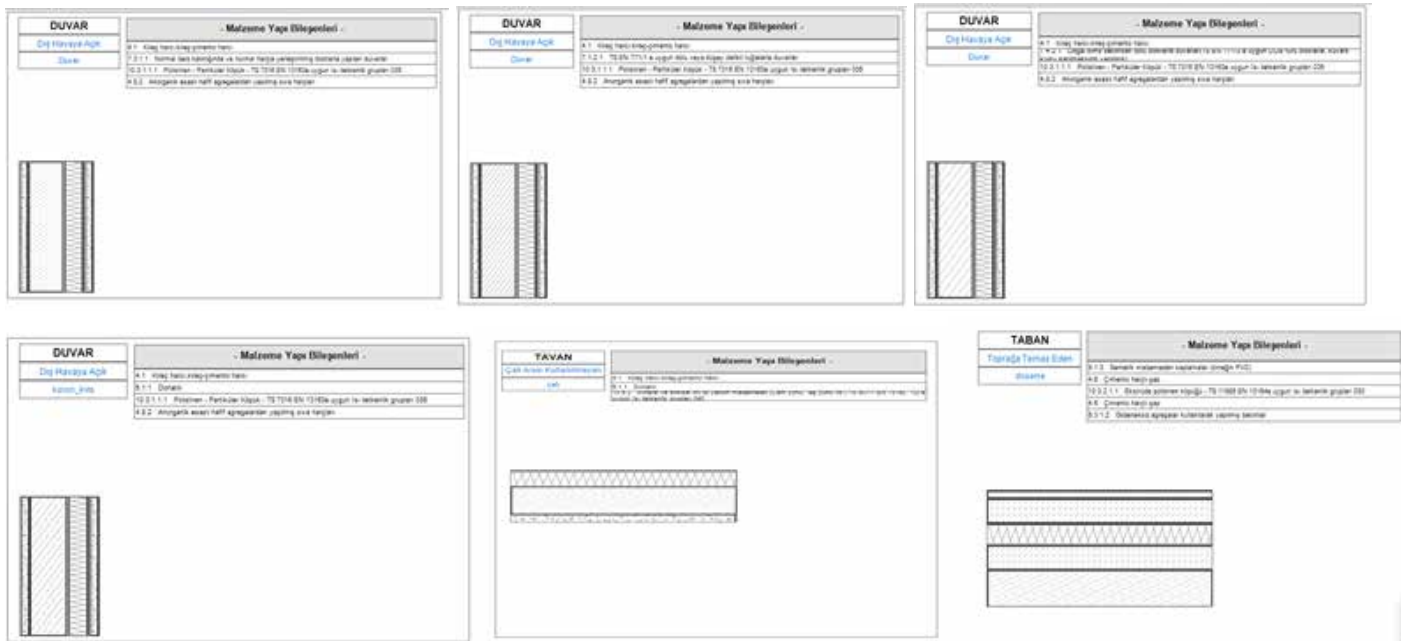
**BULGULAR**

Bina analizlerinde 1. Bölge güney, 2. Bölge doğu, 3. Bölge kuzey ve 4. Bölge batı olarak ele alınmıştır.

**Tablo 2.** Yapının elemanlarına göre metrajlar (m<sup>2</sup>)

	Bölge	Bölge	Bölge	Bölge	Toplam
Duvar alanı	58,14	51,27	54,45	43,36	207,22
Kolon-kiriş	31,86	18,63	27,45	23,04	100,98
Pencere	12,6	8,4	12,6	8,4	42
Kapı	-	-	-	11,6	11,6

Yapının elemanlarına göre metrajları incelendiğinde duvar alanlarının sırasıyla 58.14, 51.27, 54.45 ve 43.36 m<sup>2</sup> olduğu ve toplamda 207.22 m<sup>2</sup> lik bir alanı kapladığı görülmektedir. Ayrıca 100.98 m<sup>2</sup> kolon kiriş alanı bulunmaktayken 42 m<sup>2</sup> lik pencere ve 11,6 m<sup>2</sup> lik kapı alanları hesaplanmıştır. Yapının pencerelerinin simetrik dağıldığı görülmektedir. Hesaplamalar yapılırken aşağıdaki kesitler kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Hesaplamalarda kullanılan malzemelerin kesitleri ve özellikleri

Malzemelere dair kesitler incelendiğinde kolon-kiriş, tavan ve taban kesitleri tüm analizlerde sabit tutulmuştur. Bu kesitlerden kolon-kiriş kesiti, kireç-çimento harcı, donatılı beton, polistiren köpük (TS 7316 EN 13163e uygun) ve anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıvadan oluşmaktadır.

Tavan kesiti ise, kireç-çimento harcı, donatılı döşeme ve mineral ve bitkisel lifli ısı yalıtım malzemesinden (Cam yünü, Taş yünü vb.) oluşturulmuştur.

Taban kesiti, sentetik malzemeden kaplamalar (örneğin PVC), çimento harçlı şap, ekstrüde polistren köpüğü, çimento harçlı şap ve gözeneksiz agregalar kullanılarak yapılmış betondan oluşmuştur. Bu alanlarda mümkün olduğunca ısı kaybını engelleyecek malzemeler kullanılmıştır.

Duvar kesitlerinde ise kireç-çimento harcı, duvar malzemesi, polistiren köpük (TS 7316 EN 13163e uygun) ve anorganik esaslı hafif agregalardan yapılmış sıva kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Malzeme, boyut ve enerji hesapları

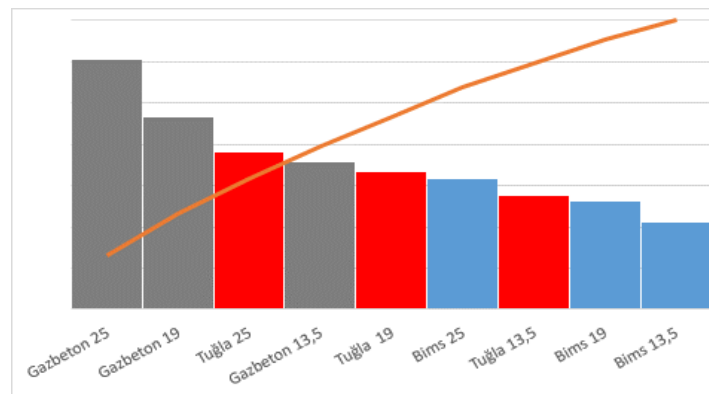
	Boyut	Duvar ısı kaybı	Kolon ısı kaybı	Toplam ısı kaybı	Yıllık kayıp enerji tutarı
Tuğla	13,5	108,41	59,58	167,99	1888,889
	19	102,51	59,58	162,09	1822,549
	25	96,77	59,58	156,35	1758,008
Gazbeton	13,5	89,46	59,58	149,04	1675,814
	19	79,96	59,58	139,54	1568,996
	25	71,67	59,58	131,25	1475,782
Bims	13,5	97,58	59,58	157,16	1767,116
	19	89,32	59,58	148,9	1674,24
	25	81,77	59,58	141,35	1589,347

Tablo 3 incelendiğinde 13,5 cm, 19 cm ve 25 cm'lik 3 farklı tuğla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda tuğla için 13,5 cm de 108,41 kWh/m<sup>3</sup> ısı kaybı 19 cm'de 102,51 kWh/m<sup>3</sup> ve 25 cm'de 96,77 kWh/m<sup>3</sup> enerji kaybı yaşanmaktadır. Bunlar doğalgaz olarak dönüşüm yapıldığında (doğalgaz birim fiyatı 1,956645+kdv) sırasıyla 1888,889 TL, 1822,549 TL ve 1758,008 TL'lik ısı kayıpları oluşmaktadır. Gazbetonlar için ise ısı kayıpları sırasıyla 89,46 kWh/m<sup>3</sup>, 79,96 kWh/m<sup>3</sup> ve 71,67 kWh/m<sup>3</sup> tür. Bunları maliyeti ele alındığında ise sırasıyla 1675,814 TL, 1568,996 TL ve 1475,782 TL'lik ısı kayıpları oluşmaktadır. Bims için ise durum incelendiğinde ise 97,58 kWh/m<sup>3</sup>, 89,32 kWh/m<sup>3</sup> ve 81,77 kWh/m<sup>3</sup> ısı kayıpları oluşmaktadır. Bu ısı kayıplarının tutarları ise sırasıyla 1767,116 TL, 1674,24 TL ve 1589,347 TL'dir.

**Tablo 4.** Malzeme, boyut ve maliyet hesapları

	Boyut	Malzeme maliyeti	İşçilik	Toplam maliyet	% Verim
Tuğla	13,5	2640,86	11196,1	13836,96	13,65
	19	3716,34	12959,54	16675,88	10,93
	25	3491,04	15582,94	19073,98	9,22
Gazbeton	13,5	5234,325	12661,14	17895,47	9,36
	19	7365,369	16007,75	23373,11	6,71
	25	10661,44	19702,48	30363,92	4,86
Bims	13,5	2072,2	8454,576	10526,78	16,79
	19	3004,69	10203,51	13208,2	12,68
	25	3895,736	11987,68	15883,41	10,01

Malzeme maliyet tablosu incelendiğinde ise 13 cm'lik tuğlanın toplam maliyeti 13836,96 TL, 19 cm'lik tuğlanın maliyeti 16675,88 TL ve 25 cm'lik tuğlanın maliyeti 19073,98 TL'dir. Gazbeton için ise sırasıyla 17895,47 TL, 23373,11 TL ve 30363,92 TL'dir. Bims için sırasıyla 10526,78 TL, 13208,2 TL ve 15883,41 TL'dir.



**Şekil 3.** Malzeme-maliyet ve verim grafiği

Grafik incelendiğinde maliyet ve ısı kayıp tutarı oranında en iyi performansın bimsfe olduğu görülmektedir. Isıl kayıp miktarı azken maliyet de düşüktür. Bu sıralamada gaz beton ise maliyet olarak yüksek olduğu için verimsiz olarak görülmüştür. Gazbeton'da ayrıca boyut büyüdükçe işçilik maliyetinin artması da önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bimsin işçilik miktarları birbirine yakın olduğu için verimi de yüksek çıkmaktadır.

## **TARTIŞMA VE SONUÇ**

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular incelendiğinde farklı duvar malzemeleri için çeşitli sonuçlar ortaya koymaktadır. Malzemeler karşılaştırmalı bir şekilde ele alındığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

3 farklı malzeme ve bunların 3 farklı boyutları ısı kayıp hesapları açısından ele alınmıştır. Isıl kayıpların en aza indirgenmesinde malzemenin boyutu önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzeme boyutu arttıkça ısı kayıp azalmaktadır. Fakat malzemenin büyümesi maliyeti etkilemektedir. Maliyetler ile ısı kayıplar karşılaştırıldığında farkın büyük olduğu ortaya çıkmaktadır. Ekonomiklik açısından zayıf bir durum oluşturmaktadır.

19 cm kalınlığında Bims kullanımı ile 13,5 cm gazbetonun ısı kayıpları benzerdir. Aynı şekilde tuğla için durum düşünüldüğünde 25 cm'lik bir kalınlık gerekmektedir. Bims için maliyet 13208,2 TL, Tuğla için 19073,98 TL ve Gazbeton için 17895,47 TL'dir. Isıl kayıplar açısından tuğla en az verimli olanıdır. Gazbetonun ısı kayıpları düşük olsa da maliyetinin yüksek olması önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu noktada bims ısı kayıplar, maliyet ve duvar yükleri açısından avantajlı olmaktadır.

Verim açısından durum incelendiğinde ise küçük boyutlu malzemeler daha uygun fiyatlara temin edilebildiği ve işçiliği daha düşük olduğu için daha verimli olarak karşımıza çıkmaktadır. Gazbeton bu noktada verimsiz bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Tuğla ise bims göre daha verimsizdir.

Sonuç olarak gazbeton fiyatlarının ve işçiliğinin azalması durumunda etkili bir malzeme olarak kullanılabilir. Tuğla ise ısı kayıplar açısından zayıf olmasının yanında ulaşımının kolaylığı sayesinde tercih sebebidir. Bims ise gerek işçilik maliyetinin düşük olması gerekse malzeme fiyatlarının diğerlerine göre düşük olması birçok yapıda kullanılabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

## **KAYNAKLAR**

- Akıncı, H. (2006). Isı Yalıtım Malzemeleri ve Yapılarda Isı Yalıtımı Uygulamaları, SAÜ Yüksek Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Aydın, F., Akgül, T., Aydın, E. & Vural, İ.(2011).Konutlarda Kullanılan Farklı Duvar Çeşitlerinin Isı Yalıtım Performanslarının İncelenmesi. e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences, 6(4), 1250-1258.
- Bayer, G., (2006). Binalarda Uygulanan Isı Yalıtım Sistemleri ve Örnek Bir Projede Isı Yalıtım Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, A. G., Yörükoğlu, A., Sürdem, S., Türker, A., & Erdoğan, Y. (2019). Bor katkılı pomza tuğla üretimi, fizikomekanik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi. Bor Dergisi, 4(2), 107-118.
- Çiçek, Y. E. (2002). Pişmiş toprak tuğla, bimsbeton, gazbeton ve perlitli yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Demircan, H. (2020). BİNALARDA MEYDANA GELEN ISI KAYIPLARININ TERMAL KAMERA YÖNTEMİYLE TESPİT EDİLMESİ (ADAPAZARI ÖRNEĞİ) . Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi , 3 (1) , 26-31 .
- Karakaya, H. (2018). Farklı Duvar Ve Yakıt Tiplerinde Optimum Yalıtım Kalınlığının Isıtma Ve Soğutmada Tespiti Ve Çevresel Etkileri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32(2).
- Şen, A. O. (2006) Yüksek Lisans Tezi "Binalarda Uygulanan Yalıtım Sistemleri Dünya'da ve Türkiye'de Yalıtım. SAÜ Yüksek Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- URL-1 Blok Bims'in Teknik Özellikleri. Erişim: 24.05.2020 tarihinde <https://www.blokbims.com.tr/blog-bims-tekNIK-ozellikleri.html> adresinden alınmıştır.
- Ülker, S. (2009) "Isı Yalıtım Malzemelerinin Özelliklerinin Uygulamaya Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



## Heterojen Rüzgâr Çiftliği Saha Seçimi

### Heterogeneous Wind Farm Site Selection

Pınar BAYRAM <sup>1</sup>, Ezgi Esi CELEP <sup>2</sup>, Sultan KOSTAK <sup>3</sup>, Zehra KAMIŞLI ÖZTÜRK <sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Doi: 10.51764/smutgd.962923

Geliş Tarihi : 05.07.2021

Kabul Tarihi : 24.08.2021

#### ÖZET

Dünyada gerçekleşen bütün üretim ve tüketim faaliyetleri elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. Nüfus artışı ve teknolojinin gelişimi, bu ihtiyacı daha da arttırarak doğal kaynakların hızlı bir şekilde tüketilmesine neden olur. Günümüzde her alanda enerji kullanımı zorunlu olduğundan, yenilenebilir enerjiye olan ihtiyaç da bu zorunluluğa paralel olarak artar. Yenilenebilir enerji kaynakları doğal ve sınırsız olarak bulunsa da kullanım potansiyeli bölgelere göre değişiklik gösterir. Türkiye’de rüzgâr potansiyeli, rüzgâr enerjisi eldesine elverişli olmasına rağmen üretim oranı dış ülkelere göre daha azdır. Bu nedenle, verimli bir rüzgâr çiftliğinin kurulması için en uygun bölgenin seçilmesi önemli bir karar problemidir. Bu çalışmada, Türkiye’de rüzgâr enerjisinden en fazla oranda yararlanabilmek için, kurulacak yeni bir rüzgâr çiftliğinin hem karada hem de denizde rüzgâr türbinlerinin olmasına karar verilmiştir. Öncelikle, Türkiye rüzgâr haritası ve iller temelinde elektrik tüketim verilerinden yararlanılarak bir ön eleme yapılmıştır. Seçim problemleri gerçek hayatta birden fazla ölçüte bağlı olduğundan, bu çalışmada çözüm yaklaşımı olarak bir Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) tekniği olan Analitik Ağ Süreci (ANP) kullanılmıştır. Belirlenen ölçütler temelinde, enerji sektöründeki uzmanlardan oluşan bir karar verici grubunun ikili karşılaştırmaları sonucunda, kurulacak bir rüzgâr türbini çiftliği için en uygun ilin İzmir olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma ile aynı anda hem kara hem denizde kurulacak bir rüzgâr çiftliği için en uygun yer seçimi sistematik bir yaklaşım ile belirlenmiş, literatüre de bu açıdan bir katkı sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir Enerji, Rüzgâr Enerjisi, Çok Ölçütlü Karar Verme, ANP

#### ABSTRACT

All production and consumption activities in the world require electrical energy. Population growth and the development of technology further increase this need, resulting in rapid consumption of natural resources. Since energy use is mandatory in all areas today, the need for renewable energy also increases in parallel with this requirement. Although renewable energy sources are natural and unlimited, their potential for use varies by region. Although Turkey’s wind potential is favorable for obtaining wind energy, the production rate is less than in foreign countries. Therefore, choosing the most suitable region to establish an efficient wind farm is an important decision problem. In this study, it has been decided that a new wind farm to be established will have wind turbines both on land and at sea in order to benefit from wind energy at the highest rate in Turkey. First of all, a preliminary elimination was made using the Turkish wind map and electricity consumption data on the basis of provinces. Since selection problems depend on more than one measure in real life, the Analytical Network Process (ANP), a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) technique, was used as a solution approach in this study. Based on the criteria determined, as a result of the bilateral comparisons of a decision-making group consisting of experts in the energy sector, it was determined that the most suitable province for a wind turbine farm to be established was İzmir. With this study, the most suitable location for a wind farm to be established both on land and at sea was determined with a systematic approach, and a contribution was made to the literature in this respect.

**Keywords:** Renewable Energy, Wind Energy, Multi-Criteria Decision Making, ANP

Pınar BAYRAM, Orcid: 0000-0002-1281-0778, pinarbayram10@hotmail.com

Ezgi Esi CELEP, Orcid: 0000-0001-5042-6817, ezgiesicelep@gmail.com

Sultan KOSTAK, Orcid: 0000-0002-1647-0248, kostaksu435@gmail.com

Zehra KAMIŞLI ÖZTÜRK, Orcid: : 0000-0003-3156-6464, zkamisli@eskisehir.edu.tr

## GİRİŞ

Enerji, dünyada gerçekleşen tüm fiziksel ve kimyasal olaylarla iç içedir. Aynı zamanda günlük yaşamımızın devamı için önemli bir kavramdır. Toplumların gelişmesi ve değişmesi enerjinin de zamanla gelişmesine ve çeşitli türlere bölünmesine sebep olmuştur. Bu gelişim ile enerjinin her alanda kullanılması zorunlu hale gelmiş, ancak diğer yandan da enerji kaynaklarının hızla tükenmeye başlamasına ve enerji potansiyelindeki azalışa sebep olmuştur. Enerji potansiyelindeki azalmanın toplumun geleceği için kaygılanmaya sebep olması bu sektörde yapılan çalışmaları hızlandırmaktadır.

Yirminci yüzyılda petrol sorunu yaşanmasıyla birlikte yenilenebilir enerjiye olan ihtiyaç da artmaktadır. Yenilenebilir enerji, fosil kaynaklardan olmayan ve sürekli devam eden doğal kaynakların sahip olduğu enerji akışından elde edilen enerjidir. Elektrik üretirken en az seviyede CO2 emisyonu gerçekleştirildiğinden yenilenebilen enerji kaynaklarına göre çevreye olumsuz etkisi de daha azdır. Hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, dalga, gel-git ve akıntı enerjisi gibi enerji kaynakları sürekli yenilenen ve kullanılmaya hazır halde bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (Yıldız, 2019). Bu kaynaklardan rüzgâr enerjisinin çok yaygın kullanılmasının en önemli sebepleri CO2 emisyonunun çok düşük olması, diğer enerji kaynaklarına göre düşük maliyetli olması, rüzgâr türbinlerinin kolay kurulabilmesi ile bu türbinlerin arazide az yer işgal etmesidir. Aynı zamanda enerjinin üretilmesini sağlayan rüzgâr türbinlerinin çeşitliliğinin fazla olması farklı tedarikçi firmalar ile çalışabilme imkanını sağladığından, rüzgâr enerjisinin kullanımı tercih edilmektedir.

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) 2019 yılı Türkiye verilerine göre, enerji kaynaklarımızın %82'sini fosil yakıtlar ve %16'sını da yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır. Elektrik üretiminde ise, üretimin %44,3'ü yenilenebilir enerji kaynakları, %37,3'ü kömür ve linyit, %0,2'si petrol ve %18,1'i doğalgaz olmuştur (TEİAŞ 2019). Ülkemizde rüzgâr potansiyelinin çokluğu da dikkate alınırsa, rüzgâr enerjisinin avantajlarından yeterince faydalanılmadığı söylenebilir. Sanayi ve nüfusla bağlantılı olarak elektrik ihtiyacının günden güne arttığı ülkemizde, rüzgâr enerjisine gerek devlet gerek özel sektör tarafından daha çok yatırım yapılmalıdır. Yatırımın hangi lokasyona yapılması gerektiği ise bir seçim problemidir. Bu seçimi etkileyen karar vermede en iyi sonucu elde etmeyi sağlayan ölçütler ve ölçütler arası ilişkiler incelenerek problem çözümlerine gidilmelidir.

Gerçek hayatta karşılaşılan karar problemleri birbiri ile etkileşim halinde olan birçok ölçütten etkilenmektedir. Rüzgâr türbini çiftliğinin kurulması için de seçenek olarak belirlenen sahaların yıllık veya 5 yıllık ortalama rüzgâr hızı verileri, kullanılacak rüzgâr türbinlerinin fiziki yapısı, pürüzlülük oranı, hava yoğunluğu, rakım ve eğim gibi ölçütler göz önünde bulundurulmaktadır. Dolayısıyla, rüzgâr türbini çiftliği saha seçimi de birçok ölçütlü karar verme problemidir.

Literatürde çeşitli saha/konum seçimi problemlerinin çözümünde AHP (Şimşek, 2014; Solangi, 2018; Talinli, 2011; Al-Shabeb, 2016; Wang, 2018; Sanchez, 2014), ANP (Yeh, 2014;), ELECTRE (Şimşek, 2014; Sanchez-Lozano, 2014; Talinli, 2011; Al-Shabeb, 2016; Wang, 2018), TOPSIS (Solangi, 2018) ve DEMATEL (Yeh, 2014), PROMETHEE (Sennaroglu, 2018; Athawale, 2012; Wiguna, 2016), VIKOR (Sennaroglu, 2018; Villacreses, 2017; Lee, 2014), gibi ÇÖKV yöntemleri kullanılmıştır. Uygun saha seçimi problemlerinden biri olan rüzgâr türbini saha seçimi problemi için yapılan ÇÖKV çalışmaları incelendiğinde ise diğer saha seçimi çalışmalarından görece daha az çalışma olduğu görülmüştür.

Tortumluoğlu (2021) yaptıkları çalışmada, açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarım sürecinin en önemli basamağının yer seçim kriterleri olduğundan bahsetmiş ve WASP paket programı kullanarak analiz etmiştir. Türbin yerleşimi için rüzgâr hızı ve potansiyeli, derinlik koşulları, yasak sahalar ve deniz ulaşımını önemli ölçütler olarak kabul etmiştir.

Can ve Yücel'e (2019) göre Türkiye'nin en fazla rüzgâr alan illerinden biri Çanakkale'dir. Bu durum göz önüne alındığında rüzgâr türbinleri ile elektrik enerjisi üretiminde ülkemizin en önemli mekanlarına sahip olduğu düşünülmüştür. Türbin konumlandırılması enerji üretimini önemli ölçüde etkilediğinden uygun konumlandırma için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve AHP kullanılarak Çanakkale İl sınırları içinde uygun alanların belirlenmesi amaçlanmıştır.

Ecer'e (2021) göre rüzgâr çiftliği sahasının tercih edilmesi büyük oranda rüzgâr potansiyeline ve yerleşim yerlerine olan uzaklığına bağlıdır.



Uygun yer seçiminde kullanılan ölçütleri FUCOM (Full Consistency Method-Tam Tutarlılık Yöntemi) yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Çalışmanın sonuçlarını rüzgâr enerjisine yönelik politika belirlemede kullanılabileceğini belirtmiştir.

Şimşek (2014) çalışmasında, rüzgâr türbininin karada kurulabileceği uygun alanları belirlemek için türbin yer seçiminde etkili olan ölçütler önermiştir. Electre TRI ve Electre III yöntemlerini kullanarak, uygun yer seçimini yapmıştır. Yeh (2014) ise, çalışmasında belirlediği ölçütler temelinde ilgili karada rüzgâr çiftliği yeri seçimini DEMATEL ve ANP yöntemleri ile yapmıştır.

Açık denizlerde oluşan şiddetli rüzgarlar ile günümüzde kullanılan deniz kıyısı (off-shore) rüzgâr santrallerinde üretilen elektriğin %20-30 daha fazlasını üretmek mümkündür. Açık denizlerde bulunan rüzgâr santrallerinin karada bulunanların aksine sürtünme kuvvetleri oldukça düşüktür ve rüzgârı engelleyebilecek herhangi bir yüzey şekli bulunmamaktadır. Bu nedenle, açık denizlerde kurulacak olan rüzgâr santrallerinin verimi oldukça yüksektir. Ghosh (2016), optimal dalga enerjisi miktarının üretilebileceği uygun yerleri belirlemek için yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, dalga enerjisi üretimi için konumların uygunluğunu temsil eden bir indeksi tahmin etmek için yapay sinir ağları ve ÇÖKV yöntemleri melez bir şekilde kullanılmıştır.

Sanchez (2014) yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi kurulumu için kriterlerin ağırlıklandırılmasında bulanık AHP yöntemi kullanılmıştır. Wang (2018) ve Al-Shabeb (2016) tarafından yapılan çalışmalarda ise rüzgâr türbinleri kurulumu için gerekli olan saha seçiminde AHP ve ELECTRE yöntemleri ele alınmıştır. Solangi (2018) de AHP ile TOPSIS yöntemini melezleyerek bir seçim yapmıştır.

Bu çalışmada ele alınan rüzgâr türbini çiftliği kurulumu problemi hem nitel hem nicel ölçütleri olan bir gerçek hayat problemi ve ölçütleri arasında ilişkiler olduğundan, ölçütler arası bağımlılığı dikkate alan ANP yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, yine literatürde yer alan çalışmalardan da görüleceği üzere rüzgar çiftliklerinin kurulumunda ya kara ya da deniz bölgeler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ise, rüzgar enerjisinden en fazla oranda yararlanabilmek için, kurulum için seçilecek yerin hem karada hem de denizde olmasına karar verilmiş, literatüre de bu yönde bir katkı sunulması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde Türkiye’de hem deniz hem de karada kurulacak rüzgâr türbini çiftliği için en uygun yerin belirlenebilmesi için öncelikle temel istatistiksel analizler ile yapılan filtreleme işlemi ile ANP yöntemi verilmiştir. Üçüncü bölümde aday iller arasından en uygun ili belirleyecek bir ANP modeli önerilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise sektör uzmanlarının değerlendirmesi sonucu elde edilen çıktılar değerlendirilmiştir.

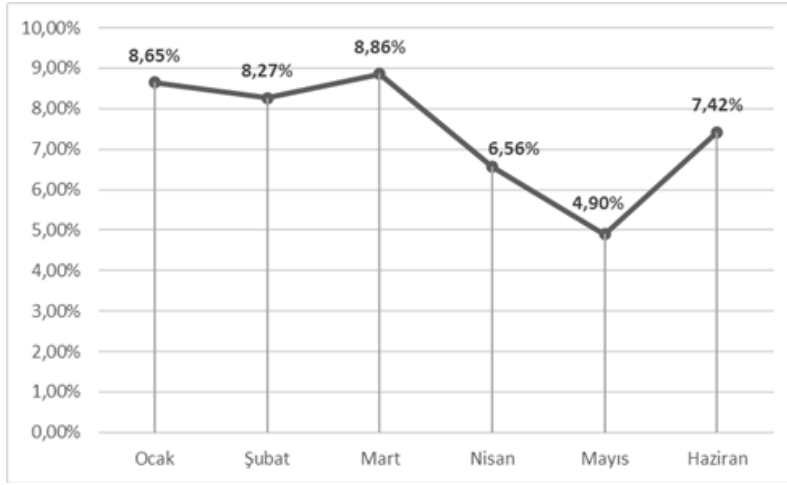
## **MATERYAL VE METOT**

Çok ölçütlü karar verme problemlerinde temel fikir, en uygun seçim için birden fazla ölçüt belirleyerek sistematik bir şekilde karar almak üzere bir karar modeli oluşturmaktır. Gerçek hayat problemlerinin çoğunda belirlenen ölçütler arasında etkileşim olması sebebiyle Analitik Serim Süreci (ANP) bu çalışmada tercih edilen ÇÖKV yöntemi olmuştur. Ancak, ANP yönteminin sınırlılıklarından biri olan seçenek sayısının en fazla yedi olması, çalışmada önce aday illerin belirlenmesi için bir filtreleme işlemi gerekli kılmıştır.

### **Filtreleme**

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB)’in 2019 yılında yayınladığı verilere göre ülkemizde 30 ilde işletilen 183 Rüzgâr Enerji Santrali (RES) 7.615,40 MW kurulu güce sahiptir ve rüzgâr enerji santrallerinde üretilen elektrik ile toplam elektrik ihtiyacımızın %7,40’ı karşılanmaktadır (TÜREB 2019). Yine aynı rapordan alınan bazı istatistikler Şekil 1’de verilmiştir.

Şekil 1’de verilen 183 RES’in bölge bazlı dağılımına bakıldığında, Ege bölgesinin 2.868,05 MW, Marmara bölgesinin 2.603,50 MW, Akdeniz bölgesinin 996,10 MW, İç Anadolu bölgesinin 763,30 MW, Karadeniz bölgesinin 279,70 MW, Güneydoğu bölgesinin 93,05 MW ve Doğu Anadolu bölgesinin 11,70 MW’lık RES kurulu gücüne sahip olduğu görülmektedir. Şehirler için bir istatistik belirtmek gerekirse RES kurulumunun en yüksek olduğu ilk beş şehir: 1.462,20 MW ile İzmir, 1.135 MW ile Balıkesir, 669,95 MW ile Manisa, 505,60 MW ile Çanakkale ve 364,50 MW ile Hatay’ dır.



**Şekil 1.** Türkiye’de RES’lerinin Elektrik Üretimindeki Payı

Bu çalışmada, rüzgâr çiftliğinin deniz ve karaya kurulması hedeflendiği için ilk olarak Türkiye’de denize kıyısı olmayan şehirler elenmiştir. Ardından, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü’nün yayınlamış olduğu Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası temel alınarak şehirlerin rüzgâr hızı sınıflandırılması yapılmış ve Tablo 1’de belirtilmiştir. Bu sınıflandırma sonucunda da hızı düşük olan iller elenmiş ve en yüksek rüzgâr hızına sahip üç il (Çanakkale, Balıkesir, Bartın) seçilmiştir.

**Tablo 1.** Rüzgâr hızı 5,1 m/s’den büyük olan araziler (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2007)

Şehirler	Kapalı Arazi	Açık Arazi	Kıyıları	Açık Deniz	Tepe ve Bayırlar
Edirne		X	X	X	X
Kırklareli		X	X	X	X
Tekirdağ		X	X	X	X
Çanakkale	X	X	X	X	X
Balıkesir	X	X	X	X	X
İzmir		X	X	X	X
Aydın		X	X	X	X
Muğla		X	X	X	X
Antalya		X	X	X	X
Mersin		X	X	X	X
Adana		X	X	X	X
Hatay		X	X	X	X
Artvin				X	X
Rize				X	X
Trabzon				X	X
Giresun				X	X
Ordu				X	X
Samsun		X	X	X	X
Sinop		X	X	X	X
Kaştamonu		X	X	X	X
Bartın	X	X	X	X	X
Zonguldak		X	X	X	X
Düzce		X	X	X	X
Sakarya		X	X	X	X
İzmit		X	X	X	X
İstanbul		X	X	X	X
Yalova		X	X	X	X
Bursa		X	X	X	X

Bir sonraki adımda ise Tablo 2 ve 3' teki veriler göz önünde bulundurularak, denize kıyısı olan iller içerisinde en yüksek verim alınabilecek beş il daha (Kırklareli, Tekirdağ, İzmir, Muğla, Sakarya) seçilmiştir. Böylece elimizde gelecek beş yıl için enerji tüketimi tahminlemesi yapılacak sekiz il kalmıştır.

**Tablo 2.** 2018-2019 yılı enerji kullanımları ve nüfusları (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. 2018-2019, Türkiye Nüfusu. 2018-2019)

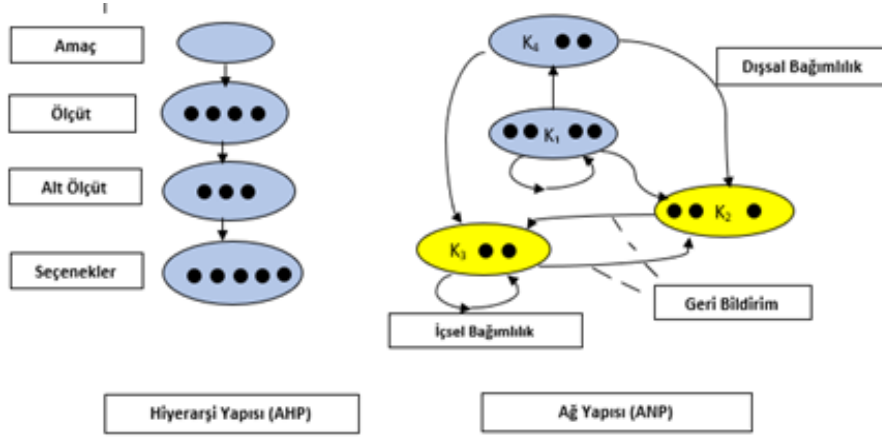
Şehirler	İlin 2018 yılı enerji kullanımı	İlin 2018 yılı nüfus	Bireysel enerji kullanım oranı (2018)	İlin 2019 yılı enerji kullanımı	İlin 2019 yılı nüfus	Bireysel enerji kullanım oranı (2019)
Edirne	91.901,96	406.855	0,2259	88.702,25	411.528	0,2155
Kırklareli	176.065,38	356.050	0,4945	173.537,29	360.860	0,4809
Tekirdağ	563.680,99	1.005.000	0,5609	577.332,38	204.001	0,5605
Çanakkale	253.246,79	530.417	0,4774	204.539,66	540.662	0,3783
Balıkesir	309.553,09	1.205.000	0,2569	298.913,25	1.228.620	0,2433
İzmir	1.362.494,80	4.320.519	0,3154	1.274.024,79	4.367.000	0,2917
Aydın	219.833,34	1.081.000	0,2034	232.543,77	1.098.000	0,2118
Muğla	280.419,50	967.487	0,2898	302.626,39	967.487	0,3128
Antalya	603.384,51	2364000	0,2552	646.505,69	2.511.700	0,2574
Mersin	401.288,59	1.794.000	0,2237	404.863,71	1.840.425	0,2200
Adana	591.000,63	2.216.000	0,2667	589.635,21	1.769.000	0,3333
Hatay	400.522,23	1.575.000	0,2543	346.487,97	1.610.000	0,2152
Artvin	28.431,03	166.143	0,1711	35.615,65	174.010	0,2047
Rize	53.883,71	331.041	0,1628	50.753,90	348.608	0,1456
Trabzon	126.194,68	786.326	0,1605	131.605,81	808.974	0,1627
Giresun	56.895,87	437.393	0,1301	57.469,05	453.912	0,1266
Ordu	95.534,38	771.932	0,1238	103.040,19	771.932	0,1335
Samsun	221.071,04	1.313.000	0,1684	221.146,31	1.348.542	0,1640
Sinop	22.513,37	219.733	0,1025	32.014,18	219.733	0,1457
Kastamonu	71.250,28	372.373	0,1913	74.442,40	383.373	0,1942
Bartın	41.317,70	198.999	0,2076	35.944,71	198.999	0,1806
Zonguldak	109.043,07	596.892	0,1827	100.186,80	599.698	0,1671
Düzce	85.709,50	377.610	0,2270	80.717,58	387.844	0,2081
Sakarya	321.099,99	271.515	1,1826	279.475,39	276.385	1,0112
İzmit	827.029,89	1.883.000	0,4392	830.713,73	1.906.000	0,4358
İstanbul	3.747.476,51	15.067.724	0,2487	3.627.327,60	15.520.00	0,2337
Yalova	53.354,07	251.203	0,2124	65.258,25	262.234	0,2489
Bursa	1.019.962,31	2.937.000	0,3473	1.029.565,99	3.056.120	0,3369

**Tablo 3.** Son 5 yılın enerji kullanımları ve OSB sayıları (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. 2016-2017-2018-2019-2020, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. 2018)

Şehirler	İlin 2016 yılı enerji kullanımı	İlin 2017 yılı enerji kullanımı	İlin 2018 yılı enerji kullanımı	İlin 2019 yılı enerji kullanımı	İlin 2020 yılı enerji kullanımı	OSB sayıları
Kırklareli	171.415,79	133.740,95	176.065,38	173.537,29	170.919,20	4
Tekirdağ	518.174,33	491.888,68	563.680,99	577.332,38	621.162,28	13
Çanakkale	331.652,88	313.312,78	253.246,79	204.539,66	211.545,53	3
Balıkesir	324.409,62	281.737,92	309.553,09	298.913,25	303.948,91	8
İzmir	1.287.212,72	1.468.637,68	1.362.494,80	1.274.024,79	1.355.834,21	13
Muğla	253.533,88	268.477,99	280.419,50	302.626,39	254.666,24	1
Bartın	34.379,90	38.719,75	41.317,70	35.944,71	38.564,65	1
Sakarya	285.226,91	325.536,94	321.099,99	279.475,39	333.618,20	7

## Analitik Serim Süreci (ANP)

Saaty tarafından geliştirilen ANP yöntemi, sonlu sayıda seçeneğe sahip olan karar problemlerini, kararı etkileyen ölçütleri ve seçenekleri hiyerarşik bir düzende ele alarak modelleyen Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yönteminin genelleştirilmiş halidir (Saaty, 2001). Ölçüt ve seçeneklerin birbirleriyle etkileşim halinde olması durumunda ise (Şekil 2) tüm ölçüt ve seçeneklerin ağırlıklarını bulabilmek için oluşturulan karar modeli bir ağ yapısına sahip olmaktadır. ANP yönteminde olduğu gibi ANP yönteminde de hem nitel hem de nicel ölçütler aynı anda karar modelinde yer alabilmektedir.



Şekil 2. Hiyerarşi ve ağ yapısı (Yıldız, 2014)

Şekil 2’de görülen serim yapısı ile ANP’de, ölçütlerin önemi, bir hiyerarşide olduğu gibi, seçeneklerin önemini belirlemekle kalmaz, aynı zamanda seçeneklerin kendileri de ölçütlerin önemini belirlemek için kullanılır.

Bir hiyerarşide bağlantılar yalnızca alt düzeylerdeki öğelere yöneliktir. Bir ağda ise bir kümedeki öğeler başka bir kümedeki öğelere (dışsal bağımlılık) veya aynı kümedeki (içsel bağımlılık) bağlanan öğe kümelerine sahiptir. Unutulmamalıdır ki hiyerarşi, bağlantıların yalnızca tek yönde gittiği özel bir ağ durumudur.

İçsel ve dışsal bağlantıları daha detaylı açıklayacak olursak, ilkinde bir gruptaki öğelerin birbirleri üzerindeki etkisini karşılaştırır. Dışsal bağlantılar ile de bir kümedeki öğelerin başka bir kümedeki öğeler üzerindeki etkisi bir kontrol kriterine göre karşılaştırılır. İçsel bağımlılığı Sagir ve Kamisli Ozturk (2010) tarafından verilen enerji sektöründen bir örnek ile açıklayalım. Elektrik endüstrisinin elektrik üretmek için türbin yapmak için çeliğe ve ayrıca yakıta ihtiyacı vardır. Bu durumda dikkate almamız gereken üç sektör vardır elektrik endüstrisi, çelik endüstrisi ve yakıt endüstrisi. “Elektrik endüstrisi elektriği yapmak için daha çok neye bağlıdır, kendisi mi yoksa çelik endüstrisi mi?” Cevap, çeliğin daha önemli olmasıdır. Kendisine mi yoksa akaryakıt endüstrisine mi daha çok bağlı olduğu sorulduğunda cevap, akaryakıt endüstrisinin çok daha önemli olduğudur. Çeliğe mi yoksa akaryakıt endüstrisine mi bağlı olduğu sorulduğunda yakıt daha önemlidir. Elektrik endüstrisinin elektrik üretmek için kendi elektriğine ihtiyacı yoktur, yakıta ihtiyacı vardır.

ANP yönteminin uygulama aşamaları şu şekilde sıralanmaktadır:

1. Adım: Problemin Tanımlanması ve Modelin Kurulması: Bu aşamada karar probleminin amaçları, ölçütleri, alt ölçütleri ve ölçütler arası ilişkiler net olarak tanımlanmaktadır. Problem tanımlandıktan sonra problemin ortaya çıkmasındaki etkenler detaylı bir şekilde ifade edilmektedir.

2. Adım: Etkileşimlerin Belirlenmesi ve İkili Karşılaştırma Matrislerinin Elde Edilmesi: Tanımlanan problemde kararı etkileyen ölçütler ve alt ölçütler ile kümeler arası ve küme içi etkileşimleri belirlenmektedir. İkili etkileşimler arasındaki önem derecelerine göre ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmaktadır.

Önem değerleri 1’den 9’a kadar ölçekle belirlenir. Örneğin 1, iki seçenek arasında eşit önem olduğunu belirtirken; 9, bir seçeneğin karşılaştırıldığı diğer seçenektan çok daha önemli olduğunu belirtmektedir (Öztürk, 2014). İkili karşılaştırmalarda kullanılan bu “Önem Dereceleri” tablosu Tablo 4’te ayrıntılı gösterilmektedir.

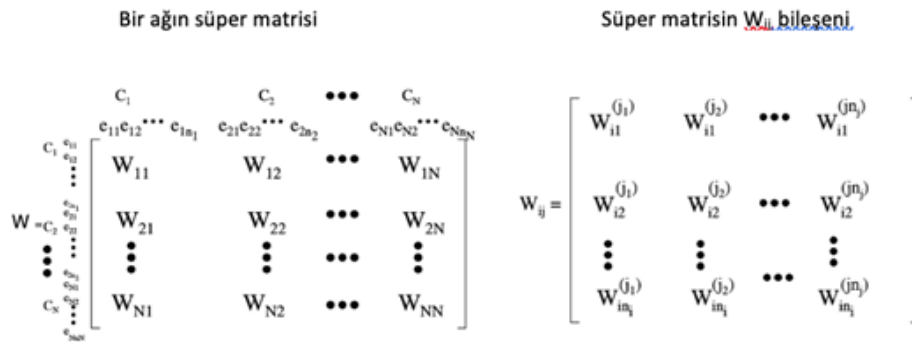
**Tablo 4.** İkili Karşılaştırmalardaki Önem Dereceleri (Saaty, 2001)

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit Önemde	İki kriterde eşit öneme sahip.
3	Biraz Önemli	Deneyimler ve yargılar bir ölçütü diğerine karşı biraz önemli kılar.
5	Fazla Önemli	Deneyimler ve yargılar bir ölçütü diğerine karşı güçlü şekilde önemli kılar.
7	Çok fazla Önemli	Ölçüt diğerine göre çok güçlü şekilde üstündür.
9	Son Derece Önemli	Eldeki bilgiler ve deneyimler bir ölçütün diğerine göre çok büyük oranda üstün olduğunu gösterir.
2,4,6,8	Ara Önem Dereceleri	Ara rakamlar gerektiğinde kullanılabilir.

Modelin gelişimi sırasında, tüm ölçütler ve alt ölçütler için geçerli olan en genel kümeler ağı ve bu kümelerin elementleri belirlenmekte ve belli bir düzende gösterilmektedir. Bu esnada, aynı kümeler ve aynı elementler için aynı etiketler kullanılmaktadır.

3.Adım: Süpermatris Oluşumu: İkili karşılaştırma matrisinden elde edilen öncelikler ile süpermatrisin sütunları oluşturulmaktadır. Süpermatris, matrisin solundaki bir ana ölçüt ya da alt ölçütün, matrisin üstündeki ana ölçüt ya da alt ölçüt üzerindeki etki önceliğini temsil etmektedir (Saaty, 2001).

N kümeden oluşan bir sistemin genel süpermatris hali Şekil 3'te gösterilmektedir. Örneğin, süpermatristeki bileşen (C1), (C1)'nin "ebeveyn" 'düğümüleri olan düğümler için türetilen tüm öncelik vektörlerini içerir. Ana ölçüt, yani (C1) 'deki alt ölçütler (C1) 'i besleyen alt ölçütlerin bir kısmını veya tamamını etkiler (Sagir ve Kamisli Ozturk, 2010). Wij'ler ise süpermatrisin elemanıdır. Örneğin, (W12) 1. ölçütün 2. ölçüt üzerindeki etkisinin ana özvektörüdür (Yang, 2008).

**Şekil 3.** Süpermatris oluşumu

4.Adım: En İyi Seçeneğin Seçilmesi: Seçenekler arasından en iyisi, limit süpermatris ve ölçüt ağırlıklarının bulunduğu değerler arasından en yüksek olanının seçilmesi ile gerçekleştirilmektedir (Özcan, 2017).

Rüzgâr türbini çiftliği saha seçimi probleminde de etkili olan ölçütler, alt ölçütler ve seçenekler birbirleri ile etkileşim halindedir. Bu etkileşimler karar problemini daha karmaşık hale getirmektedir. ANP yöntemi bu etkileşimleri göz önünde bulunduran ve sayısal faktörlerin daha iyi çözümlenmesi sağlayan bir yöntemdir. Bu nedenle saha seçiminde gerçek hayata uygunluğu sağlayan; karmaşık problemlerin çözülmesinde tercih edilen ANP yöntemi kullanılmıştır.

### Rüzgâr Türbini Çiftliği Saha Seçimi ANP Modeli

Bu çalışmada ele alınan problem Türkiye'de rüzgâr türbini çiftliğinin kurulacağı alanın seçilmesidir. Bu seçimin yapılabilmesi için göz önünde bulundurulması gereken çeşitli ölçütler vardır. Ancak bu ölçütlerin hepsi aynı önem derecesine sahip değildir. Farklı öneme sahip ve birbiri ile etkileşim halinde olan nitel ve nicel ölçütlerin gerçek hayata uygun bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla bir ANP modeli önerilmiştir.

## Ölçütlerin belirlenmesi

ANP modelinde aday şehirlerden en iyisinin belirlenebilmesi için öncelikle bu kararı etkileyecek ölçütler belirlenmiştir (Tablo 5). İzleyen aşamada ölçüt ve alt ölçütleri ile ölçütler arasındaki ilişkiler açıklanmıştır.

Tablo 5. Ölçüt tablosu

Ana Ölçütler	Alt Ölçütler
Güvenlik C1	C11 Güvenli kurulum mesafesi
	C12 Emniyet
	C13 Düzenli tesis testleri
	C14 Bilgi yönetimi
	C15 Doğal afet
Ekonomi C2	C21 Maliyet
	C22 Makul güç fiyatlandırma
	C23 Enerji giderleri
Sosyal C3	C31 İstihdam
	C32 Sosyal kabul
	C33 Yerel faydalar
	C34 Turizm
Çevre C4	C41 Canlılara etkisi ve ekolojiyi koruma
	C42 Arazi yapısı
	C43 Uzaklık
	C44 Gürültü
	C45 Havacılık
Politika C5	C51 Enerji sübvansiyonu politikası
	C52 Standartlara ve yönetmeliklere uyum
Teknik C6	C61 Verimlilik
	C62 Tesis kalitesi
	C63 Stoktaki yedek parçalar

**C1 Güvenlik:** Rüzgâr türbinlerinin güvenli bölgede kurulması, kurulum anında ve kurulduktan sonra oluşabilecek arızaları önlemektedir. Bu arızaların öngörülmesi ve kurulumun bu analizlere göre seçilmesi maliyet kaybını da azaltmaktadır. Ana ölçütün güvenlik olarak seçilmesinin ardından bu başlık altında altı alt ölçüt belirlenmiştir:

C11 Güvenli kurulum mesafesi: Rüzgâr çiftliği içerisinde meydana gelebilecek herhangi bir arıza veya güvenlik sorunu gibi riskli durumlarda civar canlılarının en az etkileneceği güvenli bir mesafe bırakılması gerekmektedir (Yeh, 2014).

C12 Emniyet: Dışarıdan gelebilecek beşerî zararlara karşı rüzgâr çiftliğinin korunması oluşabilecek sorunları önemli ölçüde önlemiş olur. Bu nedenle sahanın emniyetinin sağlanabileceği alanların seçilmesi bu ölçüt için etkileyicidir (Arı, 2017).

C13 Düzenli tesis testleri: Rüzgâr çiftliği kurmak büyük bir yatırımdır. Tesis içinde meydana gelebilecek arızalar üretimin aksamasına ve maliyet artmasına sebebiyet vermektedir. Bu olumsuzlukları önlemek adına yapılacak düzenli test ve gerekli bakımlar uzun vadede fayda sağlamaktadır. Tesis testlerinin yapımına uygun saha seçimi yapılmalıdır (Yeh, 2014).

C14 Bilgi yönetimi: Kurulan çiftliğe ve elde edilen enerji gücüne dair bilgi sahibi olunması, oluşabilecek güvenlik ihlallerinin ve risklerinin öngörülmesi gerekmektedir. Bu donanımın ve sahip olunan bilginin yer seçimine aktarılması ve kullanılması avantajlıdır (Yeh, 2014).

C15 Doğal afet: Yıldırım düşmesi, heyelan, çığ, deprem vb. doğal afetlere karşı riski en az olan arazi seçimi hayati önem arz etmektedir (Yeh, 2014).



**C2 Ekonomi:** Yeni kurulacak rüzgâr türbini sahasının en önemli ölçütlerinden biri de ekonomidir. Maliyetleri en aza indirmek ve en büyük karı elde etmek amacıyla dikkat edilmesi gerekenler ekonomi başlığının altında beş alt ölçüt ile açıklanmıştır.

C21 Maliyet: Çiftliğin kurulacağı arazinin satın alınması veya kiralanması, ihtiyaç duyulması halinde yol yapımı, türbin satın alınması ve tesisin kurulum maliyeti yatırım maliyeti kapsamına girmektedir. Genel enerji üretim maliyeti, çalışan maliyeti ve amortisman maliyeti işletme maliyeti başlığı altında toplanmaktadır. Yapılan araştırmalara göre yatırım maliyeti genel maliyetin %30'unu, işletme maliyeti ise yaklaşık %25-30 kadarını oluşturmaktadır. Bakım onarım ve diğer maliyet kalemleri geri kalan yüzdeleri oluşturmaktadır (Arı, 2017; Yeh, 2014).

C22 Makul güç fiyatlandırma: Genel pazar durumu ve yönetmelik kuralları çerçevesindeki sınırlara uygun fiyatlandırma yapılmalıdır. Bunu sağlamak için de elde edilen enerjinin şebekeye iletim ve dağıtım gibi maliyetleri en aza indirecek yer seçilmelidir (Yeh, 2014).

C23 Enerji giderleri: Tesisin yukarıda belirtilmiş olan maliyet kalemleri haricindeki dağıtım, enerjinin kullanılabilir hale getirilmesi gibi giderleridir (Arı, 2017).

**C3 Sosyal:** Rüzgâr türbinlerinin kurulmasının ardından bu bölgede üretilecek rüzgâr enerjisinin kullanım oranı da oldukça önemlidir. Sahanın çevresinde bu enerjiyi kullanılmasını gerektirecek sosyal alanın artması talebi artırır. Artan taleple birlikte yenilenebilir enerji kaynakların faydasının arttığında gözle görülebilecek düzeye gelir. Bu ana ölçütün etkilendiği dört alt ölçüt belirlenmiştir.

C31 İstihdam: RES'in kurulduğu alanda yaratacağı istihdam önemli bir faktördür. Bölge işsizliğinin azalmasına ve refah artışına önemli katkı sağlamaktadır. Vardiyalı çalışan güvenlik görevlisi ile sahadan sorumlu mühendis haricinde santral sahalarının işgücüne ihtiyaç duymaması istihdam faktörünün etkisini azaltmıştır. Bu etki daha sonra kullanılacak olan kriter ağırlıkları matrisinde de kendisini göstermektedir (Arı, 2017).

C32 Sosyal kabul: Çiftlik kurulmasının civar yerleşkeler tarafından kabul görmesi sosyal açıdan önemlidir (Arı, 2017; Yeh, 2014).

C33 Yerel faydalar: Çiftliğin olduğu bölgenin bu tesisten elde ettiği faydalar (ucuz ve erişilebilir elektrik ve olası istihdam) önemli bir kriteri oluşturmaktadır. Yerel fayda, sosyal kabulünü de etkilemektedir (Arı, 2017).

C34 Turizm: Turizm bölgelerinde ses ve görüntü kirliliği olmaması gerekmektedir. Bunun yanında otel ve eğlence işletmelerinin yoğunluğu sebebi ile çiftlik için uygun arazi bulmak zordur. Bu sebeple, turizm bölgelerine rüzgâr çiftliği kurulması tercih edilmez (Ghosh, 2016).

**C4 Çevre:** Yapılan her yeni projede canlıların etkilenebileceği olumsuz durumları en aza indirgemek gerekmektedir. Bunun için kurulacak türbinlerin çıkaracağı gürültü en aza indirilmeli, doğal hayatı koruma alanları içerisinde bulunmamalıdır. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin konumu her arazi için uygun değildir. Arazi yüksekliği, yapısı, ulaşım yerleri vb. gibi alanlara uzaklığı, bölgedeki yıllık rüzgâr yoğunluğu, rakım gibi kısıtlamalar çiftlik kurulumunu etkilemektedir. Bütün bunlar baz alındığında saha seçiminde önemli rol oynadığını belirlediğimiz 6 alt ölçüt bu ana başlık altında toplanmıştır.

C41 Canlılara etkisi ve ekolojiyi koruma: Orman ve Su İşleri Bakanlığı'nın orman ve ağaçlandırma alanları ile korunan alanları (milli park, sulak alan, yaban hayatı geliştirme sahası, çevre koruma bölgeleri, vb.), göç yolları, marina hayatı, yer altı kaynakları, akarsu ve balıkçılık üzerine etkisi seçilecek sahada önemli bir yere sahiptir (Arı, 2017; Yeh, 2014; Sarucan, 2010).

C42 Arazi yapısı: Seçilecek arazinin çiftlik kurulumu için uygun özelliklere (toprak yapısı, derinlik, ormanlık alan olmaması, eğim, rakım, yükseklik) sahip olması gerekmektedir. Rüzgâr türbin sahası, tarım ve hayvancılık gibi başka amaçlar için de kullanılabilir. Bu nedenle çiftliğin düz bir araziye kurulması daha kullanışlıdır (Arı, 2017; Yeh, 2014; Ghosh, 2016; Baban, 2001; Van Haaren, 2011).

C43 Uzaklık: Yollara, fay hattına, yerleşim yerine ve şebekeye olan uzaklık projede daha düşük inşaat maliyeti sağlar. Böylece seçilen saha, yoldan ve şebekeden 10 km'den uzakta olmamalıdır (Solangi, 2018; Ghosh, 2016).



C44 Gürültü: Türbinlerden gelen yüksek gürültü seviyesi nedeni ile proje yakınlarında yaşayan insanlar bu sorunlardan şikayetçi olabilir. Ancak gürültünün insan sağlığı üzerinde doğrudan etkisi yoktur. Yine de çevresel memnuniyetsizlik oluşmaması açısından çiftlik, yerleşim yerinden uzağa kurulmalıdır (Arı, 2017; Yeh, 2014).

C45 Havacılık: Türbinlerin yaydığı parıltının hava trafiği ve navigasyon üzerinde olumsuz etkisi olabilmektedir (Fetanat, 2015).

**C5 Politika:** Çiftliğin kurulması için devletin ve bazı kurum/kuruluşların koyduğu uyulması gereken kısıtlamalar ve yönetmelikler vardır. Bu kısıtlamalara göre, 3 önemli alt ölçüt seçilmiştir.

C51 Enerji sübvansiyonu politikası: Bütçe dahilinde olan ödenekler, devlet harcaması olarak görünür. Devletten sübvansiyon almak için yer seçimi konusunda da politika kapsamındaki maddelere uyulmalıdır (Yeh, 2014).

C52 Standartlara ve yönetmeliklere uyum: Hükümet yenilenebilir enerji politikalarını, yönergelerini ve kurulumunu açıkça belirtir. Rüzgâr teknolojisinin teşvik edilmesi ve kullanılması için belirlenen çerçevenin yanı sıra, rüzgâr projesi saha seçimini teşvik etmektedir (Yeh, 2014; Solangi, 2018).

**C6 Teknik:** Rüzgâr çiftliği kurmak maliyetli bir yatırım olduğu için, kurulan sahadan en yüksek verim elde edilmeye çalışılmalıdır. Rüzgâr çiftliğinin saha seçiminde kullanılacak teknik konular üç alt ölçüte ayrılmıştır.

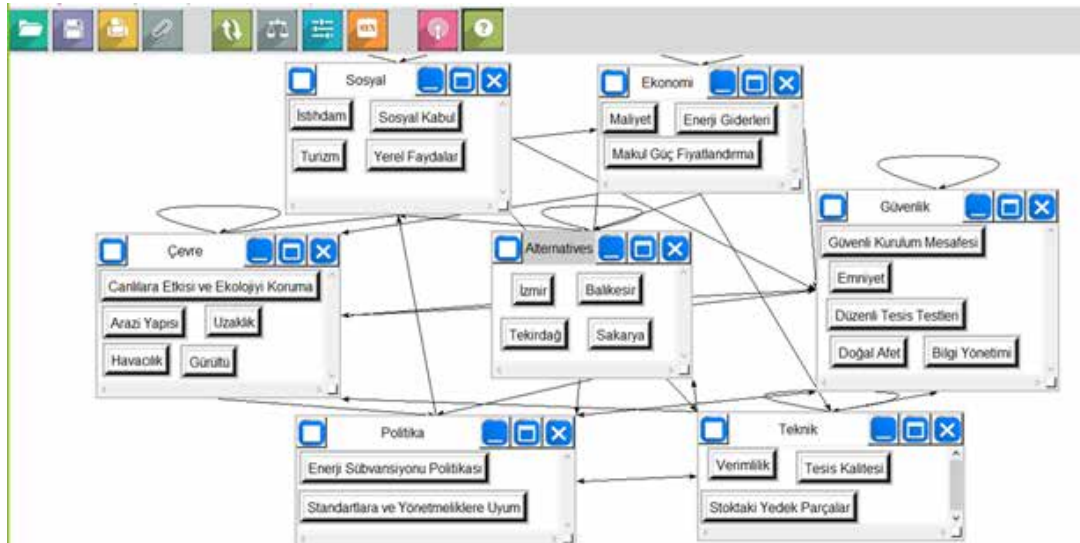
C61 Verimlilik: Dünya Enerji Ajansı, rüzgâr hızının 5,1 m/s ve üzeri olan yerlerdeki rüzgâr türbinlerinin verimli olduğu açıklamasında bulunmuştur. Rüzgâr verisi ve nitelikli insan gücü kullanılabilirliği çiftlik yeri seçimi için önemlidir çünkü yeterli ve mevcut veriler alındıktan sonra sürdürmek ve koordine etmek saha içerisinde verimliliği arttırmaktadır (Arı, 2017; Yeh, 2014).

C62 Tesis kalitesi: Tesis kurulurken seçilen malzeme, arazi yapısı ve işçilik kalitesi sürdürülebilirliği sağlar. Bu da kullanım ömrünü artırırken arıza maliyetini azaltmaktadır (Yeh, 2014).

C63 Stoktaki yedek parçalar: Arıza durumunda stokta yedek parça bulundurmak üretimin devamlılığı açısından önemlidir. Bu nedenle, kurulacak çiftlik alanı depo kurulumuna uygun veya mevcut bir depoya yakın olmalıdır (Yeh, 2014).

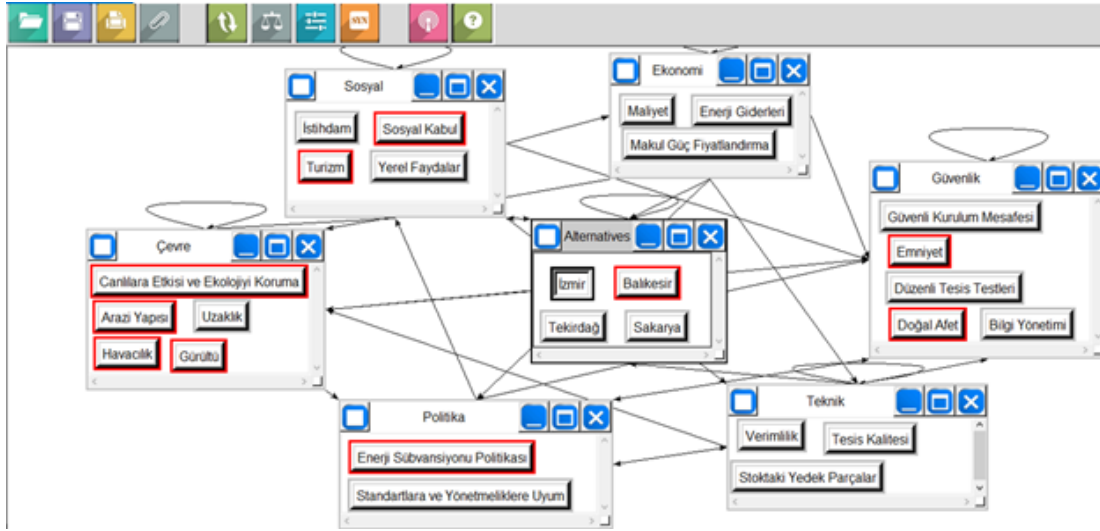
Ana ölçütler ve alt ölçütler belirlendikten sonra ANP modelinin kurulabilmesi için Super Decision yazılımı kullanılmıştır.

Seçenekler, ana ve alt ölçütler aralarındaki ilişkiler de göz önüne alınarak Şekil 4'te verilen ANP modeli oluşturulmuştur.



Şekil 4. Programda oluşturulan ANP modeli

Tüm ikili karşılaştırmaların tutarlı olduğu görüldükten sonra, ölçüt ve seçenek ağırlıkları EK-1'de verilen limit matristen elde edilmiştir. En uygun aday ilin belirlenmesi için Tablo 6'da verilen ağırlık matrisinin Normal sü-tunu değerleri dikkate alınmıştır. Uzman değerlendirmelerine göre ülkemizde rüzgâr türbini çiftliği kurulumu için en uygun seçenek en yüksek ağırlıkla (0,3664) İzmir ili olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. İzmir ilinin ilişkileri

### İkili Karşılaştırma Matrisleri

Modelin oluşturulmasının ardından ikili karşılaştırmalar konu uzmanları tarafından yapılmıştır. Birden fazla karar verici olduğu için de değerlendirmelerin geometrik ortalaması alınmıştır.

Hem kümeler arası hem de küme içi ölçütler arası bağımlılıklar olduğundan, ikili karşılaştırma matrislerinin değerlendirilmesinde farklı sorular sorulmuştur. Bu sorulardan bazıları:

1. Balıkesir iline göre arazi yapısı, canlılara etki ve ekolojiyi koruma üzerinde kaç kat önemlidir?
2. Enerji giderleri ölçütüne göre İzmir ili, Balıkesir ilinden kaç kat önemlidir?
3. Maliyet ölçütüne göre doğal afet, bilgi yönetiminden kaç kat önemlidir?

İkili karşılaştırma matrislerine bir örnek Şekil 6'da verilmiştir. Örneğin; bir karar vericiye göre enerji giderleri ölçütüne göre İzmir ili, Balıkesir iline göre dört kat, Sakarya iline göre beş kat ve Tekirdağ iline göre de iki kat önemlidir.

2. Node comparisons with respect to Enerji Giderleri																				
Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct																				
Comparisons wrt "Enerji Giderleri" node in "Alternatives" cluster																				
İzmir is moderately to strongly more important than Balıkesir																				
1. Balıkesir	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	İzmir
2. Balıkesir	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Sakarya
3. Balıkesir	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Tekirdağ
4. İzmir	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Sakarya
5. İzmir	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Tekirdağ
6. Sakarya	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Tekirdağ

Şekil 6. "Enerji giderleri ölçütüne göre İzmir ili, Balıkesir ilinden kaç kat önemlidir?" sorusunun ikili karşılaştırma matrisi

Tüm ikili karşılaştırmaların tutarlı olduğu görüldükten sonra, ölçüt ve seçenek ağırlıkları EK-1'de verilen limit matristen elde edilmiştir. Uzman görüşlerine göre belirlenen ölçüt ağırlıklarına göre en çok önem verilen ilk beş ağırlık Tablo 6'da verilmiştir. En önemli ölçüt, 0,195 ağırlık ile Politika kümesinde yer alan enerji sübvansiyonu politikası olarak belirlenmiştir. Ardından bilgi yönetimi, düzenli tesis testleri, arazi yapısı ve standartlara ve yönetmeliklere uyum ölçüleri gelmiştir.

**Tablo 6.** ANP modelinden elde edilen ölçüt ağırlıkları

Ana Ölçüt	Ölçüt	Ağırlık
Politika	Enerji Sübvansiyonu Politikası	0.194768
Güvenlik	Bilgi Yönetimi	0.169777
Güvenlik	Düzenli Tesis Testleri	0.126153
Çevre	Arazi Yapısı	0.091529
Politika	Standartlara ve Yönetmeliklere Uyum	0.058156

En uygun aday ilin belirlenmesi için Tablo 6'da verilen ağırlık matrisinin Normal sütunu değerleri dikkate alınmıştır. Uzman değerlendirmelerine göre ülkemizde rüzgâr türbini çiftliği kurulumu için en uygun seçenek en yüksek ağırlıkla (0,3664) İzmir ili olarak belirlenmiştir.

**Tablo 7.** ANP modelinden elde edilen şehir ağırlıkları

Şehir	İdeal	Normal	İşlenmiş
Balıkesir	0,572783	0,209880	0,005157
İzmir	1,000000	0,366422	0,009003
Sakarya	0,585154	0,214414	0,005268
Tekirdağ	0,571154	0,209284	0,005142

## SONUÇLAR

Enerji kaynaklarının hızla tükenmesini gözlemlediğimiz ve bunu önlemek istediğimiz bu çalışmada, öncelikle Türkiye'deki rüzgâr enerji potansiyeli dikkate alınmıştır.

Tüm dünyada rüzgâr enerjisi, 651 GW kapasiteye ulaşmıştır. İstatistiklere ve uzman tahminlerine göre 2030 yılında rüzgâr enerji santrallerinin şu anki kurulu gücünün iki katı kadar güç elde edileceği öngörülmektedir. Dünya piyasasında rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi konusunda başı Çin, ABD, Almanya çekmektedir. Türkiye, kurulu güç bakımından dünya sıralamasında üst sıralara yakın olsa da kişi başına düşen rüzgâr enerji santrali kurulu gücü açısından bir sıralama yapıldığında diğer ülkelerden oldukça geride kalmaktadır. Bu da gösteriyor ki ülkemizdeki RES sayısı ve üretilen elektrik ülkemizin ihtiyacının oldukça küçük bir kısmını karşılamaktadır (TÜREB 2019, Temmuz).

Bu potansiyelin kullanımını artırmak için rüzgâr türbinlerinin sayısını ve kullanımını yaygınlaştırmak hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda Türkiye'de hem kara hem de denizde yeni kurulacak rüzgâr türbin çiftliği için uygun yer seçiminin yapılması gerekmektedir. Yer seçimi problemi birçok ölçütlü karar verme problemidir. Ayrıca, seçim kararını etkileyen ölçütlerin de birbiri arasında etkileşimin olması söz konusudur. Araştırmalar sonucunda, ÇÖKV yöntemlerinden ölçütler arası ilişkileri dikkate alan ANP yönteminin diğer yöntemlere göre daha az kullanıldığı görülmüştür. Dolayısıyla, yeni kurulacak sahanın maliyetini, çevresel özelliğini ve sürdürülebilirliğini göz önünde bulunduran ve belirlenen tüm ölçütlerin ilişkilerini de dikkate alan bir ANP modeli oluşturulmuştur.

Çalışmada hem açık denizde hem de karada rüzgâr türbinlerinin kurulması ve birlikte incelenmesi hedeflendiğinden öncelikle Türkiye çapında bir aday il belirlenmesi yapılmıştır. ÇÖKV tekniklerine destek olacak şekilde, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlasından şehirlerin rüzgâr hızı sınıflandırılması yapılmış ve en yüksek rüzgâr hızına sahip üç il (Çanakkale, Balıkesir, Bartın) seçilmiştir. Ayrıca, denize kıyısı olan iller arasından dalga derinlikleri ve kıyıya olan uzaklık göz önünde bulundurulmuş ve kurulum için en verimli olabilecek beş il daha seçilmiştir. Son olarak, belirlenen toplam sekiz ilin 2018 yılından itibaren enerji tüketimleri ve OSB sayıları incelenerek gelecek beş yılın enerji tüketim tahminleri yapılmıştır. Böylece ANP modeli için gerekli aday iller oluşturulmuştur.

Çalışmada deneysel veriler kullanılmamış, sektör uzmanları ile iletişime geçilerek ANP modelinin ikili karşılaştırmaları uzman görüşleri ile yapılmıştır. Böylece çalışmada önerilen ANP modeli ile başlıca çevresel ve ekonomik açıdan göz önünde bulundurulması gereken birçok ölçüte sahip rüzgâr çiftliği saha seçimi gibi karmaşık bir karar probleminin analiz edilmesi sağlanmıştır.

Uzman görüşlerine göre belirlenen ölçüt ağırlıklarına göre en çok önem verilen ölçüt Enerji Sübvansiyonu Politikası olarak belirlenmiştir. Diğer ölçütler de sırası ile bilgi yönetimi düzenli test tesisleri, arazi yapısı ile standartlara ve yönetmeliklere uyum olarak belirlenmiştir. Buradan da görülmektedir ki, tesis kurulduğunda her ne kadar maliyet önemli bir unsur olsa da ele alınan problem uzun dönemli sonuçları olan stratejik bir karara ait olduğundan politika ve güvenlik ana ölçütlerine öncelik verilmelidir. Ayrıca elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere, tesis kurulduğunda arazi yapısının uygunluğu da dördüncü sırada önemli ölçüt olarak belirlenmiştir. Kurulacak bu tesis, sürdürülebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması adına çevreye karşı olumlu bir stratejik katkı sunacaktır. Önerilen model ve uzaman yargıları sonucunda da hem deniz hem karada kurulacak bir rüzgâr çiftliği için ülkemizde İzmir ili yaklaşık 0,367 önem derecesi ile en uygun aday il olarak belirlenmiştir. Türkiye’de hem kara hem de denizde aynı anda rüzgâr türbini bulduran bir rüzgâr çiftliği sahasının bulunmaması üzerine, böyle bir sahanın kurulabileceği alanı belirlemek çalışmanın literatüre yaptığı en büyük katkısıdır. Aynı zamanda, araştırmalar sonucu yer seçimi problemlerinde az kullanılan ANP yönteminin sistematik bir yaklaşım sergilenerek kullanılmış olması da literatüre yapılan bir diğer katkıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli ve sürdürülebilir bir modelinin oluşturulması da çalışmanın çevreye yapmış olduğu katkıyı göstermektedir.

Devam etmekte olan, uzun soluklu ve aşamalardan oluşan bu çalışma için ileride İzmir ilinde kurulacak olan sahaya yerleştirilecek rüzgâr türbinlerinin çeşidi ve sayısı bir optimizasyon modeli ile belirlenecektir.

## **TEŞEKKÜR**

Bu çalışma TÜBİTAK 2209/A programı ve Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Komisyonu Proje No: 21LTP014 tarafından desteklenmektedir.

## **KAYNAKLAR**

- Yıldız, E. (2019). Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları, uygulama: Güneş enerji santrali ve rüzgâr enerji santrali kuruluş maliyetleri (Master’s thesis, Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- TEİAŞ (2019). 2019 Yılı Elektrik Üretim-Tüketim Raporları. Erişim adresi: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>
- Tortumluoğlu, M. İ., & Doğan, M. Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 23(67), 25-41.
- Can, G., & Yücel, M. A. (2019). Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanarak Rüzgâr Enerji Santralleri için Yer Tespiti, 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 25-27.
- Fatih, E. C. E. R. (2021). FUCOM subjektif ağırlıklandırma yöntemi ile rüzgâr çiftliği yer seçimini etkileyen faktörlerin analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(1), 24-34.
- Bahadır Şimşek, A. (2014). Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Çok Kriterli Karar Analizinin Rüzgâr Türbini Yer Seçim Probleminde Uygulanması (Master’s thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Solangi, Y. A., Tan, Q., Khan, M. W. A., Mirjat, N. H., & Ahmed, I. (2018). The selection of wind power project location in the Southeastern Corridor of Pakistan: a factor analysis, AHP, and fuzzy-TOPSIS application. Energies, 11(8), 1940.
- Sennaroglu, B., & Celebi, G. V. (2018). A military airport location selection by AHP integrated PROMETHEE and VIKOR methods. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 59, 160-173.
- Athawale, V. M., Chatterjee, P., & Chakraborty, S. (2012). Decision making for facility location selection using PROMETHEE II method. International Journal of Industrial and Systems Engineering 1, 11(1-2), 16-30.
- Wiguna, K. A., Sarno, R., & Ariyani, N. F. (2016, October). Optimization solar farm site selection using multi- criteria decision making fuzzy AHP and PROMETHEE: case study in Bali. In 2016 International Conference on Information & Communication Technology and Systems (ICTS) (pp. 237-243). IEEE.
- Villacreses, G., Gaona, G., Martínez-Gómez, J., & Jijón, D. J. (2017). Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. Renewable energy, 109, 275-286.
- Lee, W. S. (2014). A new hybrid MCDM model combining DANP with VIKOR for the selection of location— real estate brokerage services. International Journal of Information Technology & Decision Making, 13(01), 197-224.
- Talinli, I., Topuz, E., Aydin, E., & Kabakçı, S. B. (2011). A holistic approach for wind farm site selection by FAHP. Wind farm: technical regulations, potential estimation and siting assessment. InTech, Croatia, 3(1), 213-234.



- Al-Shabeeb, A. R., Al-Adamat, R., & Mashagbah, A. (2016). AHP with GIS for a preliminary site selection of wind turbines in the North West of Jordan. *International Journal of Geosciences*, 7(10), 1208.
- Wang, C. N., Huang, Y. F., Chai, Y. C., & Nguyen, V. T. (2018). A multi-criteria decision making (MCDM) for renewable energy plants location selection in Vietnam under a fuzzy environment. *Applied Sciences*, 8(11), 2069.
- Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2014). Identification and selection of potential sites for onshore wind farms development in Region of Murcia, Spain. *Energy*, 73, 311-324.
- Yeh, T. M., & Huang, Y. L. (2014). Factors in determining wind farm location: Integrating GQM, fuzzy DEMATEL, and ANP. *Renewable Energy*, 66, 159-169.
- Ghosh, S., Chakraborty, T., Saha, S., Majumder, M., & Pal, M. (2016). Development of the location suitability index for wave energy production by ANN and MCDM techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1017-1028.
- TÜREB (2019, Temmuz). Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu. Erişim adresi <https://tureb.com.tr/lib/uploads/4e77501b714739a9.pdf> TÜREB (2019, Temmuz). GWEC Global Wind Report. Erişim adresi <https://tureb.com.tr/lib/uploads/12288d020bbbcd29.pdf>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2007) Rüzgâr Enerji Potansiyeli Atlası. Erişim adresi: <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-kaynaklar>
- T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2018). Elektrik Piyasası Sektör Raporu: Ocak 2018. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2019). Elektrik Piyasası Sektör Raporu: Ocak 2019. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- Türkiye Nüfusu. (2018). Türkiye İl ve İlçelere Göre Nüfusu. Erişim adresi: <https://www.nufusu.com/> Türkiye Nüfusu. (2019). Türkiye İl ve İlçelere Göre Nüfusu. Erişim adresi: <https://www.nufusu.com/>
- T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2016). Elektrik Piyasası Sektör Raporu: Ocak 2016. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2017). Elektrik Piyasası Sektör Raporu: Ocak 2017. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2020). Elektrik Piyasası Sektör Raporu: Ocak 2020. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2018). 81 İl Sanayi Durum Raporu:2018 yılı. Erişim Adresi: <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/81-il-sanayi-durum-raporlari>
- Saaty, T. L. (1996). Decision making with dependence and feedback: The analytic network process (Vol. 4922). Pittsburgh: RWS publications.
- YILDIZ, A. (2014). EN İYİ ÜNİVERSİTE SEÇİMİNDE ANALİTİK AĞ PROSESİNİN KULLANIMI. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 3(2), 108-119.
- Sagir, M., & Ozturk, Z. K. (2010). Exam scheduling: Mathematical modeling and parameter estimation with the Analytic Network Process approach. *Mathematical and Computer Modelling*, 52(5-6), 930-941.
- ÖZTÜRK, Z. K. (2014). Using a multi criteria decision making approach for Open and distance learning system selection. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 15(1), 1-14.
- Yang, Y. P. O., Shieh, H. M., Leu, J. D., & Tzeng, G. H. (2008). A novel hybrid MCDM model combined with DEMATEL and ANP with applications. *International journal of operations research*, 5(3), 160-168.
- Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Tamer, E. R. E. N. (2017). ANP ve TOPSIS yöntemleriyle türkiye’de yenilenebilir enerji yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(2), 204-219.
- Arı, S. E. (2017). Rüzgâr enerji santrali kuruluş yeri seçimi için farklı yaklaşımlar: bir model önerisi ve Türkiye’de bir uygulama. (Phd thesis, Gazi Üniversitesi Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı).
- SARUCAN, A., AKKOYUNLU, M. C., & Aydoğan, B. A. Ş. (2010). Analitik hiyerarşi proses yöntemi ile rüzgâr türbin seçimi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25(1), 11-18.
- Baban, S. M., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable energy*, 24(1), 59-71.
- Van Haaren, R., & Fthenakis, V. (2011). GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(7), 3332- 3340.
- Fetanat, A., & Khorasaninejad, E. (2015). A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran. *Ocean & Coastal Management*, 109, 17-28.



## **Havalimanlarında Güneş Enerji Sistemlerinin Kullanılması İle İşletme Maliyetinin Azaltılması**

### **Reducing Operating Cost By Using Solar Energy Systems In Airports**

Duygu YILMAZ<sup>1</sup>, Fatih KORKMAZ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çankırı

Doi: 10.51764/smutgd.970851

Geliş Tarihi : 13.07.2021

Kabul Tarihi : 04.08.2021

#### **ÖZET**

Gelişmekte olan ülkelerin her geçen gün enerji talebi artmakta ve enerji kaynaklarının gelecek nesillere aktarılması konusu tüm dünyada endişe uyandırmaktadır. Fosil yakıtlar hem yaydığı sera gazı hem de tükenebilir olduğundan ülkeler alternatif enerji kaynağı arayışına girmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, sınırsız ve çevre dostu olmalarından dolayı tüm dünyada tercih edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji tüketiminin yoğun olduğu havalimanlarında enerji maliyetlerini düşürmek ve fosil yakıtlara kıyasla emisyonu azaltmak için oldukça önem taşımaktadır. Havalimanlarında emniyet amacıyla çok fazla boş alan olduğundan modüler yapıdaki fotovoltaik sistemler bu alanlara kurulabilir. Bu çalışmada Yozgat Havalimanında güneş enerji sistemlerinin uygulanabilirliği incelenmiş ve bu sistemlerin havacılık üzerindeki ekonomik, teknik ve operasyonel etkileri sunulmuştur. Yapılan araştırma sonuçlarına göre işletmede PV sistemlerinin kullanılması durumunda yıllık 3.660.000kWh enerji üretilebileceği ve sistemin kendisini amorti etme süresinin 7.35 yıl olduğu hesaplanmıştır. Santrallerin kullanım ömrünün yaklaşık 30 yıl olduğu göz önünde bulundurulduğunda PV sistemlerinin kurulumunun ekonomik olduğu ve işletme maliyetlerini azaltacağı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Paneli, Havalimanları, Yenilenebilir Enerji

#### **ABSTRACT**

The energy demand of developing countries is increasing day by day and the transfer of energy resources to future generations raises concerns all over the world. Since fossil fuels both emit greenhouse gases and are exhaustible, countries are looking for alternative energy sources. Renewable energy sources are preferred all over the world because they are unlimited and environmentally friendly. The use of renewable energy sources is very important to reduce energy costs and reduce emissions compared to fossil fuels at airports where energy consumption is intense. Since airports have a lot of free space for safety purposes, modular photovoltaic systems can be installed in these areas. In this study; The applicability of solar energy systems at Yozgat Airport has been examined and the economic, technical and operational effects of these systems on aviation are presented. According to the results of the research; It has been calculated that if PV systems are used in the enterprise, 3.660.000kWh of energy can be produced annually and the system's payback period is 7.35 years. Considering that the service life of the power plants is about 30 years, it is concluded that the installation of PV systems is economical and will reduce operating costs.

**Keywords:** Solar Panel, Airports, Renewable Energy

Duygu YILMAZ, Orcid: 0000-0002-0083-4051, duygu.yilmz92@gmail.com

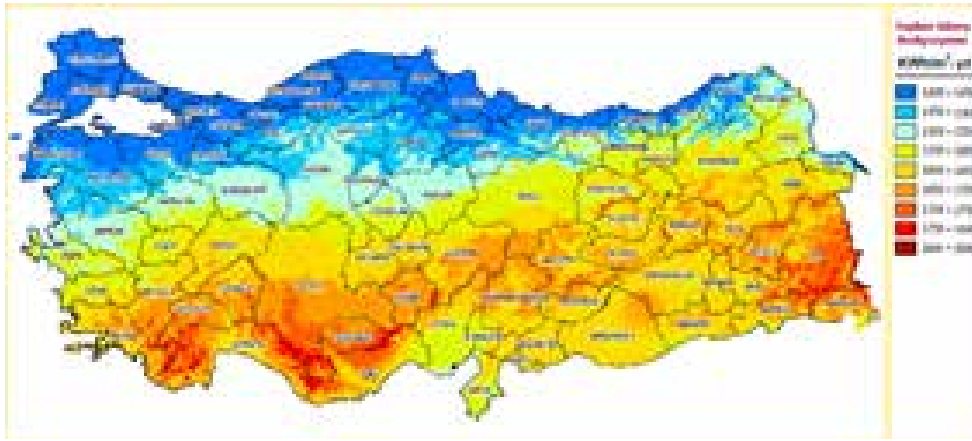
Fatih KORKMAZ, Orcid: 0000-0001-8524-2831, fkorkmaz@karatekin.edu.tr



## GİRİŞ

Günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeyinin artması ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak yaşam standartlarının yükselmesi paralelinde enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Son yıllarda karbon emisyonunun çevresel ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri toplumlar üzerinde bir farkındalık yaratmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır (Banda vd. 2019; Güner, 2020). Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılacağı bölgede coğrafi ve fiziki koşulların fizibil olup olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğadaki kaynaklardan elde edilebilen ve kullanılmasına rağmen azalmayan enerjiye verilen isimdir (Koç, 2015; Wikipedia, 2021). Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, hidrolik (hidroelektrik), jeotermal, biyokütle, hidrojen, dalga ve gelgit enerjisidir (Koç, 2015). Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde bulunan hidrojen gazının helyuma dönüşmesi ile meydana gelen enerjidir (Wikipedia, 2021). Yarı iletken maddeden yapılan güneş pilleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler. Yaklaşık olarak 25-30 cm<sup>2</sup>lik kare bir güneş pilinden 1W enerji üretilebilmektedir (Yıldız vd. 2019).



Şekil 1. Türkiye GEPA Haritası (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2021).

Türkiye güneş enerji potansiyeli açısından verimli bir coğrafi konuma sahip olduğundan güneş ışınlarından yüksek verimde fayda sağlanmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası'na (GEPA) göre Türkiye'de ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin 2741.07 saat (ortalama günlük toplam 7.5 saat), yıllık ortalama toplam ışınım şiddetinin ise 1527,46 kWh/m<sup>2</sup> (ortalama günlük toplam 4.18 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2021). Şekil 1'deki haritada görüldüğü üzere ülkemizin kuzeyde kalan bölgelerinde yağmurlu gün sayısı fazla olduğundan güneş enerji potansiyeli düşük, güney ve güneydoğu bölgelerinde ise güneş enerji potansiyeli oldukça fazladır (Güner, 2020; Özgür, 2020). Dolayısıyla güneş enerjisine yapılacak yatırım maliyetlerinin geri dönüş süresi göz önünde bulundurulduğunda güneş enerji potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerin tercih edilmesi daha uygun olacaktır (Özgür, 2020).

Türkiye'de güney ve güneydoğu bölgelerinde arazi fiyatlarının büyükşehirlerle kıyasla daha ucuz olması güneş enerji sistemlerinin kurulumunu artırmıştır (Güner, 2020). Türkiye'de 2021 yılı itibarıyla 7702 adet santral kurulmuş olup, 6.869,4 MW kurulu güce ulaşılmıştır (Güner, 2020; TEİAŞ, 2021). Büyükşehirlerde arazi fiyatlarının yüksek olmasından dolayı fotovoltaik sistemlerin yatırım maliyetleri artmakta ve bu sistemlerden faydalanımı güç hale getirmektedir. Bu noktada kamusal alanların atıl bölgelerinin değerlendirilmesi hem yatırım maliyetlerini azaltacak hem de karbon emisyonunun azalması hususunda farkındalığı artıracaktır (Güner, 2020). Yüksek enerji talebine sahip olan havalimanları geniş araziler üzerinde inşa edilirler ve uçuşların güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için fiziksel olarak engelden korunaklı hale getirilirler. Bu alanların, mevcut tasarım protokolleri nedeniyle başka herhangi bir kullanım değeri olmadığından güneş santrallerinin kullanımı için uygun yerlerdir (Anurag vd. 2017).

Bu makalede, havalimanlarında fotovoltaik sistemlerin kullanıldığı mevcut çalışmalar ışığında, Yozgat Havalimanı özelinde uygulanabilirliği ile yatırım maliyetleri araştırılmıştır. Güneş enerji santrallerinin kurulumu ile ilgili bazı güvenlik kaygılarına yer verilmiş ve alınması gereken önlemler açıklanmıştır.

## DÜNYADA GÜNEŞ ENERJİSİ KULLANAN HAVALİMANLARI

Fotovoltaik Sistemler, modüler yapıya sahip olmasından dolayı mevcut araziye kolayca entegre edilebildiğinden dünya üzerinde 100'den fazla havalimanına elektrik enerjisinin tamamını veya bir kısmını karşılaması için güneş panelleri kurulmuştur (Moştafa vd. 2016a; Yıldız vd. 2020). Dünyada havalimanlarında uygulaması gün geçtikçe artan güneş paneli sistemlerinin otopark sundurmasına, bina yüzeyine, araziye monte edilmesi gibi farklı kullanım alanları mevcuttur. Bu havalimanlarından bazıları aşağıda incelenmiştir.



**Şekil 2.** Dünyada güneş enerji santrallerinin kullanıldığı havalimanları (Moştafa vd. 2016a)

Hindistan'da bulunan Cochin Uluslararası Havalimanı, ihtiyacı olan elektrik enerjisinin tamamını yenilenebilir enerji olan güneş enerjisinden karşılamaktadır (URL-1, 2020). Cochin Uluslararası Havalimanında, tamamı apron alanında olmak üzere yaklaşık 4000 m<sup>2</sup> alan üzerinde 12MW kurulu güce sahip 46.150 adet güneş paneli bulunmaktadır (Yıldız vd. 2020). Bu projenin 9.3 milyon dolar maliyeti olup santralin kendisini 6 yılda amorti edeceği düşünülmektedir (URL-1, 2020). Ayrıca tarım alanında kullanılan damla sulama sisteminin ihtiyacı olan enerji, havalimanında bulunan bu güneş panellerinden sağlanarak sebze üretimi yapılmaktadır (URL-2, 2021).



**Şekil 3.** Cochin Havalimanı Güneş Santrali (URL-3, 2021).

Bir benzeri örnek olan Amerika'nın Indianapolis eyaletinde yer alan Indianapolis Uluslararası Havalimanında 75 dönümlük araziye her biri 280W gücünde, 41.000 güneş paneli kurularak 12,5 MW kurulu güce ulaşılmıştır (URL-4, 2021).

Almanya'nın başkenti Berlin'de 1934 yılında askeri havalimanı olarak inşa edilen Neuhardenberg Havalimanı, 2012 yılında başlatılan projeye Avrupa'nın en büyük güneş enerjili park alanına dönüştürülmüştür. Havalimanının arazisine yerleştirilmiş olan toplam 600.000 güneş paneliyle 145 MW'lık üretim hacmi olan solarpark oluşturulmuştur (Yıldız vd. 2020; URL-5, 2021).

Helsinki Havalimanında üretilen enerjinin büyük bir bölümü rüzgar enerjisinden elde edilmekle birlikte mevcut güneş panellerine yapılacak olan ilavelerle Kuzey Avrupa'nın en yüksek kapasiteli havalimanı olmayı hedeflemektedir. Havalimanındaki yeni otoparkın cephesi güneş panelleriyle kaplanarak buradan elde edilecek enerjiyle elektrikli araçların şarj edilmesi planlanmaktadır (URL-6, 2021).

Türkiye’de de benzer çalışmalar mevcut olmakla birlikte ilk güneş enerji santrali Erzincan Havalimanında kurulmuştur. Yapımı 7 ay süren anahtar teslim proje için her biri 325W gücünde 3779 adet panel, 6310 m<sup>2</sup>’lik araziye konumlandırılarak 2.09 MW’lık güç elde edilmiştir (URL-7, 2021; URL-8, 2021). Bu proje ile havalimanının toplam enerji ihtiyacının yarısına yakın kısmı karşılanacak ihtiyaç fazlası ise şebekeye geri kazandırılacak şekilde tasarlanmıştır (Yıldız vd. 2020).

Milas Bodrum Havalimanında bulunan otopark sundurması araçlara gölge sağlamakta olup aynı zamanda da üzerinde monte edilmiş olan güneş panelleri sayesinde enerji üretmektedir (URL-9, 2021).



**Şekil 4.** Milas Bodrum Havalimanı Güneş Santrali (URL-9, 2021).

TAV Havalimanları tarafından işletilen İzmir Adnan Menderes Havalimanı, enerji verimliliğini kullanarak iklim değişikliğinin en büyük sebeplerinden olan karbon salınımını en az seviyeye indirmiş olup kalan kısmını da nötralize ederek Avrupa’daki en çevreci 20 havalimanı arasına girmiştir. Türkiye’de ilk defa Enerji ve Çevre Dostu Tasarımında Liderlik sertifikası alan Adnan Menderes Havalimanı yeni iç hatlar terminali, Dünya’da ise bu sertifikayı almayı başaran 10 havalimanından birisi olmuştur. Yeni terminalde 5200 m<sup>2</sup>’lik alana monte edilmiş fotovoltaik panellerden yılda 450 MW’lık elektrik enerjisi üretilmektedir (Yıldız vd. 2020; Tav Havalimanları, 2021).

Dalaman ve Antalya Havalimanına kurulu gücü toplam 500 kWp olan güneş enerjisi santrali her projede 260W gücünde 962 adet olmak üzere toplam 1924 adet fotovoltaik panel kullanılarak 2013 yılında kurulumu tamamlanmıştır (URL-10, 2021).

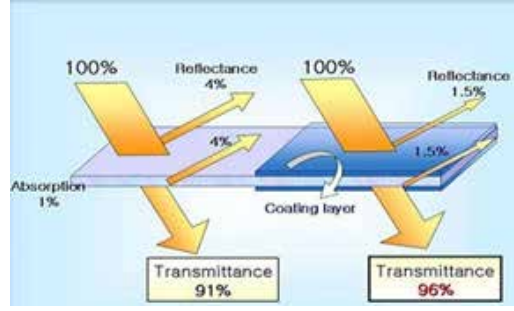
## **GÜNEŞ PANELLERİNİN HAVALİMANLARINDA OLUŞTURDUĞU GÜVENLİK KAYGILARI**

Bazı kısıtlamaları tanımlayan uçuş emniyeti yönetmelikleri, havalimanlarında her türlü yeniliğin uygulanabilirliği konusunda dikkate alınması gereken bir husustur (Janssen vd. 2010). Güvenliğin ön planda tutulduğu havalimanlarında güneş panelleri ile kaplı alanların kurulmasının yansıma, elektromanyetik dalga ve fiziksel penetrasyon konularında uçuş emniyetini olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülmektedir (Yıldız vd. 2020).

### **Yansıma**

Güneş paneli sistemleri havalimanlarında kullanıldığında kuleye ya da uçağa doğru yansıyan parıltı üretmeleri sebebiyle pilotları ve hava trafik kontrolörlerini görsel olarak etkileyebilirler (Yıldız vd. 2020). Bu parlama pilotların hava trafiğini kontrol etmelerini zorlaştırılabilir. Ancak havalimanlarında güneş paneli kurulumu yapılmadan önce aşağıdaki önleyici tedbirler alındığında panellerden kaynaklı oluşan yansımanın kabul edilebilir seviyede olacağı düşünülmektedir (Moştafa vd. 2016a).

- İlk olarak Federal Havacılık Kurulu (FAA) tarafından parlamayı analiz etmek için geliştirilen Güneş Parlama Tehlikesi Analiz Aracı’nı (SGHAT) kullanarak panellerin üreteceği parlama yoğunluğu belirlenmelidir (Moştafa vd. 2016a; Yıldız vd. 2019).
- Seçilen modüllerin ışığı emen ve koyu renkli malzemedden yapılmış olmasına dikkat edilmelidir (Moştafa vd. 2016a).
- Panelden yansıyan ışığın minimum seviyede olmasını sağlamak için panelin yüzeyi pürüzlendirilmeli ve yansıma önleyici kaplama kullanılmalıdır (Moştafa vd. 2016a).



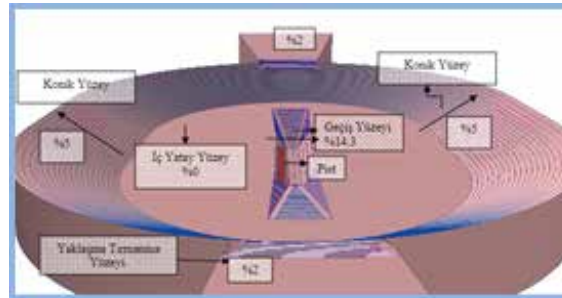
Şekil 5. Yansıma önleyici kaplamalı panel (URL-11, 2021).

## Elektromanyetik Dalga

Havalimanlarında uçuş emniyetini sağlamak amacıyla seyrüsefer yardımcı sistemleri kullanılmaktadır. Seyrüsefer yardımcı sistemleri hassas ve kritik işaretler olduğundan (Mostafa vd. 2016a), fotovoltaik sistemlerin metal bileşenlerinden yansıyan sinyallerden etkilenebilir ve radar karışıklığına sebep olabilir. Fotovoltaik panel kurulumundan dolayı havalimanlarında oluşabilecek radar karışıklığını önlemek için korumalı çerçeve kullanılmalı ve güneş enerji sistemleri ile seyrüsefer yardımcı sistemleri arasında 250-500 feet'lik mesafe bırakılmalıdır (Mostafa vd. 2016b).

## Fiziksel Penetrasyon

Uçakların piste inişlerini emniyetli bir şekilde gerçekleştirebilmesi ve çevresindeki cisimlerin hava sahasına taşabileceği sınırları tanımlamak için havalimanlarında mania sınırlama yüzeyleri oluşturulur. Maniadan arındırılmış bölgenin dışında kalan alan, fiziksel olarak hava sahasına nüfus etmeyeceğinden dolayı güvenli bir şekilde kullanılabilir (Annex-14, 2009). Şekil 6'da havalimanlarında kullanılan genel mania planı verilmiştir. Güneş paneli sistemleri mania teşkil edecek kadar fazla yüksekliğe sahip olmadığından, havalimanlarında fiziksel penetrasyon oluşturmadan konumlandırılabilir (Yıldız vd. 2019).



Şekil 6. Genel Mania Planı (Ulubay, 2013)

## FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN YOZGAT HAVALİMANINDA UYGULANABİLİRLİĞİ

2017 yılında Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığınca ihale edilen Yozgat Havalimanının Yozgat ili ve çevresinin hava ulaşım ihtiyaçlarını karşılaması planlanmaktadır (T.C. Yozgat Valiliği, 2021). 2018 yılında altyapı çalışmalarına başlanılan Yozgat Havalimanında projeye göre 206.604m<sup>2</sup> inşaat alanı bulunmaktadır (Wikipedia, 2021). Proje 2600x45m'lik pist, 300x120m'lik Apron ve 265x24m'lik Taksirut ve yaklaşık 20.000 m<sup>2</sup>'lik Terminal ve VIP Terminal Binası bulunacak şekilde tasarlanmıştır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2021). Şekil 7'de Yozgat Havalimanına ait Vaziyet Planı verilmiştir.



Şekil 7. Yozgat Havalimanı Vaziyet Planı (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2021).



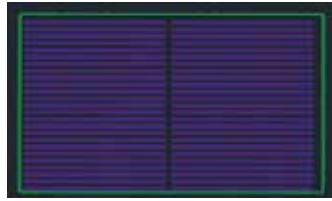
Yozgat Havalimanı için kullanılması planlanan güneş panellerinin Vaziyet Planı üzerindeki tasarımı Şekil 8’de verilmiştir. Yozgat Havalimanı hem güvenlik sebebiyle geniş atıl arazilere sahip olması hem de bulunduğu konum nedeniyle yeterli ışınım ve radyasyon miktarı gibi fiziksel koşulları karşılamasından dolayı fotovoltaik enerji üretimi için uygun bir alandır.



Şekil 8. Yozgat Havalimanı Vaziyet Planı

Kaynağını güneşten alan fotovoltaik sistemlerin çalışma prensibi, panel yüzeyine düşen güneş ışığının elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanır. Güneş panelinin üzerine gelen fotonların tamamı elektrik enerjisi üretmez. Fotonların bir miktarı panel tarafından emilir, bir miktarı yansıtılır, bir miktarı ise soğurulur. Fotovoltaik hücreler üzerinden soğurulan bu fotonlar enerji üretir (URL-12, 2021).

Yozgat Havalimanı için planlanan güneş enerji sistemi, ileriki dönemlerde pist uzatımı ya da yeni bir bina kurulmasına engel teşkil etmemesi amacıyla gelişim bölgesinin dışında seçilmiştir. İşletme henüz faaliyete geçmediğinden hali hazırda çalışmakta olan benzer havalimanlarından yola çıkılarak 3.660.000 kWh enerji üretebilecek kapasitede tasarlanmıştır. Küçük bir alanda daha fazla enerji üretilebildiği ve daha yüksek verimlilik elde edilebildiği için monokristal güneş panelleri tercih edilmiştir. Fotovoltaik sistemler, 330W gücünde 5000 adet monokristal güneş panelinden 1650 kW kurulu güç elde edilecek şekilde dizayn edilmiştir. Paneller 30° açıyla güneşe bakacak şekilde tasarlanmıştır. Vaziyet Planı üzerinde konumlandırılmış olan güneş panellerinin detayı Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Detay A

## YOZGAT HAVALİMANINDA KULLANILMASI PLANLANAN PV PANELİN ÖZELLİKLERİ

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası’na (GEPA) göre Türkiye’de yıllık ortalama toplam ışınım şiddetinin 1527, 46 kWh/m<sup>2</sup> (ortalama günlük toplam 4.18 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir. Yozgat ili için Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün verileri baz alınarak yıllık güneşlenme süresi 2465,90 saat kabul edildiğinde ortalama günlük güneşlenme süresi 6.75 saat olarak hesaplanmıştır. Buna göre Yozgat ilinin günlük ortalama ışınım şiddetinin 3,76 kWh/m<sup>2</sup>, yıllık ortalama ışınım şiddetinin ise 1372.44 kWh/m<sup>2</sup> olduğu görülmektedir. Yozgat Havalimanındaki toplam güneş paneli ihtiyacının belirlenmesine ait elde edilen sayısal değerler Çizelge 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yozgat Havalimanında Toplam Panel İhtiyacının Belirlenmesine Ait Elde Edilen Sayısal Değerler

Toplam Güneş Paneli İhtiyacının Belirlenmesi	
PV Kurulması Planlanan Alan	35 Dönüm
PV Gücü (W)	330W
PV Sayısı (Adet)	5000
Toplam PV Kurulu Gücü (kW)	1650kW
Yıllık Elektrik Enerjisi İhtiyacı (kWh)	3.660.000kWh
Ortalama Günlük Güneşlenme Süresi (saat/gün)	6.75 saat
Ortalama Günlük Işınım Şiddeti (kWh/m <sup>2</sup> -gün)	3.76 kWh/m <sup>2</sup>
Güneş Panelinin Eğim Açısı	30°

Yozgat Havalimanı için yıllık üretilen güç hesaplanarak detayları Çizelge 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Yozgat Havalimanı Güç Hesabı

Yozgat Havalimanı Güç Hesabı						
Aylar	Kurulu Güç (kW)	Verimlilik %	Öngörülen Güç (kW)	Gün Sayısı	Güneşlenme Süresi/Gün	Üretilen Güç (kWh)
Ocak	1.650	0,9	1.485,00	31	3.0	138.105,00
Şubat	1.650	0,9	1.485,00	28	4.1	170.478,00
Mart	1.650	0,9	1.485,00	31	5.2	239.382,00
Nisan	1.650	0,9	1.485,00	30	6.4	285.120,00
Mayıs	1.650	0,9	1.485,00	31	8.0	368.280,00
Haziran	1.650	0,9	1.485,00	30	9.7	432.135,00
Temmuz	1.650	0,9	1.485,00	31	10.9	501.781,50
Ağustos	1.650	0,9	1.485,00	31	10.5	483.367,50
Eylül	1.650	0,9	1.485,00	30	8.8	392.040,00
Ekim	1.650	0,9	1.485,00	31	6.5	299.227,50
Kasım	1.650	0,9	1.485,00	30	4.8	213.840,00
Aralık	1.650	0,9	1.485,00	31	3.0	138.105,00
Toplam						3.661.861,50

Yapılan araştırmalara göre 1MW kurulu gücün yaklaşık olarak 900.000,00\$= 6.750.000,00 TL (Dolar kuru 7.5TL alınmıştır.) kurulum maliyeti olduğu görülmüştür. 1650 kW kurulu güç bedeli 1.485.000,00\$ = 11.137.500,00 TL olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3.** Yozgat Havalimanı GES Maliyet Hesabı

GES Maliyet Hesabı			
Kurulu Güç (kW)	1MW Güneş Enerjisi Sistem Bedeli (\$)	Kurulu Güç Bedeli (\$)	Amortisman süresi (yıl)
1,65	900.000,00	1.485.000,00	7,35

Elektrik kWh bedeli Bodrum Milas Havalimanındaki fatura bedelinden yola çıkılarak 0.414 TL olarak kabul edilmiştir. Buradan yılda üretilen toplam enerji bedeli 1.515.240 TL = 202.032\$ olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 4.** Yozgat Havalimanı Yıllık Üretilen Enerji Bedeli

Yıllık Üretilen Enerji Bedeli				
Kurulu Güç (kW)	Yıllık Üretilen (kWh)	kWh Bedeli (TL)	TL Tutarı	\$ Tutarı
1.650,00	3.660.000,00	0,414	1.515.240,00	202.032

Çizelge 5'de karakteristik özellikleri verilen güneş paneli sistemlerinin yaklaşık 30 yıl kullanım ömrü olduğu ve sistemin kendisini 7.35 yılda amorti edeceği yapılan hesaplamalar neticesinde belirlenerek sistemin kurulumunun işletme için ekonomik olacağı sonucuna varılmıştır.

**Çizelge 5.** Yozgat Havalimanında Kullanılması Tasarlanan Fotovoltaik Sistemlerin Karakteristik Özellikleri

PV Modülün Karakteristik Özellikleri	
PV Hücre Tipi	Monokristal
PV Gücü (W)	330W
PV Hücre Boyutu (mm)	1668x1007x35
PV Sayısı (Adet)	5000
Toplam PV Kurulu Gücü (kW)	1650
PV Verimliliği (%)	0,9
Maksimum Güç Akımı (A)	9,68
Maksimum Güç Voltajı (V)	34.11
PV Hüresinden Üretilen Toplam Enerji (kWh)	3.660.000

## SONUÇLAR

Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber artan enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılmaktadır. Terminal binasının büyüklüğü ve kullanım sıklığı, yolcu sayısına bağlı olarak uçak sefer sayısındaki artış, ısıtma-soğutma sistemleri havalimanının ihtiyacını belirleyen faktörlerdendir. Enerjinin yoğun olarak kullanıldığı havalimanlarında, binalar gölgelemesiz ve birbirinden ayrık yapıda olduğundan yenilenebilir enerji kaynaklarından olan fotovoltaik sistemlerin kurulumu için oldukça uygun yerlerdir. Bu çalışmada Yozgat Havalimanındaki kamulaştırılmış atıl alanlar için fotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliği, panellerin kurulumunun ekonomik etkileri ve olası güvenlik kaygıları değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde yansıma, elektromanyetik dalga ve fiziksel penetrasyon gibi konuların tesise güneş paneli kurulumuna engel olacak kadar yüksek risk taşımadığı ancak kurulum esnasında bu hususlara dikkat edilerek tasarım yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Yapımı devam eden Yozgat Havalimanında, güvenlik amacıyla boş bırakılan atıl alanlar güneş panelleriyle değerlendirildiğinde 1650 kW kurulu güçten yılda 3.660.000 kWh enerji üretilebilmektedir. Yapılan hesaplama sonuçlarına göre bu sistemin kendisini 7,35 yılda amorti edeceği görülmüştür. Fotovoltaik sistemlerin kurulumu yapıldığında işletme maliyetlerinin azalacağı sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Anurag A., Zhang J., Gwamuri J. and Pearce J.M. General Design Procedures For Airport-Based Solar Photovoltaic Systems. 2017, 1–19.
- Banda M. H., Nyeinga K. and Okello D. Performance Evaluation of 830 kWp GridConnected Photovoltaic Power Plant at Kamuzu International Airport-Malawi. Energy for Sustainable Development 2019; 50-55.
- Güner, S., Muharremoğlu, A. Bir Havalimanı Otoparkına Kurulabilecek Fotovoltaik Üretim Sisteminin Tasarımı ve Enerji Analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (19), 2020; 182-188.
- ICAO. (2009). Annex-14: Aerodromes, Volume I–Aerodrome design and operations (Fifth Edition). International Civil Aviation Organisation.
- Janssen P, Myrzik J, Kling W and Reinders L. Technical Feasibility Study For a Solar Energy System at Amsterdam Airport Schiphol (AAS). In International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), March 23–25, 2010; Granada, Spain; 909-914.
- Koç, E., Kaya, K. Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu. Mühendis ve Makina 2015; Cilt 56, Sayı 668, 36-47.
- Mostafa M.F.A., Abdel Aleem S.H.E. and Ibrahim A.M. Using Solar Photovoltaic At Egyptian Airports: Opportunities And Challenges. In Proceedings Of The Power Systems Conference (MEPCON), December 27-29, 2016; Eighteenth International Middle East, Cairo, Egypt, 73-80.
- Mostafa, M.F., Aleem, S.H.A., and Zobaa, A.F. Risk Assessment and Possible Mitigation Solutions For Using Solar Photovoltaic at Airports. In Power Systems Conference (MEPCON), December 2016 Eighteenth International Middle East; IEEE: New Jersey, NJ, USA; 81–88.
- Özgür E. Türkiye’de Güneş Enerjisi. Makine Mühendisleri Odası. 297-316.
- TAV HAVALIMANLARI, İzmir Adnan Menderes Havalimanı. <http://www.tavhavalimanlari.com.tr/tr-TR/basin-odasi/basin-bultenleri/pages/izmir-dunyanin-en-cevreci-havalimanlari-arasinda> (Erişim Tarihi: 15-Şubat-2021)
- TEİAŞ, Santral Kurulu Güç Raporları. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari> (Erişim Tarihi:12-Mart-2021)
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Güneş, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (Erişim Tarihi:5-Nisan-2021)
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye GEPA Haritası. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (Erişim Tarihi:10-Mart-2021)
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Yozgat Havalimanı. <https://aygm.uab.gov.tr/hava-meydanlari-daire-baskanliklari>(Erişim Tarihi: 19- Şubat-2021)
- T.C. Yozgat Valiliği, <http://www.yozgat.gov.tr/yozyat-havalimani> (Erişim Tarihi: 19- Şubat-2021)
- Ulubay A., Varol M.B. Havaalanları Etrafında Emniyetli Sahaların Oluşturulması ve Sunulması. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Ocak 2013; Cilt 6, Sayı 1, 113-122.
- URL-1, Cochin Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <https://www.enerjigunlugu.net/hindistanin-cochin-havalimani-elektrigini-gunesten-karsiliyor-30906h.htm> (Erişim Tarihi: 25- Aralık-2020).
- URL-2, Cochin Havalimanında Güneş Enerjili Tarım. <https://www.tarlasera.com/haber-11434-havaalaninda-gunes-enerjili-tarim> (Erişim Tarihi: 21-Ocak-2021)



- URL-3, Cochin Havalimanı Güneş Santrali. <https://www.digitaltalks.org/2015/08/21/gunes-enerjisi-ile-calisan-dunyanin-ilk-havaalani/> (Erişim Tarihi: 20- Şubat-2021)
- URL-4, Indianapolis Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <http://www.otomopil.com/2015/10/05/gunese-alanandi/> (Erişim Tarihi: 1- Şubat-2021)
- URL-5, Neuhardenberg Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <https://www.airporthaber.com/havacilik-haberleri/bir-zamanlar-havaalaniydi-simdi-52-bin-hanenin-enerji-kaynagi.html> (Erişim Tarihi:10-Şubat-2021)
- URL-6, Helsinki Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <https://www.havayolu101.com/2019/05/25/helsinki-havalimani-gunes-enerjisi-kapasitesini-artiriyor/> (Erişim Tarihi:10-Şubat-2021)
- URL-7, Erzincan Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <https://www.solar.ist/erzincan-havalimani-gunes-enerjisinden-elektrik-uretimine-basladi/> (Erişim Tarihi: 10- Şubat-2021)
- URL-8, Erzincan Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <https://www.enerjigunlugu.net/erzincan-havalimani-ges-uretime-gecti-35679h.htm> [Erişim Tarihi: 12- Şubat-2021]
- URL-9, Milas-Bodrum Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <https://www.solar.ist/gtcnin-cift-yuzlu-bifacial-gunes-panelleri-milas-bodrum-havalimaninda-kullaniliyor/> (Erişim Tarihi: 13- Şubat-2021)
- URL-10, Dalaman- Antalya Havalimanı Güneş Enerji Santrali. <https://www.enerjigunlugu.net/antalya-havalimani-gunes-santrali-devrede-6963h.htm> (Erişim Tarihi: 17- Şubat-2021)
- URL-11, Yansıma Önleyici Kaplamalı Panel. [http://www.cnbmnj.com/en/product\\_detail.asp?id=1113&cid=335&bid=334](http://www.cnbmnj.com/en/product_detail.asp?id=1113&cid=335&bid=334) (Erişim Tarihi: 24- Şubat-2021)
- URL-12, Güneş Pili Çalışma Prensibi. <https://moduled.com.tr/gunes-pili-nedir-nasil-calisir/#:~:text=G%C3%9F%20Pili%20%C3%87al%C4%B1%C5%9Fma%20Prensibi,fotovoltaik%20etki%20ile%20elektrik%20%C3%BCretir.&text=Fotonlar%20g%C3%BCne%C5%9F%20pili%20h%C3%BCresi%20%C3%BCzerine,taaraf%C4%B1ndan%20so%C4%9Furulan%20fotonlar%20elektrik%20%C3%BCretir.> (Erişim Tarihi: 19- Şubat-2021)
- Wikipedia, Güneş Enerjisi. [https://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F\\_enerjisi](https://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F_enerjisi) (Erişim Tarihi:14-Mart-2021)
- Wikipedia, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Yenilenebilir\\_enerji#:~:text=Yenilenebilir%20enerji%20do%C4%9Fadaki%20kaynaklardan%20elde,enerjisi%20biyok%C3%BCtle%20enerjisi%20olarak%20s%C4%B1ralanabilir](https://tr.wikipedia.org/wiki/Yenilenebilir_enerji#:~:text=Yenilenebilir%20enerji%20do%C4%9Fadaki%20kaynaklardan%20elde,enerjisi%20biyok%C3%BCtle%20enerjisi%20olarak%20s%C4%B1ralanabilir) (Erişim Tarihi:14-Mart-2021).
- Wikipedia, Yozgat Havalimanı. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Yozgat\\_Havaliman%C4%B1](https://tr.wikipedia.org/wiki/Yozgat_Havaliman%C4%B1) (Erişim Tarihi: 19-Şubat-2021)
- Yıldız Ö. F., Yılmaz M. ve Çelik A. Havalimanlarında Fotovoltaik Sistemlerin Kullanılması. 22th Congress Of Thermal Sciences and Technology 2019, Kocaeli, Türkiye.
- Yıldız Ö.F.,Yılmaz M., Çelik A. Ve İmik E. Havalimanlarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması. Journal Of Aviation 2020. Cilt 4(1), 162-174.

**Perlitin Dünyada ve Türkiye’de Çimento ve Beton Sistemlerinde Kullanımı**

**The Use of Perlite in Cement and Concrete Systems in the World and Turkey**

Lutfullah Turanlı, Cihan Dernek

<sup>1,2</sup>Yıldırım Beyazıt University Head of Civil Engineering Department, Ankara

Doi: 10.51764/smutgd.987973

Geliş Tarihi : 27.08.2021

Kabul Tarihi : 05.10.2021

**ÖZET**

Küresel ısınma nedeniyle birçok sektör sürdürülebilir yöntemler keşfetti. Karbon salınımını azaltmak için birçok sektörde birçok çalışma yapılmıştır. İnşaat sektöründe çimento üretimi büyük miktarda karbon salınımına neden olmakta ve bu duruma son vermek için Portland çimentosu ile üretilen beton yerine yeşil beton adı verilen puzolan katkılı beton kullanılmaya başlanmıştır. Bu yeşil betonların üretiminde kullanılan malzemelerden biri de perlittir. Bu çalışma perlit madeninin literatür taramasıdır. Perlit madeninin dünyadaki ve Türkiye’deki durumu araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre perlitin yapay puzolanın yerine nasıl kullanılabilceği, inşaat sektörüne hangi aşamalarda hazır hale getirildiği ve ülkemiz için neden büyük önem taşıdığı açıklanmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Perlit, doğal puzolan, perlit rezervleri, Türkiye’de perlit, perlit tozu.

**ABSTRACT**

Due to global warming, many sectors have discovered sustainable methods. Many studies have been conducted in various sectors to reduce carbon emissions. Cement production in the construction sector causes an enormous carbon emission, and to put an end to this situation, pozzolan-added concrete, which is called green concrete, has been put into use instead of concrete produced with Portland cement. One of the materials used in the production of these green concretes is perlite. This study is a literature review of the perlite mine. The situation of perlite mines in Turkey and the world has been researched. According to the results of experimental studies, it has been tried to explain how perlite can be used as a substitute for artificial pozzolan, at what stages it is made ready for the construction sector, and why it is of great importance for our country.

**Keywords:** Perlite, natural pozzolan, reserves of perlite, perlite in Turkey, perlite powder.

Lutfullah Turanlı, Orcid: 0000-0001-5304-091X , lturanli@ybu.edu.tr

Cihan Dernek, Orcid: 0000-0003-2577-5243, dernek.cihan93@gmail.com

## INTRODUCTION

Perlite is a rock that reaches up to twenty times its volume when expanded, is light in its expanded form, and provides heat and sound insulation. Turkey has 74% of the possible perlite reserves in the world. In the world and Turkey, the most common use of perlite is seen in the construction sector. For this reason, perlite consumption in the world is highly affected by the fluctuations in the construction sector. Perlite has significant advantages compared to cement in terms of heat insulation, sound insulation, and earthquake resistance, and for this reason, the use of perlite in the construction sector will make significant contributions to the country's economy. Concrete; consists of chemical additives to be added depending on the desired properties of cement, aggregate, water, and concrete. Chemical additives can be used to give concrete some wanted properties, but aggregates used at a rate of 60-85% are the components that most affect the characteristic properties of concrete. The unit weight of the concrete may vary depending on the characteristics of the aggregate used. Thus, lightweight concrete can be producible. Advantages of lightweight concrete over regular concretes; can be listed as reducing dead loads in the building, earthquake resistance, providing high heat and sound insulation among the light concretes produced using light aggregates. Perlite-added concrete ensures that about ten times better thermal insulation compared to regular concrete. Light building materials with perlite additives reduce greenhouse gas waste by increasing energy efficiency and are therefore called environmentally friendly materials. Heat insulation will provide, energy savings will achieve in buildings where perlite added concrete is used. This factor is significant for our country that imports energy from abroad. Thanks to energy savings, contributes to the country's economy. Heat insulation will provide, energy savings will achieve in buildings where perlite added concrete is used. This factor is significant for your country that imports energy from abroad. Thanks to energy savings, contributes to the country's economy. (Duaj, 1997).

### Perlite

Perlite is heated suddenly to a suitable temperature very light and porous; it is a pearly luster, acidic volcanic glass. Perlite is not a mineral, it is a rock. The word perlite is derived from the word "Perle" which means pearl. This name is given because some perlite types become small spheres when broken. Expanded perlite is the name of the last state in which raw perlite has come to some processes. In addition, volcanic glasses that contain water such as "obsidian" or "pitchstone" and expand when heated can be called perlite. The recognition and industry of perlite are new. It was first observed in Germany in 1925 that perlite expanded when heated. However, no serious studies have been conducted on this subject for many years. Expanded perlite was invented in 1940 in Arizona. The perlite industry started to develop essentially after 1947. This development in America later pioneered the establishment of this industry in Western Europe and Japan.

### Raw Perlite

Raw perlite is the name given to the rock formations of perlite before it is processed. The most significant feature of raw perlite is water that provides stability and is in the form of silica at 2.5% (D.P.T, 2001).



Figure 1 Raw Perlite

### Expanded Perlite

Raw perlite goes through the grinding process before being subjected to 400 degrees. After these processes, perlite subjected to high heating (750 ° C -1200 ° C) expands with the steam effect and forms a glass-like foam aggregate. It expands up to 20 times its volume and becomes white after expand. It is called expanded perlite. (D.P.T, 2001).



Figure 2 Expanded Perlite

### Perlite Chemical Composition

Perlite is a material that contains water, has a specific texture, and is acidic volcanic glass. Free of heavy metals, radioactive elements, and organic matter. It is very pure in chemical terms. Chemical compositions of perlite are given in table 1 (D.P.T, 2001).

**Table 1** Perlite chemical compositions

Chemical Composition	Amount
SiO <sub>2</sub>	71.0-75.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5-18.0
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9-4.0
K <sub>2</sub> O	0.5-5.0
CaO	0.5-2.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1-1.5
MgO	0.02-0.5
TiO <sub>2</sub>	0.03-0.2
H <sub>2</sub> O	2.0-5.0
MnO <sub>2</sub> , FeO, Cr	0.0-0.1
Ba	0.0-0.05
PbO	0.0-0.03
NiO, Cu, B, Be	Very Little
SO <sub>3</sub>	0.0-0.2

### Perlite Physical Properties

Perlite has a glassy structure and can decompose into small pieces. Raw perlite breaks easily because it has a fine-grained, porous structure. Perlite can be classified as follows according to its appearance and texture. Pumice, granular, concentric structured, and fibrous perlite. Physical properties of perlite are given in table 2 (Azizi, 2007), (M.T.A, 1985).

**Table 2** Perlite Physical Properties

	Raw Perlite	Expanded Perlite
Color	Grey, Shades of grey and black	White, shades of grey
Softening Point	800-1100 °C	871-1093 °C
Melting Point	1315-1390 °C	1260-1343°C
pH	6,6-8	-
Hardness	-	5-6 Mohs
Specific Heat	0,2kcal/kg°C	0,2cal/g°C
Specific Weight	2200-2400kg/m <sup>3</sup>	-
Thermal Conductivity	-	0.04W/Mk
Dissolution in Acid	Hot concentrated alkali, in mineral, concentrated acids While it melts a little, dilute mineral or concentrated little in weak acids they melt.	Hot concentrated alkali and soluble in hydraulic acid, mineral little in concentrated acids, dilute mineral or concentrated They dissolve very little in weak acids.

## **Perlite Mineralogical Composition**

90–97% of its volume is glass, and the crystallized minerals are feldspar and biotite. Rarely, apatite and magnetite are seen. Dough, often made of volcanic glass it contains microliths and phenocrysts. Despite the glass character of perlite, fine cracks detect in the onion-skin structure.

The refractive index of perlite is between 1.488 and 1.506, with an average value of 1,497. In polarized light, perlite glass is isotropic; but sometimes a slight birefringence is shown. According to X-ray analysis (XRD), perlites contain up to 4% free silica detected. In altered perlites; chalcedony, opal, montmorillonite, and ilmenite minerals can be found. But in unaltered perlites do not contain secondary minerals.

## **EXPERIMENTAL STUDIES REVIEW**

### **Perlite Powder in Concrete and Its Effects**

In an experimental study, it was tried to reduce the alkali-silica reaction by using perlite powder. In an experimental study, it was tried to reduce the alkali-silica reaction by using perlite powder. Mortar samples include specific amounts of silica fume, expanded perlite, and raw perlite. During the study, two different types of aggregates were used. These are called highly reactive river aggregate and reactive monzodiorite. These two samples that contain silica fume and expanded perlite separately, were tested with monzodiorite and river aggregate.

According to the ASTM C 1260, three procedures were done. First, the mortar samples were poured into a stick mold, then kept in NaOH solution for 30 days, and finally, the change in length of the samples was observed. The tests, which proceed in two different stages, were tested as perlite powder and silica fume samples in the first stage and as raw perlite additive in the second stage. Test results compared. According to the results of the studies, it is seen that when raw perlite or expanded perlite is included in the samples, it triggers the alkali-silica reaction and suppresses the expansion. Looking at the results of the experiments on raw perlite and expanded perlite, it is seen that expanded perlite is more resistant to alkali-silica reaction compared to raw perlite.

It determined that there are not enough studies on perlite in the literature. It emphasized that experimental studies should increase. (Turanlı L. B., 2004).

### **Fibre-Reinforced Semi-Lightweight Concrete with Unexpanded Perlite**

In a study carried out in the METU Materials Mechanics Laboratory, a fiber-reinforced lightweight concrete sample was prepared for seismic reinforcement in reinforced concrete structures and lightweight concrete properties were investigated. The samples containing 35% unexpanded perlite were subjected to tests as steel fiber reinforced and polypropylene added.

Samples of unexpanded perlite and fiber-free concrete also were tested. It has been tested samples without fiber additive and unexpanded perlite additive.

As a result of the experimental studies, considering the 28-day compressive strength, it was observed that the lightweight concrete with unexpanded perlite was more effective than the concrete sample made of ordinary Portland cement and had lower tensile strength and modulus of elasticity. It observed that the specimen with unexpanded perlite decreases the load and energy capacity and affects the bending strength of the panels. As a result, fiber samples with perlite and fiber specimens without perlite were observed, and that the specimens with perlite were more advantageous with their results. (Turanlı L. O., 2011).

### **High Volume Additive Natural Pozzolans**

In an experimental study, some experiments were carried out on 3 different concrete samples. Fly ash, blast furnace slag, pozzolanic additives were added to the concrete samples.



The values were obtained as a result of the experiments examined. Setting time, compressive strength, chloride ion values were discussed. Perlite, zeolite and volcanic tuff were mixed as 50% natural pozzolan and 50% cement. Likewise, a concrete specimen obtain by mixing fly ash and blast furnace slag with 50% cement, and these five different samples compared each other with the reference concrete sample made with 100% Portland cement.

In the literature, natural pozzolans are found in concrete at a rate of 30% or less. The most important feature of this study is the high amount of natural pozzolans in concrete and results are discussed. According to the results of the studies, perlite and blast furnace slag had less pressure resistance in 28 days compared to the others. However, on the 91st day, the sample prepared only with perlite has passed the pressure extension of the other samples. In addition, in this study, was understood that the high amount of natural pozzolan samples did not remain behind the specimens with a high amount of fly ash and high furnace slag, and could be used instead of artificial pozzolan when necessary. (Mehta, 2007).

### Lightweight Concrete Durability with Perlite Aggregate Additive

Concrete strength investigated that 0-20% weight expanded perlite additive concrete. The sample was stored in an environment that would be exposed to chlorine and its durability tested. Instead of Portland cement, 50% blast furnace slag and 7% silica fume were used. Strength of concrete, unit weight, drying shrinkage, chloride permeability, compressive strength, bending strength, the resistance of concrete against steel corrosion were investigated as mechanical properties. Most importantly, the thermal insulation feature was defined. It is clear from the results of all experiments that; Perlite added concrete is 20-30% lighter in weight than concrete produced from Portland cement.

When compressive strength compares, it was found sufficient. A concrete sample containing 10-15% perlite aggregate was more successful in seismic loading tests than concrete produced from regular Portland cement. The biggest difference was in thermal insulation. The thermal insulation of concrete produced from perlite aggregate is much higher than that of normal concrete. (Ibrahim, 2020).

### Experimental Studies Results

The conclusions to be drawn from the summaries of the experimental studies given above can be listed as follows.

- Concretes made with expanded perlite show more effective performance in alkali-silica reactions than those made with raw perlite. Although the perlite reserves in our country constitute 3/4 of the world, Turkey follows the policy of selling its raw perlite reserves without expanding them. This situation should be reversed and the extracted raw perlite products should be expanded in our own country used within itself and sold the surplus.
- According to the results of the fibrous concrete with perlite additive's tests, the compressive strength values of 7 and 28 days are given. The values are as follows; (Turanlı L. O., 2011).

**Table 3** Test Values

Properties	Compressive Strength		Modulus of Elasticity		Splitting Tensile Strength	
	7	28	28	28	28	28
SLC	35	36.4	14.0	3.06		
SLC-P	31.5	52.2	10.4	2.53		
SFRLC	36.0	37.9	13.5	5.67		
SFRLC-P	26.8	44.7	9.1	4.23		
PFRLC	31.9	35.2	14.9	4.28		
PFRLC-P	28.7	52.8	9.2	3.85		

- Definition of abbreviations given in table 4 (Turanlı L. O., 2011).

**Table 4** Definitions of Abbreviations

Abbreviation	Definition
SLC	Semi-lightweight concrete
SLC-P	Semi-lightweight concrete with 35% unexpanded perlite powder replacement
SFRSLC	Steel-fibre-reinforced semi-lightweight concrete
SFRSLC-P	Steel-fibre-reinforced semi-lightweight concrete with 35% unexpanded perlite powder replacement
PFRSLC	Polypropylene-fibre reinforced semi-lightweight concrete
PFRSLC-P	Polypropylene-fibre reinforced semi-lightweight concrete with 35% unexpanded perlite powder replacement

• According to the results, when the 7-day and 28-day compressive strengths are compared, the unexploded perlite added concrete samples show less performance at the 7-day compressive strength than the non-additive concrete, while the 28-day compressive strength increases considerably compared to the regular concrete. When the concrete is ready for use, the compressive strength of the unexploded perlite added concrete is much better than concrete without additive perlite. Considering only the compressive strength, the unexploded perlite additive of the concrete increased the strength very well rather than the steel fiber and polypropylene fiber. Considering the modulus of elasticity and split tensile strength, perlite additive decreased these two values.

• In the study of the use of perlite aggregate in lightweight concrete, the weight of the concrete sample using perlite aggregate was reduced compared to the traditional concrete, it gave better results in the loading test than the conventional concrete, and most importantly, the perlite-added concrete was ahead with a big difference in thermal insulation.

• As a result of all these experiments, the importance of using perlite as a sustainable material in the construction sector was emphasized. In the light of this, the use of perlite in the world and Turkey and the importance of Turkey in perlite will be mentioned.

## **USAGE AREAS OF PERLITE IN CONSTRUCTION INDUSTRY**

### **Lightweight Concrete Production**

In a study conducted in the building materials branch of the METU civil engineering department, 3 different samples were prepared. These are; raw perlite aggregate carrier lightweight concrete, raw perlite aggregate and perlite dust, self-compacting carrier lightweight concrete, and limestone aggregate regular weight carrier concrete. In the experiments performed, CEM I 42.5 R type cement, perlite aggregate with 0-12 mm grain size, was used to pass through 45 microns. Ground perlite powder, 0-25 mm limestone aggregate was used. The samples were determined by pozzolanic activity, alkali-silica reactivity, freeze-thaw effect, acid, resistance to sulfate, and carbonation effect subjected to tests. Unit weight in results 2393 kg / m<sup>3</sup> limestone aggregate bearing concrete instead, the unit weight is 1935 and 1970 kg / m<sup>3</sup> the one which raw perlite aggregate carrier lightweight concrete found to be suitable for the purpose.

Lightweight concrete in TS 2511 standard; air-dried unit weight 1900 kg/m<sup>3</sup> less than and compressive strength at least 160 kgf /cm<sup>2</sup> (16 MPa) as concrete is defined. American Concrete Institute (American Concrete Institute-ACI) about bearing lightweight concrete in the committee report No. 213, bearing lightweight concrete; lightweight aggregate 28-day air dry unit weight obtained using usually 1440-1850 kg /m<sup>3</sup> and compressive strength 17 it is defined as concrete above MPa. In general practice unit weights, about 1600-1750 kg /m<sup>3</sup> lightweight concrete mixes are used. The use of load-bearing lightweight concrete is preferred in buildings because they reduce the total cost of the building. Although the unit volume price of lightweight concrete is higher than the unit volume price of normal concrete, it is more affordable because the dead loads in the building are reduced.

### **Raw Perlite in Concrete Tile**

The process in the production of raw perlite added tiles is as follows; raw perlite (0.5-1.5 mm) is mixed with cement and water at a ratio of 2:1, after pouring into molds. Then it is subjected to curing at 40-50 ° C for 8-9 hours.

M.E.T.U Civil Engineering Department Rotation-dissolution strength studies were carried out in the Materials Division. Contrary to expectations, there is no difference in breaking loads under the effect of bending between -25 and +36 ° C. No decrease was observed, strangely by 26% and 33% respectively increase was observed. In the last tests carried out at -40 ° C, the increase in strength increased to 35%. Due to its high thermal insulation properties, perlite tile is ideal for regions with very hot and very cold climates.

### **Perlite in Aerated Concrete and Pumice Block Production**

As defined in TS 825, dry unit weights can change from 600 kg/m<sup>3</sup> to 1200 kg /m<sup>3</sup>. Perlite, sand, and cement trio can mix in a suitable environment if want to produce ultra-light panels. Unit volume weight can reduce to 300 kg/m<sup>3</sup>. This mix ratio by volume can be one scale perlite, eight scales others. Fiber, gypsum, sodium silicate, or asphalt when using connectors such as eight scales perlite by volume, one scale as high as any can be.

### **Raw Perlite Aggregate Usability in Asphalt Mixtures**

At METU Civil Engineering Department, some laboratory experiments were carried out about the use of raw perlite as aggregate in asphalt mixtures to explore the possibilities. For this purpose, experiments determinations were made in different ratios (100%, 46%) perlite basalt aggregate prepared by mixing the stability, yield, bulk density, and maximum theoretical density. Stability values of mixtures made with perlite aggregate were found higher than stability values of admixtures made with basalt aggregate. The admixture made with 100% perlite has a higher stability value than the 94% mixture of basalt aggregate. 46% perlite-added mixture stability was 30% higher.

### **Perlite as a Pozzolanic Additive**

As a result of the literature review, perlite can use as pozzolanic material. Compared to the fly ash, blast furnace slag, silica fume, and volcanic ashes, perlite minerals could show that compressive strengths are similar when producing concrete with these pozzolanic materials.

In another study, usability-testing of raw perlite by grinding it together with gypsum and clinker. Perlite is ground together with Portland cement clinker and gypsum in certain proportions by weight. Perlite added cement was obtained. Dough prepared with this cement and various physical and mechanical features has been determined. Perlite compared both each other and samples that do not contain perlite in terms of their performances in cement and mortars. According to the strength results obtained raw perlite can use from 5% to 25% for cement, concrete, and mortar production.

### **Production and Expansion of Perlite**

Raw perlite; It is converted into expanded perlite after crushing, grinding, and classification stages. When the raw perlite is crushed next to the furnace and brought to the required grain size, it provides an economic profit. The properties to be considered while preparing perlite are:

- Make raw perlite as cubic pieces as possible.
- Bringing the perlite to the required grain size without damaging, breaking, and making it very fine.

The expansion stages of raw perlite can be listed as follows; To get rid of the water in the ground raw perlite, is cooked at 400 degrees and made ready for blasting. In this case, perlite starts to explode in a very short time. When it reaches a temperature varying between 700-1200 ° C, the water suddenly evaporates and the volume of perlite increases 30 times. It gives perlite a slightly porous and glassy structure (D.P.T, 2001).

### **Reserves of Perlite**

Perlite reserves in the world are available in regions within the volcanic belt. The information that the visible reserve was 700 million tons in 2009 is available in the reports of the U.S Geological Survey. However, it was observed that there were changes in the 2021 reserves in the reports of this organization. The reserve situation of the United States seems unchanged, but it appears that the reserves of other regions have changed.

Table 5 shows the reserve amounts for 2009 and 2021 (U.S. Geological Survey, 2009), (U.S. Geological Survey, 2019).

**Table 5** Perlite reserves comparison

	2009 Reserves	2009 Reserve Base	2020 Reserves
United States	50,000	200,000	50,000
Greece	50,000	300,000	120,000
Hungary	3,000	Included with "Other countries."	49,000
Mexico	Included with "Other countries."	Included with "Other countries."	NA
Turkey	Included with "Other countries."	5,700,000	5,700
Other Countries	600,000	1,500,000	NA
World Total	700,000	7,700,000	NA

Considering the data in the table, the visible reserve in the world is 700 million tons and the total visible and probable reserve is 7700 million tons in 2009. This situation is different according to the data of 2021. Total reserve is shown as "none" in 2021 data. Considering the data in the table, the visible reserve in the world is 700 million tons and the total visible and probable reserve is 7700 million tons in 2009. This situation is different according to the data of 2021. Total reserve is shown as "none" in 2021 data. As can be seen from Table 5, the reserves of Greece and Hungary have changed over the years. It is observed that the reserves of the USA have not changed over the years.

According to the data in 2020, Turkey has got 74% of the world's perlite reserves with 5.700 million tons. (U.S. Geological Survey, 2009), (U.S. Geological Survey, 2019).

### Production and Consumption of Perlite

Perlite production in the world has increased from 2008 to 2020. The average perlite production in 2008 was 1.8 million tons. As a result of China's participation in production in 2014, this figure was 3.46 million tons in 2019. An estimated perlite production in 2020 is 3.4 million tons. Perlite production rates are predicted in this way for 2020, with China 38%, Turkey 21%, Greece 19%, and America 15%. The production amount in 2008 and 2020 is given in table 6 and the increase in perlite production in Turkey is noteworthy.

**Table 6** Perlite productions in 2008 and 2020

Countries	2008	2020
United States	450	520
Greece	500	700
Hungary	70	70
Japan	240	NA
Mexico	45	20
Turkey	270	640
China	NA	1300
Other Countries	200	185
Total	1770	3400

Although China seems to have the largest production, Turkey and Greece share first place in terms of exports. The reason for this is that China consumes what it produces within itself.

Perlite sales in the USA in 2018 were 37 million dollars and its usage was 510 thousand tons. The use of expanded perlite is mostly associated with the construction sector with 58%. These data were obtained according to the U.S Geological survey reports. It is understood from here that perlite is an important material that is widely used in the mine construction industry.

## Perlite Industry in Turkey

Looking at the map of perlite reserves of MTA, there is a reserve distribution in almost every region of the country where consumer perlite can easily be reached. Domestic perlite consumption rates are revealed in a study conducted by Turkey IGEMA. According to the results of the research, 60% of domestic consumption is used in the construction sector, 17% in agriculture, 20% in industry, and 3% in other sectors. Figure 3 shows the perlite reserve distribution of turkey.



**Figure 3** Perlite reserve regions in Turkey

Perlite export of Turkey increased from 3.3 million USD in 2000 to 25.7 million USD in 2014. Table 7 showing the perlite export of Turkey is given below (Türkiye Madenciler Derneği).

**Table 7** Perlite export of Turkey

Year	Thousand Tons	Million Dollar
2009	257	11,5
2010	333	15,8
2011	317	17,6
2012	388	21,5
2013	388	22,5
2014	423	25,7

In Turkey, which is in an earthquake zone, perlite is not given the necessary importance and is not used enough in the construction sector. Perlite is mostly used in modern construction technologies and first-class buildings. For this reason, its use is not widespread. Perlite provides sound insulation and provides 17% iron savings in construction. Perlite is significant because it is abundant in our country. In addition, all countries of the world take fast measures on sustainability and it is very substantial to use perlite material as a sustainable material in the construction sector. It is necessary to increase its use in our country and to carry out the compulsorily experimental studies. (T.C Kalkınma Bakanlığı, 2018).

## CONCLUSION AND RECOMMENDATION

Perlite reserves are mostly found in Turkey in the world. 74% of the reserves are in the territory of Turkey. In the production of perlite, our production rate in the world corresponds to 21%. 65% of perlite is used in the construction industry. According to the results of the experimental studies, it can be used as a perlite plaster material; it is also suitable for use in construction as insulation material and as a filling material. Usage rate between 12-16% is appropriate and gives better performance than silica amount of silica fume additive. Since silica fume is difficult and expensive to reach, perlite additive can be used instead of silica fume. Considering the reserve status of Turkey, necessary studies should be done and serious attention should be paid to perlite as it can provide a great advantage to the construction industry.



## REFERENCES

- Duaij, J. A. A., El-Laithy K., and Payappilly R. J., "A value engineering approach to determine quality lightweight concrete aggregate", *Cost Engineering*, 39, 21-26, 1997.
- D.P.T., "Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza, Perlit, Vermikülit, Flogopit, Genleşen Killer)", Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı, DPT: 2617 - ÖİK: 628, Ankara, 2001.
- Azizi, S., "Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya mühendisliği Anabilim Dalı, 2007.
- M.T.A., "Türkiye Perlit Envanteri", Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, 193, s. 1-8, Ankara, 1985.
- Turanlı, L., Bektaş, F., Monteiro, P, J, M., "Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction", *Cement and Concrete Research* V.35, 2004, pp. 2014-2017.
- Turanlı, L., Okuyucu, D., Uzal, B., Tankut, T., "Some characteristics of fibre- reinforced semi lightweight concrete with unexpanded perlite", *Institution of Civil Engineers* V.63, 2011, pp. 837-846.
- Mehta, P., K., Turanlı, L., Uzal, B., "High-Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications", *ACI Material Journal*, V. 104, 2007, pp. 535-538.
- U.S. Geological Survey, "Mineral Commodity Summaries 2009", Virginia, U.S.A., January 2009.
- U.S. Geological Survey, "Mineral Commodity Summaries 2019", Virginia, U.S.A., January 2021.
- Türkiye Madenciler Derneği, "Sektörden Haberler [online]", İstanbul, [https://www.tmdr.org.tr/modules/faq/datafiles/FILE\\_8F6E75-89DEEA-C46041-9C05D6-133C62-0074D1.pdf](https://www.tmdr.org.tr/modules/faq/datafiles/FILE_8F6E75-89DEEA-C46041-9C05D6-133C62-0074D1.pdf)
- T.C Kalkınma Bakanlığı, "On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023) Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu", KB: 3041 - ÖİK: 822, Ankara, 2018.
- Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M., S., Alhems, L., M., Suhooti, A., C., M., "Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Expanded Perlite Aggregate" *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2020, pp. 1-15.

**Geleneksel Sistemlerden Sürdürülebilir Akıllı Sistemlere Geçişte Model Önerisi**

**Model Proposal for the Transition from Traditional Systems to Sustainable Smart Systems**

M. Batuhan ZEYBEK, Leyla Y. TOKMAN

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Eskişehir

<sup>2</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Bina Bilgisi Anabilim Dalı, Eskişehir

Doi: 10.51764/smutgd.996063

Geliş Tarihi : 16.09.2021

Kabul Tarihi : 10.11.2021

**ÖZET**

İnsanlığın günden güne değişen yaşam şartları, yeni talepleri meydana getirmektedir. Bu talepleri karşılayabilmek adına doğal kaynakların aşırı şekilde kullanılmaya çalışılması hem bu kaynakları hem de doğayı her geçen gün artan bir baskı ile karşı karşıya bırakmıştır. Doğada bulunan kaynakların azalmasının etkileri çeşitli durumlarla (ozon tabakasının incelmeye, ekolojik değişimler, türlerin yok olması vb.) insanlığın karşısına çıkmakta ve insanlığı tehdit etmektedir. Bu durumun altyapısını hazırlayan belli başlı nedenler bulunmaktadır. Bu nedenlerden birisi de hiç şüphesiz yapımcı faaliyetlerinin yer aldığı inşaat sektörüdür. İnşaat sektörü çok farklı parametreleri olan çok boyutlu ve farklı beklentileri bünyesinde barındırabilen bir sektördür. Teknolojinin gelişmesi ve yaşam kalite standartlarının yükselmesi inşaat sektörüne büyük bir ivme kazandırmıştır. Sayıları hızla artan konutların paralelinde kaynak kullanımı da hızla artmıştır. Bu noktada konutlarda beklentilerde artan ekolojik sorunlar nedeniyle değişmekte ve mevcut konut stoklarının da bu değişimlere katılması beklenmektedir. Artan ekolojik sorunlar karşısında yapıların tasarım aşamasından, uygulama aşamasına hatta bakım- onarım- yıkım aşamasına kadar çevresine duyarlı verimi yüksek ve sürdürülebilir parametrelere sahip binalar olması gerekmektedir. Tam bu noktada çalışmanın hedefi çevreye etkisi yüksek, bulunduğu yere ve döneme cevap veremeyen ve verimi düşük konut stoklarının, dünyadan örnekler incelenerek ve yabancı kaynaklar taranarak, elde edilen veriler doğrultusunda hazırlanan "Akıllı Model Önerisi" ile büyük bir ekonomik yük gerektirmeden ve bu yapı stoklarının yıkılmadan, çevreye duyarlı, bulunduğu çağın teknolojisini kullanabilen, verimi yüksek sürdürülebilir niteliklere sahip olabilecek binalara dönüştürülmesini amaçlayan bir yaklaşımı ortaya koymaktır.

**Anahtar Kelimeler:** süreç yönetimi, mevcut yapı stoğu, akıllı sistemler, konutta teknoloji, yaşam kalitesinin yükseltilmesi, sürdürülebilir mimari tasarım.

**ABSTRACT**

The changing living conditions of humanity day by day create new demands. In order to meet these demands, the excessive use of natural resources has left both these resources and nature face to face with increasing pressure. The effects of the decrease in the resources in nature confront humanity with various situations (thinning of the ozone layer, ecological changes, extinction of species, etc.) and threaten humanity. There are certain reasons that prepare the infrastructure of this situation. One of these reasons is undoubtedly the construction sector, where construction activities take place. The construction industry is a multidimensional industry with very different parameters and can accommodate different expectations. The development of technology and the rise in life quality standards have given a great impetus to the construction industry. In parallel with the rapidly increasing number of residences, the use of resources has increased rapidly. At this point, expectations in housing are changing due to increasing ecological problems and existing housing stocks are expected to participate in these changes. In the face of increasing ecological problems, the buildings should be environmentally friendly, efficient and sustainable buildings from the design phase to the implementation phase and even to the maintenance-repair demolition phase. At this point, the aim of the study is to analyze the housing stocks with high environmental impact, unable to respond to the location and period and low efficiency, by examining examples from the world and scanning foreign sources, with the "Model Proposal" prepared in line with the data obtained, without requiring a great economic burden and in order to reduce these building stocks. To put forward an approach that aims to transform it into buildings that are environmentally friendly, that can use the technology of the era, and that can have high efficiency and sustainable qualities without being demolished.

**Keywords:** process management, existing building stock, smart systems, technology in housing, raising the quality of life, sustainable architectural design

Murat Batuhan ZEYBEK, Orcid: 0000-0002-5275-7780, mbatuhanzeybek@gmail.com

Leyla Y. TOKMAN, Orcid: 0000-0002-8293-0871 lytokman@eskisehir.edu.tr

## GİRİŞ

Çalışmanın ana konusu olan ve günümüzde sorgulanan-araştırılan ve hiç şüphesiz yakın gelecekte mimarlık disiplinin merkezinde yer alacak olan “Geleneksel Sistemlerden Sürdürülebilir Akıllı Sistemlere Geçiş Süreci ve Bu Sürecin Yönetilmesi” konusudur.

Bu konunun önemi, son yıllarda ülkemizde yaşanan sosyo-ekonomik değişimlerle birlikte, hızlı nüfus artışı, değişen ve gelişen dönemsel şartlar, temel ihtiyaçların karşılanma zorunluluğu, kırsal bölgelerden kentlere yaşanan göçler vb. birçok sebep nedeniyle kentlerde planlı/plansız birçok yapı inşa edilmiştir. Bu yapılar son yıllarda konut sektörüne yapılan yatırımlar, devlet tarafından verilen teşvikler başlangıçta toplumda ihtiyaç olan konutlar için önemli olsa da son yıllarda bu gelişmeler ihtiyacın ötesine geçerek yapı stoklarını oluşturmaya başlamış ve bu stoklarda yerleşim alanlarında mekânsal kalitenin azalmasına önayak olmuştur. Öyle ki T.C Kalkınma Bakanlığı'nın “On Birinci Kalkınma Planı'nda” yer verdiği bilgilere göre (TÜİK, 2017):

**Tablo 1.** Yapı Kullanma İzin Belgesi Alınan Binalar

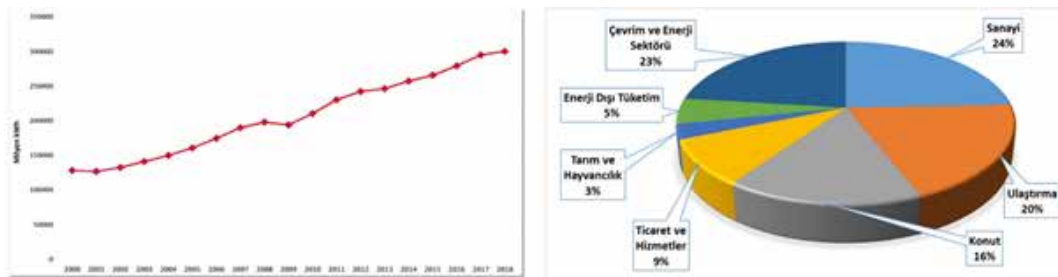
2002 Yılı	2017 Yılı
161.491 adet	820.526 adet

**Tablo 2.** Toplam Daire Sayısının Yüzölçümü (m<sup>2</sup>)

2002 Yılı	2017 Yılı
31.676.425 m <sup>2</sup>	161.119.235 m <sup>2</sup>

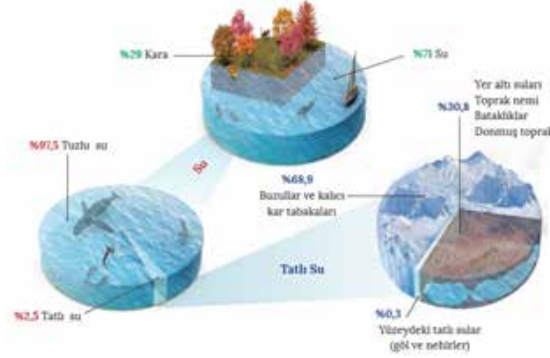
Tüm bu inşai faaliyetlere rağmen Türkiye’ de 2020 yılında sadece 42 yapı LEED sertifikası alabilmiştir (GBIG,2020).

Bu veriler göstermektedir ki ülkemiz, yapım sektöründe ki gelişmelerden payını alarak hızlı bir inşai faaliyet süreci içerisine girmiştir. Bu durum beraberinde bazı olumsuzlukları da beraberinde getirmiştir. Artan inşai faaliyetler paralelinde yapıların büyük çoğunluğunun sadece tüketim odaklı işlemesi, doğayı ve yapıların kullandığı doğal kaynakları tüketmeye başlamasına neden olmuştur. Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) raporlarına göre inşaat sektörü toplam enerji kullanımının %25-45’ini, su kullanımının %50’sini ve katı atık üretiminin %30-40’ünün oluşmasına neden olduğunu açıklamıştır (Dixon, 2010). Bu veriler çevreye duyarlı, sürdürülebilir yapıların önemini ortaya koymaktadır.



**Şekil 1.** Enerji Tüketim Oranları (ETKB,2018)

I. Grafik incelendiğinde 2000 yılından 2018 yılına kadar olan süreçte enerji sarfiyatının belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Bu artışın konut payı ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2018 verilerine göre yaklaşık %16 olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum konutların enerjide sarf ettikleri miktarların düşürülmesi gerektiğinin bu durumda öncelikli olarak konut strateji ve politikaları üzerinden olacağını göstergesi niteliindedir. Yapıların doğada yer edinme stratejisini değiştirmesi, yapıların bu kaynakları en doğru şekilde kullanabileceği sistemlerin geliştirilmesi ana hedef olmalıdır. Bu veriler kaynakların korunması ve kaynak kullanımının yarattığı çevresel etki açısından yapı sektörünün hangi aşamada olduğunu göstermektedir. Yapı sektörüne bu noktada düşen görev mevcut stratejisine, sürdürülebilir yapı parametrelerini entegre etmesinden geçmektedir.



Şekil 2. Greenfacts Dünyada Suyun Dağılımı (Tubitak, 2020:2)

Yukarıya yer verilen grafik ise bir diğer doğal kaynak olan suyun dünyada bulunma yüzdelerini göstermektedir. Bu veriler sonucunda dünyada bulunan suyun yaklaşık %2,5'i tatlı su niteliğindedir. Bu %2,5'lik dilimin %68,9'u buzul, %30,8'i yer altı suyu ve %0,3'ü yüzeysel su olarak bulunmaktadır. Bu %0,3 yüzeysel suyun da %67,4'ü göllerde %1,6'sı nehirlerde ve %31'i ise diğer su kapsamında incelenmektedir.

Özellikle dünyada Endüstri Devrimiyle başlayan, yaşadığımız sürece kadar gelişen ve değişen teknolojik gelişmeler, yeni iş kollarının yaratılması, değişen yaşam standartları doğal çevrenin ve doğal kaynakların günden güne artan tüketim eğilimine girmesine neden olmuştur. Tüm bu ekonomik ve sosyal etkilere dünyanın nüfusunun da artması eklenince artan bu tüketim eğilimi ile kaynakların nasıl bir risk taşıdığı yapılan araştırmalar ile gözler önüne serilmektedir.

Bu noktada çalışma içeriğini, sürdürülebilir bina hedefleri ve yapıların doğal çevre üzerindeki baskısını azaltmak için EPA (U.S Environmental Protection Agency, 2012) tarafından hazırlanan:

- Akıllı Sistemler
- Enerji Verimliliği
- Su Verimliliği
- Yapı Malzemesi
- Atık Yönetimi

Parametreleri temel alınarak, internet vb. sanal ortamda ulaşılan veri tabanları, yabancı kaynaklar kullanılarak; süreç yönetimi, mevcut yapı stoğu, akıllı sistemler, konutta teknoloji, yaşam kalitesinin yükseltilmesi, sürdürülebilir mimari tasarım anahtar kelimeleri bağlamında literatür ortamında yapılan araştırmalarla gerek teorik, gerek örneksel analizler yapılmış bu analizler sonucunda, önerilen Model Şeması eki ile makale kurgusu oluşturulmuştur.

## SÜRDÜRÜLEBİLİR GELECEK İÇİN, SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIM

Son yıllarda, çeşitli ölçeklerdeki projelerin çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle sürdürülebilir kalkınma ve yapı uygulamaları büyük önem kazanmıştır. Sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı doğrultusunda, uygulayıcıların sağlıklı, sürdürülebilir yapılar çevre yaratması son derece önemlidir (Çelik, 1994). Sürdürülebilirlik kavramı, ilerleme ve kalkınmanın gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden ödün vermeden bugünün ihtiyacını karşılama gerektiği olarak tanımlanmıştır (Steele, 1997). Bu kavram geniş bir yelpazede ekonomik kalkınma ve tarımdan, insan yerleşimlerinin yönetimine ve bina uygulamalarına kadar çeşitli düzey ve ölçekleri kapsamaktadır. Bu genel tanım sürdürülebilir bina uygulamalarını ve insan yerleşimlerinin yönetimini içerecek şekilde daha da geliştirilmiştir. Sürdürülebilirlik, "sistemi bir bütün olarak görerek, sosyal ve ekolojik sistemler ile alt bağlantılarını koruyarak hem sistemlerin esnekliğini hem de işlevselliğini korumaktadır. Böylelikle ekolojik ve doğa ilgili süreçleri öncelerken içinde bulunduğu toplumun sosyal süreçlerini ve bir şeyi koruma ve sürdürmesi ile ilgili bileşenleri de inceleyebilmektedir (Litting ve Griebler, 2005)." Bu tanımlamadan hareketle sürdürülebilirlik doğal olanın sürdürülmesi, mevcuda yeni bir bakış açısı geliştirmesi, kalkınmanın ne şekilde olması gerektiğini tanımlayan parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametreler 1987 yılında Dünya Çevre Komisyonu'nun yayımladığı "Ortak Geleceğimiz" adlı rapor ve öncesine dayanarak sosyal, ekonomi ve çevresel bileşenlere oturtulmaktadır.



Şekil 3. Sürdürülebilirlik Kavramı Temel Bileşenleri

Tablo 3. Sürdürülebilir Mimarlıkta Güncel Tasarım İlkeleri (Tokman, Çiğın,2019)

ÇEVRESEL	EKONOMİK	TOPLUMSAL
Kaynak tüketimlerinin azaltılması	Ulusların ve nesiller arasındaki eşitliğinin desteklenmesi	İnsan yaşamının niteliğinin artırılması
Her türlü zararlı atık maddenin ve üretimlerinin azaltılması	Bir toplumun zenginliği için bir değerinin yoksullaştırılmaması	Sosyal eşitliğin tüm insanlık için sağlanmasını desteklemek
Atık maddelerinin tümünün geri dönüşümünün sağlanması	Yatırım ve kaynak sağlama politikalarının etik boyutlarının sağlanması	Kültürel ve toplumsal bütünleşmenin sağlanması
Yenilenebilir kaynakların kullanımının artırılması	Fiyatlandırmanın gerçek maliyet üzerinden yapılmasının sağlanması	Toplumlara yetki ve kapasite artırımına olanak verilmesi

Sürdürülebilirliğin çevresel bileşeni doğayı ve doğanın barındırdığı kaynakları temele alan bir bileşendir. Yapısal boyutta doğa ve doğanın barındırdığı kaynaklara saygılı bir yapım sisteminin oluşmasında temel değer olan ekolojik tasarım, ekoloji biliminden yola çıkarak geliştirilmiştir. Ekolojiyi temel alan yaklaşımda amaçlanan, doğa ve insan ilişkisinde, insanın doğa ve doğanın barındırdığı kaynakları verimli bir şekilde kullanarak, çevre üzerinde negatif etkiyi düşürecek yapılar yapılmasıdır. Bu temelde ortaya çıkan ekolojik ve sürdürülebilir mimari kavramlar bu maçı destekleyen düşüncelerdir. Bu noktada Roy, "Ekolojik mimarlık, insan sağlığı ve çevre üzerindeki zararlı etkileri en aza indiren, çevre dostu bina ile hava, su ve insanı korumaya çalışan yeşil bir mimaridir. (Roy,2008)" olarak tanımlamıştır.

Bu amaçla ekoloji ve mimarlık ilişkisinin daha net ortaya konulabilmesi amacıyla Amerika Yeşil Bina Konseyi tarafından beş ekolojik tasarım unsuru oluşturulmuştur (USGBC):

- Sürdürülebilir Alan Tasarımı
- Su Yönetimi ve Su Kalitesi
- Enerji Yönetimi
- İç Mekan Kalitesi
- Malzeme ve Kaynaklar

Bu kavramlar aslında ekolojik tasarımın, ekolojik fonksiyonlar ile yapının entegresinden başladığını göstermektedir. Bu tasarımın amacı yapının ömrü boyunca doğaya entegre olarak doğal olanı korumaya çalışmasından ortaya çıkmakta ve kentsel bağlamda yeni bir yaşam alanı yaratarak biyo çeşitliliği ve ekosistemi desteklemektedir.

### Sürdürülebilir Gelecek İçin Mimari Tasarımın Rolü

İskoçya Devleti, ülkelerinde Mimarlık Politikasını sürdürülebilirlik gündeminin dahil edilebilmesi için binaların kullanım amacı ve doğasıyla bina tasarımının rolüne ilişkin anlayışımız da temel bir değişiklik gerektirdiğini kabul etmiştir (Scottish Executive, 2006).

Son yıllarda sürdürülebilir bina ve mimari üzerine gün geçtikçe sayıları artan dizinler ortaya konmaktadır. Sürdürülebilirliğin ana fikri olarak, mevcut yapı sistemlerinin istenmeyen yönlerini en aza indirebilecek şekilde, çevrenin maksimum içsel özelliklerine sahip tasarlanmış bir ürün elde etmek için çevresel verileri ve koşulları odağına koymaktadır (Grierson, Maltrie, 2011).



Yapılar doğa ile olan yüzleşmesini azaltmak için tasarım aşamasından, uygulama aşamasına kadar çevresine cevap verebilmelidir. Bu nedenle çevresel tasarımında sürdürülebilirliğin amaçları (Ka-mar ve ark., 2010):

- İnsan konforunu en üst düzeye çıkarmak
- Verimli planlama
- Değişim için tasarım
- Doğal değerlerin korunması
- Giderlerin minimize edilmesidir.

Sürdürülebilirlik sadece fiziksel sürdürülebilirliği değil aynı zamanda yer yüzünün ve enerji kaynaklarının sürdürülmesini ve korunmasını da amaçlamıştır. Bu nedenle mimarlıkta sürdürülebilirlik, gelecek için tasarım ve inşaat için hayal gücü anlamına gelmektedir (Zabihi ve ark., 2012).

Sürdürülebilir mimari, teknoloji ve insan hedeflerini içeren iki amacı bütünleştirir. Uluslararası Yapı Konseyi (CIP), sürdürülebilir mimarinin amacını, ekolojik tasarım ve kaynak verimliliğine dayalı, sağlıklı bir çevre yaratma ve yenileme olarak tanımlamıştır. Sürdürülebilir yapı, yapay ve doğal çevre ile uyumsuzluğu en düşük olan yapıdır ve yapının kendisini, çevresini, bölgesel ve küresel çevreyi içerir (Sheramini, 2008).

Genel ve kapsamlı tanımda, sürdürülebilir mimari, çevresel ve yerel koşullara yanıt veren ve bunlarla etkileşime giren bir mimaridir ve arzu edilen çevresel koşulları yaratmak için bağlamsal ekolojik yetenekleri uygulamaya çalışan bir mimaridir; dolayısıyla ekolojik denge, esneklik, uyum, değişim ve ihtiyaçlara sürekliliği yanında ekolojiye en az zarar vermesi anlamına gelir ve yerel niteliklere sahip olmasıyla ayırt edicidir (Zabihi ve ark., 2012).

Genel olarak sürdürülebilir bir binanın özellikleri sosyal, ekonomik, teknik, çevresel gruplarda dört ana hedefle bağlantılıdır. Bu dört hedef finans ile ekonomik tasarrufları arttırmak, çevre üzerindeki etkiyi azaltmak ve çevre ile uyumluluğu arttırmak, sosyal verimlilik ve kullanılabilirlik, kaliteyi artırma ve binayı optimize etmektir. Bu sistem genel olarak sürdürülebilirliği sağlamak için binanın sahip olması gereken özellikleri belirtir ve önerir.

### **Sürdürülebilir Gelecek İçin Mimarın Rolü**

Mimar eğitimli kişidir. Mimarın bir bileşeni doğal sistemleri temel alan ve doğanın ruhuna yeniden bağlama kapasitesine sahip binalar tasarlamaktadır. Bu durum mimarlık dışında başka mesleklerle çalışmayı sağlayan ve grupların katkısını ve desteklerini arayan bir süreci beraberinde getirmektedir. Diğer bir bileşen ise mimarın, sosyal değişim aracı ve doğal sistemler ile ekolojik düşüncenin savunucusu olmayı içerecek bir yapısının olmasıdır. (Cody, 2014).

Tüm bu durumlar 'Topluluk, İyileştirme, Bütünlük, Tamlık ve Yer Arayışı' gibi kavramları yapılara entegre edilmesini sağlayan bir görev sorumluluğunu oluşturur. Bu bileşenleri temel alan mimarlık dili sınırların lüksü ilkesini belirleyerek sadece belli başlı sınırları yerine getiren bir noktadan çıkarak düşüncesini etkileyebilecek tüm sınırların lüksünü yakalayabilecektir. Temel olarak sürekli gelişen bir rolü benimsemek yeni bağlantılar ve farklı süreçler yaratma bu noktada önem kazanacaktır. Mimarın bu yeni dili toplumda genel düşüncüyü geliştirecek sürdürülebilirlik ve tasarım kavramlarını genişletmeye yardımcı olacaktır.

Sürdürülebilirlik kavramı, doğal çevrenin hızla tahrip olmasıyla mimari tasarımın kapsamına girmeye başlamış ve mimarlığın tasarım parametrelerinde yeniden dönüşümü başlatmıştır. Geçmişte yapılan tasarımları temel alarak kavram dünyasını zenginleştirmiş ve teknolojik gelişmeler yardımıyla doğanın, doğanın barındırdığı kaynakların ve enerjinin verimli bir şekilde kullanımını amaç edinmiştir. Sürdürülebilir mimari, yapısal bağlamda genel tasarım kriterlerinin oluşturulmasında, doğal olanın kullanılmasıyla başlar ve doğal çevreye, doğal olanın tekrar kazandırılmasıyla döngüsünü tamamlar (Tokman, Çiğın, 2019). Bununla birlikte yapısal değerler her zaman ve her ortamda yeni kavramlar üretirken bu kavramlar ile negatifliklerin azaltılmasını, deforme olmuş ekolojik sistemin korunmasını iyileştirilmesini ve gelecek nesillere aktarılması için mimarlar çözümler üretmektedir.

## SÜRDÜRÜLEBİLİR GELECEK İÇİN, AKILLI BİNALAR

Doğanın ve doğanın barındırdığı kaynakların bilinçsizce kullanımı doğal dengeye ve doğal çevreye zarar vermektedir. Bu durum karşısında pek çok hizmet sektörü gibi yapı sektörü de yapıların çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak ve yapılarda yenilenebilir kaynaklardan yararlanmak ana hedef olmuştur. Bu hedefi gerçekleştirmek için birçok sektörün temel bileşenini hazırlayan ve yapı sektöründe de birçok parametresine doğrudan veya dolaylı sirayet eden günün teknolojik sistemleri olmuştur.

Teknolojik bağlamda 'akıllı sistemler' dinamik bir ortamda değişen koşullara uyum sağlayarak performansını optimize etmek için birtakım teknolojiler kullanmaktadır. Bu noktada 'akıllı yapı sürdürülebilir mimariye nasıl yardımcı olur?' sorusu sorulabilmektedir.

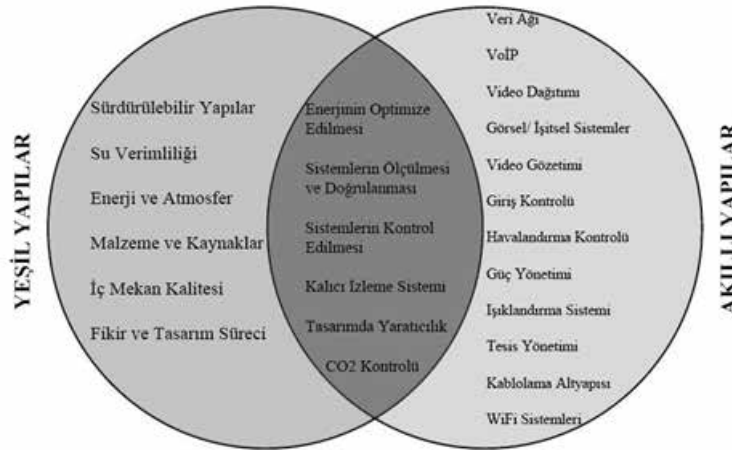
Yeşil ve sürdürülebilir mimari hedefler üç alanda sınırlandırılır (Ahmadi, 2004):

- Çevresel Hedefler: Daha fazla geri dönüştürülebilir malzemeler ile daha kaliteli çevre hedefler.
- Ekonomik Hedefler: Azaltılmış maliyet ve tüketimle, uygun performans ve yüksek verim hedefler.
- Sosyal Hedefler: Çevre ve güvenlik iyileştirilmesi hedeflenir.

Sürdürülebilir mimari hedeflere ulaştıracak bir yapının koşulları ise (Abasalipour, 2008):

- Çevreye etkisi az toksik olmayan malzeme
- Daha az enerji tüketen inşaat süreci
- Daha uzun ömürlü ve daha kaliteli binalar
- Malzeme ve sistemlerin yeniden kullanılabilirliği olarak belirlenmiştir.

Van Der Ryn ve Calthrope (1986) sürdürülebilir toplumlarda sürdürülebilir çevreyi şu şekilde anlatır, 'sürdürülebilir çevre, sakinleri için minimum fiziksel ve psikolojik problemlere neden olur.' Günden güne yapılar çevre genişlemekte ve yeni inşaat yöntemleri keşfedilmektedir. Dolayısıyla inşaat sektörünün büyümesi ile sürdürülebilirliğin üç bileşeni daha çok önem kazanmaktadır.



Şekil 4. Yeşil Bina ve Akıllı Bina İlişkisi (Sinopoli, 2010)

Günümüzde çeşitli fonksiyonlara sahip binaların çok yönlü gereksinimleri karşılmalıdır. Bu gereksinimler örnek olarak daha az çevresel etki, web ağlarına erişim vb. sayılabilmektedir. Bu noktada bina kalitesi, yaşam kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir. Özellikle inşaat sektörü bu seviyeye ulaşabilmek adına kaynakların büyük bölümünü kullanabilmekte ve bunu akabinde büyük miktarda atık ve kirlilik üretebilmektedir. ITU, ISO, LEC vb. standartları enerjinin verimli kullanımını, ekolojik reformları desteklemek amacıyla çevresel performans ve gaz değerlendirilmesine ilişkin standartlar dahil olmak üzere tüm dünyada akıllı binaları teşvik etmektedir (Ghorbanzadeh, Nezami, 2010). Tasarımcılar, mimarlar, mühendisler, endüstri sahipleri, kamu otoriteleri bu standartlar üzerine akıllı bina geliştirmeyi sağlar.

Bu uluslararası standartlar, binalarda salt güvenlik gerekliliklerini ve yüksek kaliteyi sağlamakla kalmayıp, inşaatla yeni teknolojilerin geliştirilmesine akıllı sürdürülebilir binaların önünün açılmasına olanak tanır (Farhoodi, 2008).

Genel olarak akıllı binalar ekonomik, sosyal ve çevresel anlamda insan yardımcı olacak şekilde tasarlanmaktadır. Dolayısıyla hem yapının inşası ve kullanımı sırasında hem de işlevselliğinin sona ermesi sırasında sürdürülebilirlik kavramına yardımcı oldukları için sürdürülebilir tasarıma ulaşma araçlarıdır.

Akıllı sistemler ile sürdürülebilir binalar temelde (Ghorbanzadeh, Nezami, 2010):

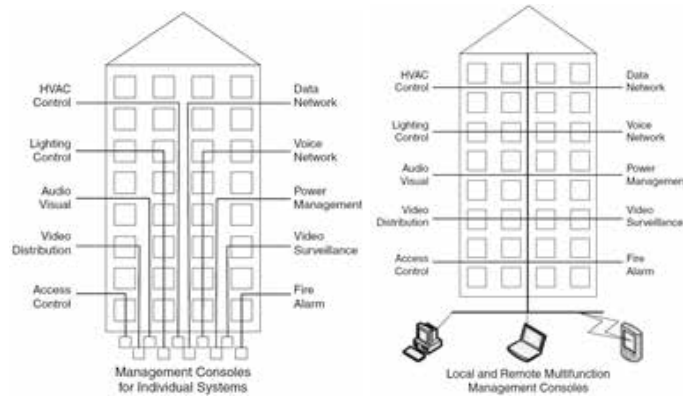
- Doğal süreç ve sistemlerden barındırdığı teknoloji ile tek aşamalı tasarım ve inşaat yerine sürekli uyarlamayı temsil ederek sürdürülebilirlik gereksinimlerini sağlar.
- Akıllı yapı barındırdığı otomasyon sistemleri ile yeniden inşa ve bakımda sürdürülebilirlik yönlerine yardımcı olabilmektedir.
- Akıllı yapı konsepti, mimarın çeşitli kullanımlar için esnek alanlar sağlamasına yardımcı olur.

Bu noktada yeniden inşa edilebilme, değiştirilebilme ile akıllı yapıyı aktif ve kalıcı olmayan, mimaride yer alan birçok uyumsuzluk problemini çözebilen bir yapı haline almaya yardımcı olmaktadır.

Tüm bu veriler akıllı binaların, yaşam koşullarının ve çevresinin iyileştirilmesi ve nihayetinde doğanın, insan yaşamında daha önemli bir rol almasını ve yapıların talep düzeyinin değişmesi için en önemli çözüm haline gelmesi bakımından önem kazanmaktadır.

Akıllı binalar sadece teknoloji veya teknolojik gelişmeleri kurmak veya işletmekle ilgili değildir. Binalarda ki teknoloji ve sistemler basitçe kolaylaştırıcıdır, amaca yönelik bir araçtır. Teknoloji, binayı daha verimli çalıştırmamızı sağlamaktadır. Bu şekilde, binaları daha verimli inşa etmemizi, bina sakinlerine ve ziyaretçilerine verimli ve sağlıklı alanlar sağlamak, enerji verimi yüksek ve sürdürülebilir yapılar tasarlamak ve geliştirmek, teknoloji kullanımının amacını oluşturmaktadır. Bu noktada akıllı bir bina, gelişmiş entegre bina sistemlerinin kurulumunu ve kullanımını içermektedir. Bu sistemler, bina otomasyonunu, can güvenliği, kullanıcı sistemlerini, telekomünikasyonu ve tesis yönetim sistemlerini içerir. Bu şekilde akıllı binalar, bina sahibi veya sahibinin binayı veya alanı yönetmesine izin vermek için bir bina içindeki alanı eyleme geçirilebilecek bilgiler sağlamaktadır.

Bir bina tasarlamının ve inşa etmenin geleneksel yolu her sistemi ayrı ayrı tasarlamak, kurmak ve işletmektir. Akıllı bina, sistemleri tasarlamak içinse farklı bir yaklaşım benimsenir. Bu yaklaşımda mimarlar tüm binanın tasarımını koordine eder. Sistem tasarımında kablolama, ekipman odaları, sistem veri tabanları ve iletişim protokolleri yer alır. Bu kavramlar ana sistemle birleştirilerek sistemin işletilmesi sağlanır. Bu süreç, tasarımın ve yapım sürecindeki verimsizlikleri azaltarak zamandan ve ekonomiden tasarruf sağlamaktadır.



**Şekil 5.** Sol Panel Geleneksel Sistem / Sağ Panel Akıllı Sistemin Yapısal Kullanımı (Sinopoli, 2010)

Akıllı otomasyon sistemlerin mimari tasarımdaki etkisi; son yıllarda endüstrileşmenin ve nüfus artışının büyük hız kazanmasıyla ve artan bilinçsiz tüketim ile birlikte kaynakların azalması hatta tükenme noktasına gelmesine neden olmuştur. Bu durum küresel bağlamda yaşanan enerji kriziyle birlikte yapı sektöründe enerjinin ve kaynakların verimli kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Günümüz teknolojisi yapı sektörüne entegre olarak yapının tasarım kriterlerini değiştirmiş ve öncelik teknolojik altyapıyla kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymuş ve yeni tasarım ilkelerine bir zemin oluşturmuştur.

## SÜRDÜRÜLEBİLİR GELECEK İÇİN, GEÇİŞ SÜRECİNİN YÖNETİMİ

Son yıllarda inşaat teknolojisinin gelişmesi ve hızlı yapım tekniklerine geçilmesi ile tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de inşaatla ilgili faaliyetler hız kazanmıştır. Yapım sürecinin kısaltması ile ülkemizde artan konut talebine yanıt verebilmek amacıyla çeşitli devlet destekleri ile kısa sürede yapım işleri kentlerin yapısını değiştirmiş ve ülke ekonomisinde önemli yer edinmiştir.

Bu noktada yapım işlerinde kazanılan ivmenin ekonomi ve zaman parametreleri yapıların tasarım hususlarında bazı sorunları beraberinde getirmiştir. Talebi karşılayabilmek adına yapılan genellikle barınma, çalışma vb. işlevleri taşıyan bu yapılar, belli bir noktadan sonra talebin çok üstüne çıkarak yapı stokları oluşturmaya başlamıştır. Özellikle kentlerin planlaması yapılan bölgelerde uygun alanların azalması, yeni yapılacak yapıların yapılaşmaya açılan kırsal alanlara ait tarım, orman vb. kullanım amaçlı arazilere yönlendirilmiş ve şehirler yapım hizmetinin bu hızına yetişemeyerek kontrolsüz bir büyüme riskiyle karşı karşıya kalmıştır.

Bu ivme yapıların bağlamından kopuk tasarımlarına kentlerin doğal kaynaklara doğru kontrolsüz sayılabilecek büyümesiyle birleşince doğal çevre ve barındırdığı kaynaklar için bazı olumsuz durumları beraberinde getirmiştir. Bu durum karşısında yapıların doğal çevreye olan negatif etkilerini azaltmak amacıyla mevcut konut stoklarının iyileştirilerek hem değerlendirilmesi hem de çevre üzerinde baskısının azaltılması amaçlanmalıdır.

Çalışmanın bu noktasında dünyadan konu ile ilgili örneklerin incelenmesi sonucunda ortaya çıkan parametreler doğrultusunda mevcut konut stoklarında yapılabilecek iyileştirmelerle ilgili neler yapılabileceğine çalışmada yer verilmiştir.

### Geçiş Süreci İçin Önerilen, Akıllı Model

Hazırlanan Akıllı Modelde, ilk bölümde değinilen ve Amerika Yeşil Bina Konseyi'nin (USGBC) belirlediği ana başlıklar (EPA, 2012):

- Enerji Yönetimi
- Su Yönetimi
- Malzeme Yönetimi
- Hava- Biyoçevre ve Atık Yönetimi

Üst başlıkları ile mevcut konut stoklarının çevresel etkisinin ve doğal kaynakları kullanma yetisinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

### Enerji Yönetimi Şeması

Hazırlanan Akıllı Modelde, enerji yönetiminde yapıda kaynak alternatifini yaratarak doğa dostu yenilenebilir sistemlerin yapıya entegre edilmesini sağlamaya çalışmaktadır. Özellikle Güneş Enerji Sistemleri teknolojisinin son dönemde bütünleşik yapı tasarımına çeşitli şekillerde (cephe malzemesi, sundurmada, çatılarda, balkon duvarlarında vb.) katılmasıyla yapıda istenen enerjinin büyük bir miktarının karşılanmasında alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca Güneş Enerji Sistemleri teknik ekipmanlarıyla mevcut konut sistemine entegre edilebilmektedir. Diğer bir alternatif enerji kaynağı ise ısı pompalarının bir türü olan Toprak Kaynaklı Isı Pompalarıdır. Toprağın yıl içinde sıcaklık değişimlerinin -toprağın yapısına bağlı olarak- az olmasından (Ekberli, Gülser, 2016) yararlanılarak yapıda düşey ve yatay sistemde kurulabilen ısı pompaları ile mevcut konut stoklarında enerji için alternatif kaynak oluşturabilecektir.

### Su Yönetimi Şeması

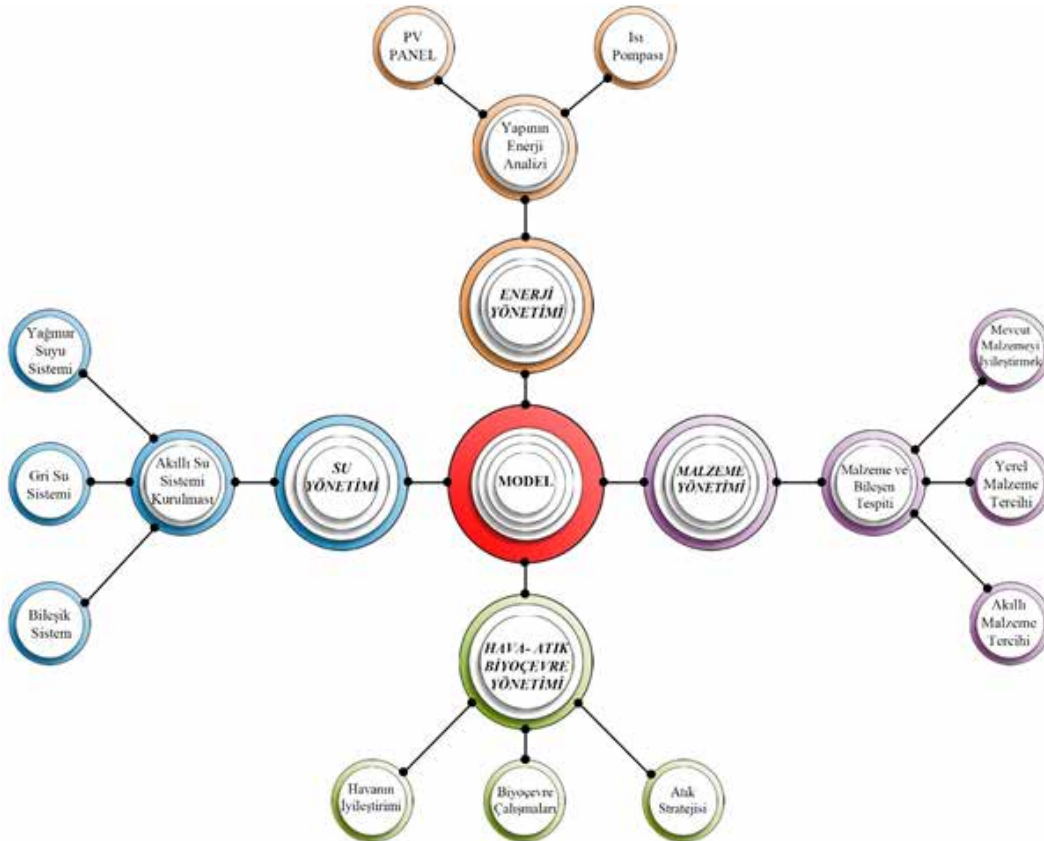
Hazırlanan Akıllı Modelde, özellikle son dönemde dünya genelinde ülkeler üzerinde artan su stresi ülkemizde de belirgin şekilde hissedilmektedir. Birleşmiş Milletler Dünya Su Geliştirme Konseyi (WWDR, 2020) verilerinde ülkemiz yüksek riskli kategorilerde gösterilmiştir. Bu denli önemli bir hususta su kullanım oranlarında konut sektörü önemli bir paya sahiptir. Şema da önerilen modelde konut stoklarında yapılan yağmur suyu ve gri su sistemleri entegre edilerek su kullanımının büyük bir kısmının kazanılarak yeniden kullanılmasını sağlayarak su verimliliğini arttırmaya çalışmaktadır. Özellikle Yağmur Suyu ve Gri Su Sistemi birlikte kullanılması ile su verimliliği %94' ulaştığı belirlenmiştir (Li ve ark., 2010).

## Hava- Atık ve Biyoçevre Yönetimi Şeması

Hazırlanan Akıllı Modelde, yer verilen bu başlık altında mevcut yapıların, çevreye vermiş olduğu etkilerin Yeşil Çatı, Yeşil Cephe vb. uygulamalar ile iyileştirilmesini benzer şekilde iç mekanlarda plastik esaslı malzemeler yerine Yeşil Bölme Elemanları ile yaşam kalitesini arttırmayı amaçlamaktadır. Bu başlık altında mevcut yapılarda Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın belirlediği Atık Stratejisi Yönergesi ile atıkların ayrıştırılmasını ve belirlenen atıkların kentsel bağlamda gübre vb. şekillerde kullanılmasını amaçlamaktadır.

## Malzeme Yönetimi Şeması

Hazırlanan Akıllı Modelde, özellikle yaşam alanlarımızın iyileştirilmesi, kullanılan malzemelerin içeriklerine göre kullanıcı sağlığına etkisinin belirlenerek gerekirse Doğal Malzemelerle değiştirilmesini amaçlar. Ayrıca yapı bileşenlerinde Yerel Malzemeyi önceleyerek sürdürülebilirliğe ve bölge kültürüne katkı sağlamaya çalışmaktadır.



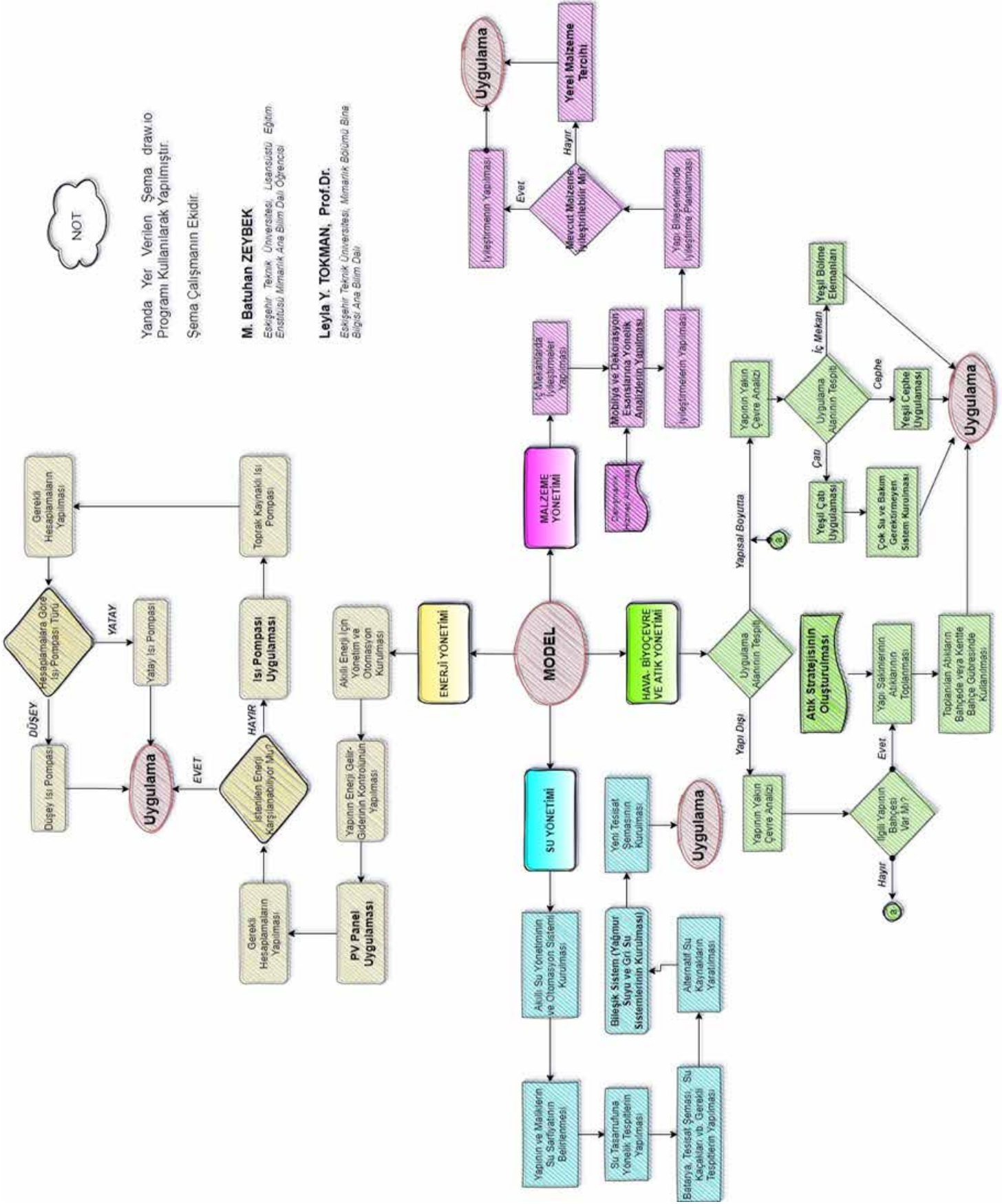
Şekil 6. Geçiş Sürecinde Önerilen Akıllı Modelin Genel Strüktürü

Hazırlanan Akıllı Modelde, günümüzde sayıları hızla artan konut yapılarının günümüz teknolojisinin yardımıyla yapılara entegre edilerek yapıların sürdürülebilir nitelik kazanmasına yardımcı olmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu yapıların 'yıkılmadan', şehirleri şantiye alanları haline getirmeden ve büyük ekonomik fonlar gerektirmeden istenilen üst başlıklarda neler yapılabileceğini göstermesi bakımından önem kazanmaktadır.

Şekil 6'da ise üst başlıkları verilen Akıllı Model alt bileşenlere açılması yer almaktadır. Bu sayede Akıllı Model üst başlıklardan alt bileşenlere ayrılarak mevcut konut stoğunda seçilen üst başlığın alt bileşenlerinde iyileştirmelerin adım adım hangi aşamalardan geçmesini gerektiğini belirtmektedir.



Şekil 7. Önerilen Akıllı Model Diyagramı



NOT

Yanda Yer Verilen Şema draw.io Programı Kullanılarak Yapılmıştır.

Şema Çalışmanın Ekidir.

**M. Batuhan ZEYBEK**

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı Öğrencisi

**Leyla Y. TOKMAN, Prof.Dr.**

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü Bina Bilgisi Ana Bilim Dalı

Hazırlanan Akıllı Modelde yer alan model ile birlikte bu yapıların çevreye olan etkilerinin azaltılması, günümüz teknolojisini kullanarak esnek bir yapı kazanmasını, doğa ve doğanın barındırdığı kaynakları verimli kullanarak çevresel etkiyi azaltan, özellikle konut stoklarının doğaya kazandırılırken yıkılmadan gerçekleşmesi ve bunun akabinde şehirlere ek atık yükü getirmeden kazandırılması sistemin önemli getirileri olarak gösterilebilmektedir.

Sonuçta kısa vadede konutların iyileştirildiği, uzun vadede iyileşen konutlarla birlikte kentlerin iyileştiği ve sürdürülebilir nitelik kazanması, Hazırlanan Akıllı Modelin ana hedefini oluşturmaktadır. Yapıların çevresel etkisinin azaltılarak doğaya kazandırılması kaynakların korunmasında ve sonraki nesillere aktarılmasında son derece önemlidir.

## **SÜRDÜRÜLEBİLİR GELECEK İÇİN, MOR ÖRNEĞİ**

MOR (Modular Office Renovation), Delft TU çatısı altında yer alan ekibin mevcut bir yapıya sürdürülebilirlik parametreleri doğrultusunda yapmış olduğu müdahalelerin anlatıldığı uluslararası yarışma projesi için hazırlanan çalışmasıdır.

Bu çalışmanın örnek olarak verilmesindeki amaç; Hollanda'nın Rotterdam kentinde bulunan ofis binası olarak kullanılan Europoint Tower'ın herhangi bir ofis katından alınan bağımsız bölümünün 1/1 ölçekte, mevcutta bulunan yapıyla aynı malzemeler kullanılarak inşa edilmesi ve inşa edilen bu modülün belirlenen başlıklarda (enerji, hava, su, malzeme, biyoçevre) iyileştirilerek doğaya kazandırılmasında öncü örneği teşkil etmesinden dolayı seçilmiştir.

Bu bağlamda mevcut yapıya yapılan müdahale de alınan kavramlar beş başlıkta incelenmiştir. Bu kavramlar; enerji, hava, su, malzeme ve çevredir. Bu parametreler doğrultusunda çalışma mevcut bir ikonik yapı ele alınarak hazırlanmış ve yapının bölgenin ihtiyacına cevap verecek şekilde renovasyonu hazırlanmaya çalışılmıştır.

MOR, "Bir kavram pratikte uygulanabilirliğini kanıtlanma şansını ne sıklıkta elde eder?" sorusunun karşılığını bulmak için bir çalışma başlatmıştır. Bu çalışmada, MOR' un prototipi, Rotterdam Europoint Tower yapısının herhangi bir katından modüler bir ofis yapısının birebir ölçekte alınıp ekibin kendi proje alanında sürdürülebilirlik parametrelerinin bina fiziği ve enerji ilişkisini incelemek amacıyla inşa edilip daha sonra bu inşa edilen prototip üzerinden test etmesi ve verileri değerlendirip analiz etmesine dayanmaktadır.



**Şekil 8.** Rotterdam Europoint Towers ve Prototipi (MOR, 2018)

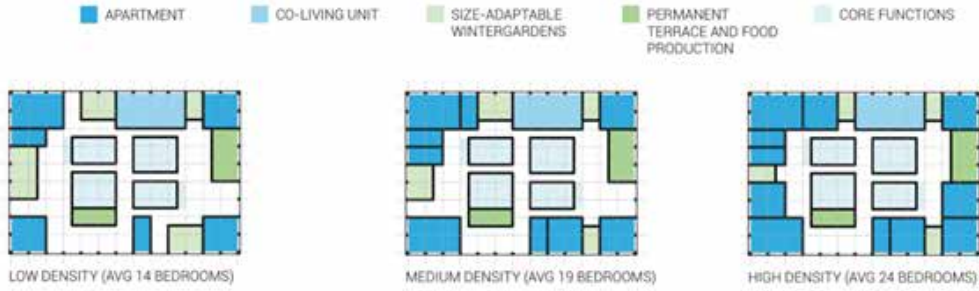
### **Çalışma Konsepti**

Çalışma, "Binalar en büyük kaynak tüketicilerinden biridir. Bunun farklı olması gerektiğini düşünüyoruz (MOR, 2018)." tanımlamasından yola çıkılmıştır. Çalışmada gelecek nesiller için, çevreye gerekenden fazlasını veren, geleceğe hazır bir yapıyı çevre sunan yapının tüketici olmasından ziyade olumlu katkılar sağlayan birimler olması gerektiği belirtilir.



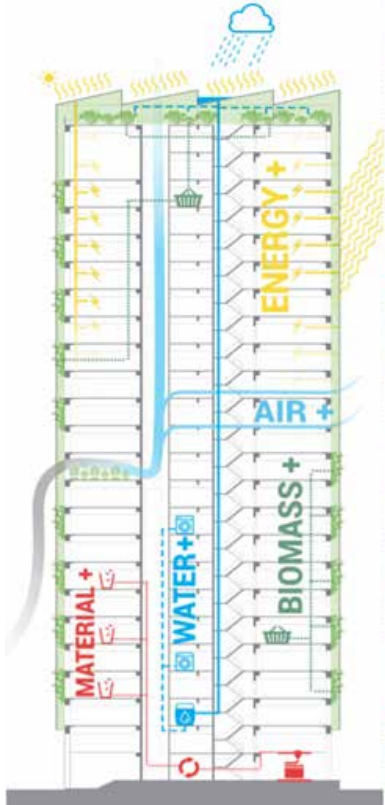
Şekil 9. Prototip Üzerinde Yapılan İyileştirme Çalışmaları (MOR, 2018)

Çalışma enerji kaybeden, verimsiz binaları yeniden yorumlayarak, modüler ve uyarlanabilir konutlara dönüştürerek, konut sıkıntısını ve boş bina stoku sorunları ile ilgilenmiştir.



Şekil 10. Esnek Kat Planı Çalışması (MOR, 2018)

MOR çalışması, Trias Energetica prensibini izler. Enerji talebini minimuma indirir. Enerjiyi çeşitli şekillerde geri kazanır ve kazandığı bu enerjiyi yeniden kullanır. Prototipin enerji şeması ve sirkülasyonu bu şekilde kurgulanmıştır. Bu enerji sisteminin büyük oranda sağlayıcısı ise güneş enerjisi ve güneş panelleridir. Çalışma enerji verimliliğinin yanında çeşitli teknolojileri su yönetimini, malzeme, hava kalitesi ve biyokütleyi de içeren sistemleri de barındırmaktadır.



Şekil 11. Prototipin Uygulanması Sonucu Öngörülen Kesit (MOR, 2018)

MOR (Modular Office Renovation), projesinde yapılan sürdürülebilirlik parametreleri içeren beş başlık;

Enerji Sistemi: Güneş paneli ve yeni nesil elektrik sistemleri

Su Sistemi: Yağmur suyunu toplama ve toplanan yağmur sularının katlarda rezervuarlarda kullanımı, gri su arıtma sistemleri, gri ve siyah su ayrıştırma sistemi

Hava Sistemi: Pasif havalandırma sistemi

Biyokütle: Düşey kat bahçeleri ve sera sistemi

Malzeme: Geri Dönüştürülebilir malzeme ve malzeme enerji ve çevre verilerini içeren künyesi

Rotterdam da yer alan bu yapının dönüşümü başlangıç noktası olma yolunda başta bölgesine daha sonra genişleyen perspektifiyle uzak çevresine katalizör görevi üsleneceği açıktır.



## SONUÇ

“Bugün karşı karşıya olduğumuz önemli sorunlar, geçmişte onları yaratan aynı bilinç düzeyi ile çözülemez.”  
Albert Einstein

Dünyada özellikle Sanayi Devrimi ve sonrasında gelişen endüstrileşme ile pazarın yeni bir boyut kazanması, insanlar için yeni yaşam standartlarını beraberinde getirmiştir. Değişen ve gelişen yaşam standartlarına, artan nüfusun da eklenmesi doğal çevre ve doğal çevrenin barındırdığı kaynaklar üzerinde baskı oluşturmaya neden olmuştur. Bunun en önemli örneği 1970 yılında yaşanan Enerji Krizi'dir. Bu durum dünyadaki kaynakların bir gün bitebileceği gerçeğini gözler önüne sermiş ve kaynaklar üzerindeki kullanımların verimli olması gerektiğini göstermiştir.

Kaynak tüketiminde çeşitli sektörler yer alsa da buradaki en büyük paylardan birine sahip kalem inşaat sektörüdür. Çoğu yapının gelişen teknoloji ve sistemleri bünyesine adapte edememesi kaynakların eski düzende kullanılmasına neden olmakta bu durum da verimi düşürmektedir. Günden güne yapımları artarak devam eden ve arzın üstünde kapasite ile çalışan yapı sektöründe konut stoklarının öngörülen düzeyin üstüne çıkması hem çevre üzerindeki olumsuz etkiyi hem de yatırımcıya olan negatif etkiyi arttırmaktadır. Bu durum ürünlerin kalitesini düşürerek bağlamından kopuk, çevresel etkisi yüksek, verimi düşük, bulunduğu döneme ve çağına cevap veremeyen yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Bu mevcut yapı stoklarının çevresel etkisinin iyileştirilmesi amacıyla sürdürülebilir özellikleri yıkmadan ve ekstra bir maliyet yükü getirilmeden, yaşam standartlarını yükseltmek ve yapıların çağına uygun mekanlara dönüştürmek amacıyla, dünyada yapılan örnekler incelenip elde edilen veriler ışığında mevcut konut stoklarının aşağıda belirtilen parametreler ile;

- Enerji Yönetimi
- Su Yönetimi
- Malzeme Korunumu
- Hava ve Biyo Çevre

Kente ve doğaya kazandırmak için “Akıllı Model Önerisi” hazırlanmıştır.

Sonuç olarak, mevcut konut stokları üzerinden yapılan bu çalışmanın temelini oluşturacak düşünce “doğal olanın korunması, mevcut yapıların çevresel etkenlerinin iyileştirilip optimum verim kazandırmak üzere uygun teknolojilerle sürdürülebilir nitelik sağlanması, kullanıcıları için yaşam kalitesinin yükseltilmesi, yatırımcı için bu stokların ekonomik boyutunun geliştirilmesi ve tüm bu süreçlerin nasıl yapılacağına yönetilmesi” önerilen Akıllı Model ile birlikte ortaya konmasını sağlamak, özellikle son dönemlerde ekolojik dengenin bozulması ile hız kazanan ve üzerinde çalışılıp geliştirilmeye çalışılan sürdürülebilirlik kavramına katkıda bulunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abasalipour, S., (2008) Nano houses, the houses of future, Fine arts Mag., vol. 30, p. 86, 2008.
- Ahmadi, F., “Sustainable Architecture”, Abadi Mag, vol. 40, 41, p. 95, 2004
- Celik Z. (1994). “Urban preservation as theme park: the case of Sogukcesme Street.” In: Celik Z., Favro Z., and Ingersoll R., editors. Streets: critical perspectives on the public space. Berkeley (CA): University of California Press, p. 83-94.
- Cody, B., (2014) The Role of Technology in Sustainable Architecture. In: Wolkenkuckucksheim, Internationale Zeitschrift zur Theorie der Architektur. Jg. 19, Heft 33, 2014,
- Dixon, W., (2010), The Impacts of Construction and the Built Environment, Erişim Tarihi: 13.04.2014, <http://www.willmott-dixongroup.co.uk/assets/b/r/briefing-note-33-impacts-of-construction-2.pdf>
- Ekberli İ., Gülser C., (2016) “Toprağın ısısal yayılımının fonksiyonel değişimi ve toprak sıcaklığına etkisi” Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi , 2016
- U.S Environmental Protection Agency -Amerika Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı- (EPA), 2012, “Resource Conservation and Recovery, Local Government Climate And Energy Strategy Guides, 2012
- Farhoodi, M., (2008) “Sustainable Architecture Concept Review, Architectural & Construction Mag”., vol. 12, p. 39, 2007-2008.
- GBC. Green Building Challenge, (2000). Stokholm: The Swedish Council for Building Research; 2000.
- Ghorbanzadeh M., Nezami A., (2010), “Smart architecture contribution to achieving sustainable architecture realization” Bojnord University, Iran

- Greenfacts, (2020), "Su Kaynakları Hakkında Gerçekler, Birleşmiş Milletler Dünya Su Gelişim Raporu-2"; 2020
- Grierson, D. (2011). Towards Sustainable Building Design, Design Principles and Practices: An International Journal, Volume 3, Number 3, 2009, ISSN 1833-1874.
- Kamar K.M, Ismail E, Ismail E, Abd. Hamid Z, Egbu C, Arif M., Mohd Zin, Mohd.M.Z.N Ghani.K, Rahim.A.H, (2010) "Sustainable and Green Construction", Construction Industry Development Board (CIDB), Malaysia.
- Li Z., Boyle F., Reynolds A., (2010) " Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland" Department of Mechanical Engineering, Dublin Institute of Technology, Bolton Street, Dublin 1, Ireland
- Littig, B. ve Griebler , E. (2005). "Social Sustainability: A Catchword between Political Pragmatism and Social Theory, International Journal for Sustainable Development", 8(1/2), 65-79.
- MOR (Modular Office Renovation) Press#1 , TU Delft, 2018
- Moultrie, C. (2010). Architectural Design Principles and Processes for Sustainability Unpublished Masters of Research Dissertation, University of Strathclyde Glasgow
- Roy M., (2008), "Dept. Of architecture, Jadavpur university, Kolkata, India, "Importance of green architecture today".
- Ryn V.D., Cowan, S. (1996) . "Ecological Design", Washington DC, Island Press.
- Shemirani S.M, Akhtar M, Akhtar .H , "Sustainable Architecture, Energy and Environment", the Second Conference and Specialized Fair of Environment Engineering, Tehran University, Iran, 2008.
- Sinopoli J., (2010). "Smart Building Systems for Architects, Owners, and Builders, BH, British Library Cataloguing-in-Publication Data, London
- Steele J., (1997). "Sustainable architecture: principles, paradigms, and case studies". New York: McGraw-Hill Inc.
- Tokman L.Y., Çiğın A.,(2019)" Sürdürülebilir Kalkınmada Güncel Tasarım İlkeleri" Sürdürülebilir Kalkınma Rolüyle Mimarlık Dergisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Rektörlük Yayınları No:1, s:31, Eskişehir
- Zabihi H., Habib F., Mirsaeedie L., (2012), "Sustainability in Building and Construction: Revising Definitions and Concepts" Department of Art and Architecture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)  
Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)  
Organisation for Economic Co- Operation and Development - Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü- (OECD)  
Green Building Information Gateway -Yeşil Bina Bilgi Sistemi- (GBIG)



**İç Mekânda Enerji Verimliliği ve Teknoloji İlişkisi:  
Güncel Uygulamalar Bağlamında Bir İrdeleme**

**Relationship Between Energy Efficiency and Technology in The Interior Space:  
A Review in Context of Current Applications**

Filiz TAVŞAN, Cevgiz TAVŞAN, Edanur FETTAHOĞLU  
Karadeniz Teknik Üniversitesi İç Mimarlık Anabilim Dalı, Trabzon

Doi: 10.51764/smutgd.1013574

Geliş Tarihi : 22.10.2021

Kabul Tarihi : 07.12.2021

**ÖZET**

Sürdürülebilirlik, artan çevre kirliliği ve doğal kaynakların hızla tükenmesi gibi faktörlerin etkisi ile her geçen gün daha da önemli bir konu haline gelmektedir. Birçok sektörde bu konuya ilişkin sorunlar dile getirilmekte, önlemler planlanmaktadır. Sürekli olarak gelişmekte olan yapı sektörü de bu alanlar arasında önemli bir konuma sahiptir. Bir yapının hem yapım hem de işletim süreci boyunca her alanda kaynakların kullanım miktarı, niteliği ve yöntemi farklılaşmaktadır. Yakın tarihte yaşanan enerji krizi ve sürekli olarak artan enerji tüketim miktarı enerji verimliliğinin bu konuda dikkat edilmesi gereken parametrelerden biri olduğunu göstermektedir. Bu alanda çeşitli çalışmalar yürütülmekte, teknolojik uygulamalar ise konuya farklı yaklaşımlar sunmaktadır. Teknoloji yapım sürecinin hemen her aşamasında etkili olmaktadır. Ancak yapı şükrütürü ve cephede etkili olan teknoloji unsurunun iç mekânda aynı ölçüde yer bulamadığı görülmektedir. Bu bağlamda, iç mekanlar için yürütülen enerji verimliliği uygulamaları ve teknoloji ilişkisi araştırmanın temel inceleme alanı olarak belirlenmiştir. Araştırmada teknolojinin iç mekânda yaygın olarak kullanılan sistemler dışında, enerji verimliliği konusunda aktif roller üstlenebileceği varsayımından yola çıkılmıştır. Yüksek enerji tüketiminin sebepleri arasında görülen teknolojinin aynı zamanda enerji verimliliğini sağlama aracı olarak kullanılabilmesi ise araştırmanın bir diğer varsayımıdır. Araştırma varsayımları güncel teknolojik uygulamaların analiz edilmesi yöntemiyle sınanmıştır. İç mekânda teknoloji ve enerji verimliliği ilişkisi konusunda farklı bir bakış açısının geliştirilmesi, teknolojinin bu alanda ne gibi rollerinin olduğunun tespit edilmesi hedeflenmiştir. Araştırma sonucunda, teknolojinin enerji verimli iç mekân uygulamalarının geliştirilmesine yenilikçi alternatifler sunduğu, enerji tasarruflu iç mekân uygulamalarının ötesine geçilerek enerji üreten iç mekân anlayışının ortaya çıktığı ve söz konusu uygulamaların gelişme potansiyelinin bulunduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji verimliliği, iç mekân, teknoloji, sürdürülebilirlik.

**ABSTRACT**

Sustainability is becoming an increasingly important issue for various reasons. In many sectors, measures are planned in this regard. The ever-developing construction industry is among these areas. The recent energy crisis and the ever-increasing energy consumption show that energy efficiency is one of the parameters to be considered in this regard. Technological applications on this subject offer different approaches to the subject. Technology is effective at almost every stage of the construction process. However, the technology element, which is effective on the building structure and the facade, is not taken into account sufficiently in the interior. For this reason, the relationship between energy efficiency and technology in indoor spaces has been determined as the main study subject of the research. In the research, it is assumed that technology can play an active role in energy efficiency, apart from the systems commonly used indoors. Another assumption of the research is that technology, which is among the causes of high energy consumption, can also be used as a means of providing energy efficiency. Research hypotheses were tested by analyzing current technological applications. It is aimed to develop a different interpretation of the subject and to determine the roles of technology in this subject. As a result of the research, it has been determined that technology offers innovative alternatives to energy-efficient indoor applications, creates an energy-generating interior concept by going beyond energy-efficient interior applications, and that these applications have the potential to develop.

**Keywords:** Energy efficiency, interior space, technology, sustainability.

## GİRİŞ

İnşaat sektörü ilişkili olduğu çeşitli sektörler ile birlikte sürdürülebilirlik ve kaynakların korunumu alanlarında dikkate alınması gereken başlıca sektörler arasında yer almaktadır. Yapım ve işletim aşamalarında sürekli olarak yaşanan gelişmeler, yeni teknoloji ve ürünler çevre korunumu tartışmalarını da beraberinde getirmektedir. Özellikle enerji krizleri ve artan nüfus bu konunun önemine işaret etmektedir ve enerji verimliliğine verilen önemin çeşitli politikalar ile desteklenmesi gerekmektedir (Goldemberg, Joansson, Reddy ve Williams, 1987). Bununla birlikte yapı tasarımı ve inşası sürecinde her aşamada görev alan kişilerin konuya göstereceği hassasiyet büyük önem taşımaktadır. Yapıların çevreye vereceği zararı en düşük düzeyde tutmak, çevrenin korunmasını sağlamak, çevresel ve yapısal sürdürülebilirlik için yapım üretim sürecinin bütün aşamalarının dikkate alınması gerekmektedir (İpekçi, Coşgun ve Esin, 2015). Enerjinin sürdürülebilirliği ve verimli kullanımı da yapı sektöründe dikkat edilmesi gereken kilit unsurlar arasındadır.

Tarihte yaşanan enerji krizleri, teknoloji kullanımının artışı ve kaynak yetersizliği gibi sebepler birçok alanda enerjinin korunumu ve verimliliğinin sağlanmasına yönelik çalışmaları gündeme getirmiştir (Goldemberg vd., 1987; Çakmanus, 2004). Şehirler, dünyadaki enerji tüketiminin yaklaşık %75'ini ve sera gazı emisyonlarının %80'ini oluşturmaktadır; inşaat sektörü de bu tüketiminin dikkate değer kısmını kapsamaktadır (Aghamolaei ve Ghaani, 2020). Enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar bu alanda önem kazanmaktadır (Çakmanus, 2004). Enerji verimliliği, binaların sürdürülebilirliği hususunda en temel unsurlarından biridir (Parasonis, Keizikas, Endriukaityté. ve Kalibatiené, 2012). Bir yapının yaşam döngüsü içerisinde sürdürülebilirliğin ve tasarrufun sağlanması her aşamada dikkat edilmesi gereken unsurlardır. Yapım için kullanılacak hammaddelerin çıkarılmasından yıkımına kadar geçen zamanı kapsayan bu döngü içerisinde kaynakların doğru ve etkili kullanımı hem çevrenin hem de geleceğin korunması açısından titizlikle planlanmalı ve uygulanmalıdır (Tufan ve Özel, 2018). Yapının çevresinden iç mekân detaylarına kadar bütün tasarım süreci enerji verimliliğini sağlayacak şekilde yürütülebilmektedir.

Enerji verimliliğini sağlamaya yönelik tasarımların ayırt edilebilir yönü "yapıyı oluşturan malzeme ve bileşenlerin üretimi, yapının tasarımı yanında iklimlendirme sistemlerinin seçimi, bakımı, işletimi ve yönetimi" gibi alanlarda da bu doğrultuda tasarlanırken aynı zamanda yapının standardını da korumasıdır (Çakmanus, 2004). Bu alanda iç mekânda yapılabilecek uygulamalar ise hem inşaat sürecinde hem de inşaat sonrasında gerçekleştirilebilecek uygulamalar olarak çeşitlenmektedir. Yapım süreci tamamlandığında dahi iç mekânda gerçekleştirilebilecek birçok uygulamaya erişmek mümkündür. Yapılan araştırmalar incelendiğinde konuya ilişkin alt başlıklar ile çeşitli araştırmaların yapıldığı (Gençoğlu, 2005; Haydaraslan ve Sümer, 2018) veya daha geniş kapsamda sürdürülebilirlik üst başlığında incelendiği (Yüksel ve Kariptaş, 2019; Toker, 2020), teknik irdelemeler bağlamında değerlendirildiği (Parasonis vd., 2012; Aghamolaei ve Ghaani, 2020) çeşitli çalışmalara ulaşılmıştır. Söz konusu araştırmalar konu hakkında bilgi ve katkı vermekle birlikte uygulamaların derlenerek örneklendiği iç mekân bağlamında yeterli çalışmaya ulaşılamamıştır. Konuya ilişkin yeterince bilgiye ulaşılamaması yenilikçi uygulamaların kullanımının yaygınlaşmaması ve tanınmaması ile sonuçlanmaktadır. Araştırma bu problemde yola çıkılarak kurgulanmıştır. İç mekânda enerji verimliliğini sağlama amacı ile gerçekleştirilen uygulamalar çoğunlukla enerji verimli beyaz eşyalar, enerji tasarruflu ampuller gibi mevcut enerjinin daha az tüketilmesine yönelik ürün grupları olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırmada, iç mekânda teknolojik gelişmelerin çok daha aktif ve sürdürülebilir enerji verimliliği uygulamalarını mümkün kılacak potansiyele sahip olduğu varsayımı benimsenmiştir. Bir diğer varsayım ise, enerji tüketiminin önemli sebepleri arasında görülen teknolojinin aynı zamanda iç mekânda enerji verimliliği konusunda bir araç olarak kullanılabileceğidir. Elde edilecek sonuçlar ile konu hakkında farklı bir yaklaşımın ortaya konması istenmiştir. İç mekânda enerji verimliliğini sağlamaya yönelik çalışmalar içerisinde teknolojinin kapsamının ve rolünün neler olabileceği hakkında bir veri kümesine ulaşılmaması amaçlanmıştır.

### İç Mekânda Enerji Verimliliği

İç mekân tasarımı birçok yönü ile kullanıcı ve çevre için önem arz eden; bu bağlamda detaylıca planlanması gereken bir konudur. İç mekân tasarımcıları kullanıcıların ihtiyaçları gibi birçok unsuru göz önünde bulundurarak tasarım sürecini gerçekleştirmektedirler. Tasarım sürecinde alınacak kararlar olumlu veya olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Sürdürülebilirliğe ilişkin tüm yapı tasarımı aşamalarında olduğu gibi iç mekânda da gerçekleştirilen ve gerçekleştirilme potansiyeli olan uygulamalar mevcuttur. Enerji verimliliği de bu alanda dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. İnsan yaşamı, teknolojinin etkisi ile birlikte daha konforlu hale gelmiş, bunun sonucu olarak da enerji tüketimi artmıştır (Doğan ve Yılankırkan, 2015).

Artan enerji tüketimi ile birlikte enerji verimliliğine ilişkin uygulamaların önemi de artmaktadır. Enerji verimliliği söz konusu olduğunda mimari planlama ve yerleşim gibi değişkenler etkili olmaktadır (Parasonis vd., 2012). Bununla birlikte tamamen iç mekân kullanımına yönelik tasarlanmış birçok ürün ve uygulama geliştirilmektedir. Örneğin; akıllı teknolojiler bu alanda sürekli olarak gelişmekte olan uygulama alanlarından biridir. Söz konusu teknolojiler; sürdürülebilir bir geleceğin planlanması, küresel ısınmanın etkilerini azaltma ve dengeli bir ekonomik kalkınma sağlama gibi problemlere çözüm sağlama amacı ile gerçekleştirilmektedir (Nizetic, Djilali, Papadopoulos ve Rodrigues, 2019). Akıllı teknolojiler dışında da birçok uygulama ve ürün geliştirilmektedir. Geliştirilen uygulamaların kullanımı ise yeterli yaygınlıkta olmayıp bu durum çeşitli değişkenler ve faktörlere bağlı olarak ortaya çıkmaktadır.

## **İç Mekânda Enerji Verimliliği ve Teknoloji İlişkisi**

İnsanoğlunun çevreye verdiği zarar her geçen gün artmakta, bu zarara sebep olan etkenler arasında enerji üretim ve tüketimi büyük bir paya sahip olmaktadır (Kırbaş, 2019). Çevreye verilen zararın artması ve olumsuz sonuçlarının göz ardı edilemeyecek düzeylere ulaşması; konuya ilişkin çalışmaların yapılması ve hemen her alanda önlemlerin alınması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Mimarlık alanında da enerji tüketiminin çevreye verdiği zarar doğrultusunda çeşitli önlemler alınmış, mimari tasarım anlayışında değişiklikler meydana gelmiştir (Soğukoğlu ve Vatan, 2014). Enerji verimliliği bağlamında geliştirilen akıllı binalar ve sürdürülebilir yaklaşımlar mimari alanında görülen en somut örnekler arasındadır. Söz konusu binalar ve sistemlerin, üretiminden kullanım sürecine kadar teknolojinin etkisini görmek mümkündür. Örneğin, teknolojinin etkin olarak kullanıldığı akıllı binalarda çevreye en az zararı verecek, en az kirliliğe sebep olacak ve hatta enerji üretebilecek sistemler kurgulanabilmektedir (Özler, 2003). Mevcut sistemler de sürekli olarak geliştirilmekte ve bu alanda çeşitli çalışmalar yürütülmektedir.

İç mekân bağlamında değerlendirildiğinde hem mimari yapım aşamasında hem de kullanılmakta olan yapıların iç mekanlarına eklenebilecek / değiştirilebilecek ürün ve sistemler ile enerji verimliliğini artırmak mümkündür. İç mekânda enerji verimliliği sağlayan çözümler doğal yollarla sağlanabileceği ve çeşitli önlemler alınabileceği gibi teknolojik imkanlar ile geliştirilmiş kalıcı çözümler de kullanılmaktadır. Teknolojik iç mekân çözümleri enerji verimliliği sağlarken gelişmiş akıllı sistemlerle kullanıcı ihtiyaçlarını tespit eden, gelişmiş bir kullanım süreci kurgulayan ürünlerin geliştirilmesi mümkün olmaktadır (Alıcı, 2020). Bununla birlikte, maliyet faktörü ve teknoloji kavramına ilişkin yaklaşımlar gibi sebeplerle enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin alımı sınırlı düzeylerde kalmaktadır (Geller, 2002). Buna karşın, teknoloji iç mekân oluşumunu biçimsel, işlevsel ve boyutsal olarak etkilemekte, iç mekânda yeniliklerin gündeme gelmesine öncülük etmektedir (Özturan, 2010). Yapılan araştırmada teknolojinin iç mekâna etkisi kullanılan ürün ve uygulamalar bağlamında enerji verimliliği konusu özelinde incelenmiş, teknoloji ve iç mekânda enerji verimliliği arasındaki ilişki olumlu ve olumsuz yönleriyle ele alınarak değerlendirilmiş; güncel örnekler bağlamında söz konusu ilişkisinin çeşitli boyutlarının ortaya konması hedeflenmiştir.

## **ARAŞTIRMA YÖNTEMİ**

Enerji verimliliği ve teknoloji ilişkisinin iç mimari tasarım ölçeğinde incelendiği çalışma beş aşamadan oluşmaktadır. Araştırmanın birinci aşamasında “enerji verimliliği”, “teknoloji”, “sürdürülebilirlik” “mimari” ve “iç mekân” başlıkları bağlamında elde edilen kaynaklar irdelenmiş, araştırmanın kavramsal çerçevesi çizilerek amacı, önemi ve varsayımları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise belirlenen kavramsal çerçeve doğrultusunda araştırma yöntemi ve örneklem grubu belirlenmiştir. Araştırmanın üçüncü aşamasında konuya ilişkin yapılmış çalışmalar arasında konuya ilişkin analiz edilmiş; mevcut yaklaşımlar araştırılmıştır. Dördüncü aşamada ise iç mekânda enerji verimliliği sağlamaya yönelik güncel ürün ve uygulamalar tespit edilmiş, söz konusu uygulamalar iç mekânda enerji verimliliği ve teknoloji ilişkisi bağlamında irdelenmiştir. Bu aşamada örneklerin belirlenmesinde, ödüllü veya literatüre girmiş uygulamalar olması seçim kriteri olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen örnekler doğrultusunda, bu alanda geliştirilen ürün ve uygulamaların belirli başlıklar altında gruplandırıldığı tespit edilmiş, “3.1. İç mekânda enerji verimliliğine ilişkin yenilikçi uygulamalar” maddesi altında bu başlıklar doğrultusunda irdelenmiştir. Analiz ve irdelemeler sonucunda elde edilen veriler derlenerek sonuç aşamasında aktarılmıştır.

## **BULGULAR VE İRDELEMELER**

Araştırmanın bu bölümünde teknolojinin iç mekânda enerji verimliliğine etkisi bağlamında güncel teknolojik sistemler, enerji verimli ürün ve uygulamalar irdelenmiştir.

## İç Mekânda Enerji Verimliliğine İlişkin Yenilikçi Uygulamalar

Enerji verimliliği ile ilgili alınan temel önlemlerin geleneksel ve alışılmış yöntemler olduğu ve bu alanda yapılan yenilikçi uygulamaların yaygın olarak kullanılmadığı tespit edilmiştir. Bu noktadan hareketle, iç mekânda kullanılabilecek yenilikçi ve teknolojik enerji verimliliği uygulamaları örnekleri listelenmiştir. Yapılan örnekleme ile konuya ilişkin bir veri kümesine ulaşmanın yanı sıra, literatürden elde edilen verilerin örnekler üzerinde irdelenmesi ve araştırmanın güncel bir zemine oturtulması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda incelenen örneklerden elde edilen veriler kapsamında yapılan gruplandırma ve irdeleme başlıkları şu şekildedir:

- Akıllı otomasyon sistemleri
- Aydınlatma sistemleri ve elemanları
- Isıtma ve havalandırma sistemleri
- Kapı ve pencereler
- Zemin ve duvar kaplamaları
- Panjur, perde ve tekstil ürünleri

Örnekler belirlenen başlıklar altında enerji verimliliğine yaklaşım biçimleri ve yenilikçi özellikleri değerlendirilerek incelenmiştir.

### Akıllı otomasyon sistemleri

Öz bir tabir ile otomasyon, bir sistemin yönlendiren bir kimseye ihtiyaç duymadan kurgulandığı düzen ile verilen komutları gerçekleştirmesi olarak tanımlanabilir. İç mekânda ise konut mekanları bağlamında örnekleme gerekirse, birçok sistemin kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda gerçekleştirilmesi yoluyla kullanıcıların konfor koşullarını artıran aynı zamanda tasarruf sağlayan sistemlerdir (Yumurtacı ve Keçebaş, 2009). Güncel sistemler incelendiğinde ise akıllı otomasyon sistemlerinin birçok farklı amaca yönelik geliştirilebildiğini görmek mümkündür. Örneğin iç mekânlarda bitki yetiştiriciliğinin bir bilgisayar veya telefon aracılığıyla gerçekleştirilmesini sağlayan otomasyon sistemleri geliştirilmiştir (bkz. Şekil 1). Enerji tasarruflu LED aydınlatmalar ile kurgulanan sistemler su kullanımını da azaltırken bitki hasadını hızlandırmaktadır (URL1). Burada kullanılan teknolojinin enerji tasarrufuna ek olarak su tasarrufu sağlamaya yönelik olduğu, aynı zamanda tarıma yenilikçi bir yaklaşım sunduğu görülmektedir. Otomasyon sistemlerinin kullanılmakta olduğu bir başka alan olan otelcilik sektöründe (bkz. Şekil 2) ise sistemler hem enerji tasarrufu hem de misafir memnuniyetini sağlama amacına yönelik kullanılmaktadır (URL2). Her iki örnek değerlendirildiğinde akıllı sistemlerin hem enerji tasarrufu sağlama hem de ek işlevlerle çok amaçlı kullanımlara sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Akıllı iç mekân tarım sistemi (URL1)



Şekil 2. Otel otomasyon sistemi (URL2)



## Aydınlatma Sistemleri ve Elemanları

Teknolojik enerji verimliliği kapsamında geliştirilen aydınlatma çözümlerinde akıllı aydınlatmalar önemli bir rol oynamaktadır. Akıllı aydınlatma sistemlerinde üç ana bileşen bulunmaktadır; bunlar kontrol sistemi, aydınlatma armatürü ve ana kontrol destekleyicileridir. Günümüzde birçok akıllı cihaz; telefonlar ve bilgisayarlar minimum altyapı ile akıllı aydınlatma sistemlerini çalıştırabilmektedirler (Tang, Kalavally, Yew Ng ve Parkkinen, 2017). Bununla birlikte, iç mekânda doğadan ilham alan, estetik değeri yüksek ve teknolojik alternatiflerin de üretildiği görülmektedir. Green Product Award ödüllü, kaya tuzu kristalleriyle tasarlanmış yüksek enerji verimli lamba projesine buna bir örnektir. (bkz. Şekil 3). Üründe yüksek enerji verimliliğine ek olarak kaya tuzunun nemi emerek hava kalitesini artırması ve uyarlanabilir boyutları ile farklı iç mekanlara uyum sağlaması sağlanmıştır (URL3). Teknoloji ve doğa iş birliği ile sürdürülebilir bir ürün geliştirilmiştir. Marjan van Aubel tasarımı bir başka aydınlatma ise enerjiyi koruma yoluyla değil üretme yoluyla enerji verimliliği sağlamaktadır (bkz. Şekil 4). İç mekanlar için tasarlanan ürün güneş ışığını yakalayıp enerji üretme, kendi kendine çalışabilme prensibiyle tasarlanmıştır. Güneş enerjisi sistemlerini çatı panellerinden ziyade iç mekanlar özelinde de kullanılabilir hale getirmek ve böylece “sanat, sürdürülebilirlik ve teknolojiyi birleştirmek” amaçlanmıştır (URL4). İncelenen her iki örnekte de enerji verimliliğine farklı açılardan yaklaşıldığı, yeni işlev ve doğa dostu yaklaşımlar ile estetik çözümler sağlanmanın tercih edildiği tespit edilmiştir.



Şekil 3. Yüksek enerji verimli lamba (URL3)

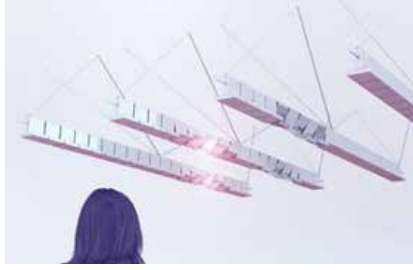


Şekil 4. Enerji üreten aydınlatma sistemi (URL4)

## Isıtma ve Havalandırma Sistemleri

İç mekân ısıtma ve havalandırma sistemleri temel olarak termal konfor ve hava kalitesi sağlamak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, artan ısıtma ve havalandırma sistemi kullanımı enerji verimliliği ile ilişkili sorunları da beraberinde getirmekte; bu alanda çalışmaların yapılmasını gerektirmektedir (Song, Wu ve Yan, 2013). Bu alanda teknoloji kullanımı ile ilgili incelenen örnekler, sistemlerin enerji verimliliği sağlamanın yanına kullanıcılara farklı imkanlar sunma amacına da işaret etmektedir. Isıyı sadece insanlara yoğunlaştırma üzerine kurulmuş olan “ısı balonu projesi” kamusal iç mekanlar için yenilikçi bir çalışma niteliği taşımaktadır (bkz. Şekil 5). Kullanıcıların yoğun olarak buldukları alanları tespit ederek ısıyı oraya yönlendiren sistem bu yolla gereksiz enerji kullanımının önüne geçmeyi amaçlamaktadır. Geliştirme çalışmaları devam eden projenin standart bir sistem ile kıyaslandığında iki katına kadar enerji tasarrufu sağlayabileceği ön görülmektedir. Kamusal alanda nispeten kişiselleştirilmiş bir deneyim sunmak ise projenin bir diğer amacıdır (URL5). Nanyang Teknoloji Üniversitesi tarafından geliştirilen Vortec adlı ürün (bkz. Şekil 6) ise alışılmış ürünlerin yarısı kadar elektrik kullanan ve iki kat daha hızlı soğuması beklenen bir tavan fanı olma özelliğini taşımaktadır. Fan, havayı emmekte ve daha sonra tekrar dışarı atılarak odanın her tarafına yayılması sağlanmaktadır (URL6). Her iki örnekte de enerji tüketimini azaltmaya yönelik farklı kapsamlarda çalışmalar yapılmış; ek olarak kişiselleştirme gibi imkanlar sunulmuştur.





Şekil 5. Hareket sensörlü ısıtma sistemi (URL5)



Şekil 6. Enerji verimli ısıtma sistemi (URL6)

### Kapı ve Pencereleer

Mimaride kapı ve pencerelerin enerji verimliliği bağlamında kullanımı temel olarak ısı yalıtımı sağlama amacıyla gerçekleştirilir. Bu amaçla ısı yalıtımlı kapı ve pencereler kullanılarak bina kabuğunun da bu anlamda iyileştirilmesi sağlanır (Diakaki, Grigoroudis ve Kolokotsa, 2008). Teknolojik imkanların değerlendirilmesi bilindik enerji tasarruflu kapı ve pencerelere alternatifler sağlamaktadır. Örneğin, Şekil 7’de yer alan kapı kinetik enerjiyi dönüştürme mantığından yola çıkılarak tasarlanmıştır. Kapıya enerji jeneratörü yerleştirilmiş ve böylece her kullanımında enerjinin bir miktarı yenilenebilir enerjiye dönüştürülmektedir (URL7). Hollanda merkezli bir firma tarafından tasarlanan “PowerWindow” adlı ürün de benzer bir yaklaşımla enerji verimliliği sağlamanın yanı sıra, enerji üretimi sağlanmaktadır (bkz. Şekil 8). Bu pencere sistemi, yaygın olarak kullanılan pencerelerin yaptığı şekilde ışığın %30’unu yansıtma yerine ışığı toplamakta ve işlemektedir. Bu sayede pencere çerçevesinin içindeki güneş pilleri sayesinde elektriğe dönüştürülmektedir. Enerji üreten cam fikri daha önce de gerçekleştirilmiş ancak bunu tamamen şeffaf ve büyük alanlarda kullanılabilir bir pencere sistemine dönüştürmek ürünün ayırt edilebilir yönünü oluşturmaktadır (URL8). Her iki örnekte de kapı ve pencerelerin yalnızca enerji korunumunu sağlama amacıyla değil, enerji üretme amacıyla da kullanılabilirdiği görülmektedir. Bu tarz tasarım yaklaşımları benzer anlayışla birçok kapı ve pencere uygulamasının da gerçekleştirilmesinin önünü açmaktadır.



Şekil 7. Enerji üreten döner kapı sistemi (URL7)



Şekil 8. Enerji üreten pencere (URL8)

## Zemin ve Duvar Kaplamaları

Sürdürülebilirlik günümüzün önemli sorunları arasında yer almaktadır ancak bu konuda alınan önlemler ve yapılan uygulamalar kısıtlıdır. Bununla birlikte özellikle çevresel kaygılar tasarımcıları iç mekânda sürdürülebilir kaplama malzemeleri kullanmaya teşvik etmektedir (Lee, Allen ve Kim, 2013). Bu noktada farklı yollarla enerji verimliliği sağlayan uygulamalar bulunmaktadır. Wisconsin-Madison Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirilen bir çalışmayla ayak seslerini depolayarak enerjiye dönüştüren zemin kaplama malzemesi bu uygulamalar arasındadır (bkz. Şekil 9). Çalışmada yalnızca enerji verimliliğine odaklanılmamış, geri dönüşüm kavramı da ön planda tutulmuş ve kaplama malzemesi geri dönüştürülmüş odun hamurundan üretilmiştir (URL9). Sürdürülebilirliğin birden fazla açıdan ele alındığı ve tasarım sürecine dahil edildiği görülmektedir. Kore’de bulunan bir araştırma grubunun teknolojik çalışmalar doğrultusunda geliştirdiği termokromatik boya ise bu alanda duvar kaplamalarına bir örnektir. Sıcaklığı enerjiye dönüştüren bu boya sayesinde hem enerji verimliliği hem de ekonomik fayda sağlanması amaçlanmıştır (bkz. Şekil 10). İncelenen her iki örnekte de kaplama malzemelerinin yalnızca enerji korunumu sağlamadığı aynı zamanda enerjiyi dönüştürerek iç mekânda alternatif enerji kaynakları sundukları görülmektedir.



Şekil 9. Enerji üreten zemin kaplaması (URL9)



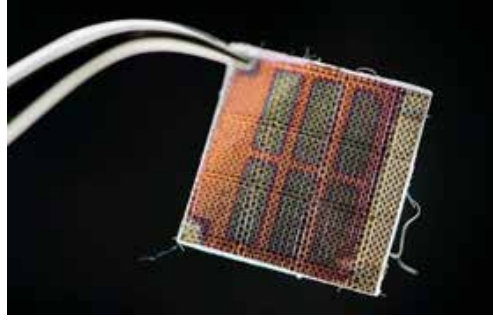
Şekil 10. Termoelektrik boya (URL10)

## Panjur, Perde ve Tekstil Ürünleri

Binalarda sürdürülebilirliği sağlama amacıyla planlama aşamasında alınan önlemler, mevcut ürün ve sistemlerin enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gibi birtakım çalışmalar yürütülmektedir (Yılmaz, 2009). Panjur, perde ve tekstil ürünleri gibi iç mekâna kolaylıkla dahil edilebilen ürünler ise alternatif ve pratik uygulamalar olarak kabul edilebilir. Örneğin, Şekil 11’de yer alan “Enerji Perdesi”, dış tarafında bulunan ve güneş ışığı toplayan hücreler ile enerji depolamaktadır. Depolanan enerji ışık üretmek için kullanılabilir (URL11). Güneş enerjisine dayanan ürün tasarımına farklı bir bakış açısıyla yaklaşıldığı görülmektedir. Georgia Teknoloji Enstitüsü ve Wisconsin-Madison Üniversitesi tarafından geliştirilen bir kumaş ise hem güneş hem de rüzgârdan enerji üretebilmektedir (bkz. Şekil 11). Ucuz ve çevre dostu olan bu kumaş ile dış mekânda kullanıma uygun çadırlar ve iç mekanlar için perdeler üretilmektedir (URL12). Örneklerde güneş ve rüzgâr gibi kaynaklar kullanılarak enerji üretiminin çeşitli yollarının geliştirildiği, iç mekânda kullanılabilecek yeni ürün ve uygulamaların bulunduğu görülmektedir.



Şekil 11. Enerji Perdeleri (URL11)



Şekil 12. Enerji üreten kumaş (URL12)

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada gün geçtikçe daha önemli bir problem haline gelen yüksek enerji tüketimine karşı alınan önlemler ve geliştirilen sistemlerin iç mekânda kullanıma uygun örnekleri incelenmiştir. Yapılan araştırmada enerji verimliliğine ilişkin yaygın olarak kullanılan enerji verimli beyaz eşyalar, ampuller gibi daha az enerji tüketmeye yönelik geliştirilmiş ürünler ve uygulamaların dışında, teknolojik imkanlar doğrultusunda geliştirilen yenilikçi ve farklı yaklaşımlar sunan ürün ve uygulamaların bulunduğu tespit edilmiştir. Örneğin, rüzgâr, güneş gibi doğal kaynaklardan yararlanılarak dolaşımda olan enerjinin iç mekânda kullanılabilir enerjiye dönüştürüldüğü ürünler bulunmaktadır. Söz konusu ürünlerin birçoğu henüz yaygınlaşmamış olsa da firmalar ve üniversiteler bünyesinde geliştirilmeye devam etmektedir. Ek olarak, çalışmaların geliştirilme ve yaygınlaşma potansiyelinin bulunduğu görülmüştür ve geliştirilecek yeni ürün ve uygulamalara zemin hazırladıklarını söylemek mümkündür.

İç mekânda enerji verimliliği ve teknoloji ilişkisi değerlendirildiğinde ise, teknolojinin enerji tüketimine yol açan etkenler arasında yer almasına karşın aynı zamanda yüksek enerji tüketimini önlemeye yönelik uygulamalara da öncülük ettiği görülmüştür. Teknolojinin, özellikle yanlış kullanım biçimleri sonucunda çevreye zarar verme potansiyelinin bulunduğu yadsınamaz bir gerçektir. Teknolojinin her geçen gün yaygınlaşması ve hemen her alana etki etmesi enerji tüketim miktarını artırmakta, teknolojinin bilinçsiz ve yoğun kullanımı ise söz konusu problemi daha da ciddi bir sorun haline getirmektedir. Bu durum iç mekân bağlamında da benzer sorunların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ancak, günümüz imkanları ve yaşam koşulları teknolojinin birçok alanda olduğu gibi iç mekânların ayrılmaz bir parçası haline almasını kaçınılmaz hale getirmektedir. Bu noktada teknoloji kullanımının azaltılması mümkün görünmemektedir. Bu nedenle, teknolojinin etkin ve bilinçli olarak kullanılmasını sağlayan ürün ve uygulamaların geliştirilmesi önem arz etmektedir. Söz konusu uygulamaların büyük çoğunluğunun kısıtlı bir kullanım alanına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu noktada ön plana çıkan maliyet faktörüne karşı ise “ekonomik” ürünlerin geliştirilmekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmada elde edilen veriler göz önünde bulundurulduğunda teknolojik gelişmelerin ve bilimsel çalışmaların katkısıyla enerji verimliliği alanında etkin, uygulanabilir birçok çalışmanın bulunduğu sonucuna varılmıştır. Gerçekleştirilen uygulamaların, üretilen malzemelerin ve sistemlerin bazıları yaygınlaşma potansiyeli taşımaktadır. Bu noktada elde edilen sonuçların araştırma varsayımlarını destekler nitelikte olduğunu söylemek mümkündür. Mimarlık alanındaki birçok konu gibi kaynakların verimli kullanımı ve sürdürülebilirlik konularında da yaratıcılık önemli rol oynamaktadır. Enerji doğada yok olmayan, dönüşen bir kaynaktır ve bu dönüşümü tasarıma uyarlamak hem mimarlığın hem de doğanın geleceği için olumlu sonuçlar doğuracaktır. İster mevcut sistemler kullanarak ister yeni sistemler geliştirilerek bu dönüşümü sağlamak mümkündür. Teknoloji ise bazı olumsuz etkilerine karşın iç mekânda gerek tasarım gerekse kullanım sürecinde enerji verimliliği alanında önemli gelişmelerin meydana gelmesini sağlayabilme potansiyeli taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- Aghamolaei, R. ve Ghaani, M. R. (2020). Balancing the impacts of energy efficiency strategies on comfort quality of interior places: application of optimization algorithms in domestic housing. *Journal of building engineering*, 29, 1-12.
- Alıcı, S. (2020). Eko-tek kent modelinde iç mekân tasarımı. *IDA: International design and Art journal*, 2(1), 98-115.
- Aydın İpekçi, C., Cosgun, N. ve Esin, T. (2015). İnşaat sektöründe geri kazanılmış malzeme kullanımının sürdürülebilirlik açısından önemi. II. uluslararası sürdürülebilir yapılar sempozyumu (ISBS 2015), Ankara.

- Çakmanus, İ. (2004). Enerji verimli bina tasarım yaklaşımı, Tesisat mühendisliği dergisi, 84. 20-27.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. ve Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. Energy and buildings, 40(9), 1747-1754.
- Doğan, H. ve Yıllankırkan, N. (2015). Türkiye'nin enerji verimliliği potansiyeli ve projeksiyonu. Gazi Üniversitesi fen bilimleri dergisi part: c, tasarım ve teknoloji, 3(1), 375-383.
- Geller, H. (2002). Energy revolution: policies for a sustainable future. Washington DC: Island Press.
- Goldemberg, J., Joansson, T. B., Reddy, A. K. N. ve Williams, R. H. (1987). Energy for a sustainable world. World Resources Institute. [http://pdf.wri.org/energyforsustainableworld\\_bw.pdf](http://pdf.wri.org/energyforsustainableworld_bw.pdf) adresinden 21 Ağustos 2021 tarihinde indirilmiştir.
- Kırbaş, İ. (2019). Binalarda enerji verimliliği uygulamaları: MAKU Mühendislik Mimarlık Fakültesi örneği. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü dergisi, 10(2), 141-149.
- Lee, E., Allen, A. ve Kim, B. (2013). Interior design practitioner motivations for specifying sustainable materials: applying the theory of planned behavior to residential design. Journal of interior design, 38, 1-16.
- Nizetic, S., Djilali, N., Papadopoulos, A., ve Rodrigues, J.J.P.C., (2019). Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management. Journal of cleaner production, 231, 565-591.
- Özturan, Ö. (2010). Teknolojik gelişmelerin iç mekan biçimlenişine etkisi. Tasarımda genç bakışlar sempozyumu İstanbul bildiriler kitabı, 129-131.
- Özler, M. E. (2003). Akıllı binalarda enerji etkin tasarım parametreleri (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Soğukoğlu, M. ve Vatan, M. (2014). Mevcut betonarme konut binalarında enerji verimliliğinin artırılması için mimari çözüm önerileri. İstanbul Aydın Üniversitesi dergisi, 6(21), 13-22.
- Song, Y., Wu, S. ve Yan, Y.Y. (2013). Control strategies for indoor environment quality and energy efficiency-a review. International journal of low-carbon technologies, 10(3), 305-312.
- Tang, S., Kalavally, V., Yew Ng, K. ve Parkkinen, J. (2017). Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing system. Energy and buildings, 138(2017), 368-376.
- Tufan, M. ve Özel, C. (2018). Sürdürülebilirlik kavramı ve yapı malzemeleri için sürdürülebilirlik kriterleri. Uluslararası sürdürülebilir mühendislik ve teknoloji dergisi, 2(1), 6-13.
- Parsonis, J., Kezikas, A., Endriukaitytė, A. ve Kalibatienė, D. (2012). Architectural solutions to increase the energy efficiency of buildings. Journal Of Civil engineering and management, 18(1), 71-80.
- URL1. <https://www.igrowpreowned.com/igrownews/grow-pod-solutions-brings-new-automation-technology-to-indoor-farming> (erişim: 23 Eylül 2021)
- URL2. <https://www.hotelmanagement.net/tech/why-smart-energy-systems-ensure-guest-satisfaction> (erişim: 28 Eylül 2021)
- URL3. <https://www.gp-award.com/en/produkte/Rocklumina> (erişim: 28 Eylül 2021)
- URL4. <https://www.designboom.com/design/sunne-self-powered-ambient-solar-light-sun-indoors-03-03-2021/> (erişim: 29 Eylül 2021)
- URL5. [dezeen.com/2014/08/08/movie-interview-carlo-ratti-local-warming-mit-personalised-bubbles-heat/](https://dezeen.com/2014/08/08/movie-interview-carlo-ratti-local-warming-mit-personalised-bubbles-heat/) (erişim: 29 Eylül 2021)
- URL6. [baulinks.de/webplugin/2020/1824.php4](https://baulinks.de/webplugin/2020/1824.php4) (erişim: 23 Eylül 2021)
- URL7. <https://inhabitat.com/energy-generating-revolving-door-by-boon-edam/> (erişim: 23 Eylül 2021)
- URL8. <https://materialdistrict.com/article/fully-transparent-solar-charged-powerwindow/> (erişim: 28 Eylül 2021)
- URL9. <https://news.wisc.edu/renewable-energy-flooring-makes-debut-in-union-south/> (erişim: 23 Eylül 2021)
- URL10. <https://materialdistrict.com/article/thermoelectric-paint-waste-heat-energy/> (erişim: 24 Eylül 2021)
- URL11. <https://www.envirogadget.com/lamps-and-lights/energy-curtain-providing-shade-and-light/> (erişim: 28 Eylül 2021)
- URL12. <https://materialdistrict.com/article/solar-wind-energy-generated-fabric/> (erişim: 28 Eylül 2021)
- Yumurtacı, M. ve Keçebaş, A. (2009). Akıllı ev teknolojileri ve otomasyon sistemleri. 5. uluslararası ileri teknolojiler sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- Yılmaz, B. (2009). Binalarda enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



**Yeşilirmak Havzası için Hidrolojik ve Meteorolojik Kuraklık Tahmini, Türkiye**

**Hydrological and Meteorological Drought Forecasting for the Yesilirmak River Basin,  
Turkey**

<sup>1</sup>Alyar Boustani Hezarani, <sup>2</sup>Utku Zeybekoglu, <sup>1</sup>Asli Ulke Keskin

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Samsun, Turkey

<sup>2</sup>Sinop University, Boyabat Vocational School of Higher Education, Construction Department, Sinop Turkey

Doi: 10.51764/smutgd.993792

Geliş Tarihi : 10.09.2021

Kabul Tarihi : 07.12.2021

## ÖZET

Kuraklık en tehlikeli doğal afettir. Diğer afetlerden farkı, sinsi bir şekilde gerçekleşmesi, etkilerinin yavaş yavaş ortaya çıkması ve uzun süre devam etmesidir. Kuraklığın hem toplum hem de doğal ekosistemler üzerinde çok büyük, olumsuz etkileri vardır. Bu çalışmada, Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak kuraklık tahmin modelleri oluşturmak için Standardize Yağış İndeksi (SPI) değerleri kullanılmıştır. Ek olarak, YSA ile Akarsu Kuraklık İndeksi (SDI) değerlerini tahmin etmek için SPI değerleri kullanılarak hidrolojik kuraklık olasılığı belirlenmiştir. Ayrıca YSA modellerinde İleri Beslemeli Sinir Ağları (FFNN) ile birlikte sırasıyla meteorolojik ve hidrolojik kuraklık indeksleri olarak SPI ve SDI kullanılmıştır. Bu amaçla, Türkiye Yeşilirmak Havzasında bulunan üç yağış ve üç akış ölçme istasyonu çalışma birimi olarak seçilmiştir. YSA tahmin modellerini oluşturmak için istasyonlara ait SPI ve SDI değerleri hesaplanmıştır. SPI ve SDI için farklı YSA tahmin modelleri eğitilmiş ve test edilmiştir. Ayrıca, SDI tahmin modelini geliştirmek için Thiessen Metodu kullanılarak yağışların mekansal dağılımının akışlar üzerindeki etkileri belirlenmiştir. YSA tahmin modellerinin ürettiği sonuçlar ve elde edilen değerler karşılaştırılarak modellerin performansları analiz edilmiştir. ANN ve SPI kombinasyonu meteorolojik kuraklığı yüksek doğrulukla öngördü, ancak ANN ve SDI kombinasyonu hidrolojik kuraklığı tahmin etmede o kadar iyi değildir.

**Anahtar Kelimeler:** YSA, Kuraklık Endeksleri, Hidrolojik Kuraklık, Meteorolojik Kuraklık, Yeşilirmak Havzası, Türkiye.

## ABSTRACT

Drought is the most dangerous natural disaster. It differs from the other disasters in that it occurs insidiously, its effects are revealed gradually, and it persists for a long period. Drought has huge, negative effects on both society and natural ecosystems. In this study, values from the Standardized Precipitation Index (SPI) were used to generate drought estimation models by using Artificial Neural Networks (ANN). In addition, the probability of hydrological drought was determined by using SPI values to predict Streamflow Drought Index (SDI) values with ANN. Also, the SPI and SDI were used as the meteorological and hydrological drought indices, respectively, in conjunction with Feed Forward Neural Networks (FFNN), in ANN models. For this purpose, three rainfall and three flow gauging stations located in the Yesilirmak River Basin of Turkey were selected as the study units. The SPI and SDI values for the stations were calculated in order to create ANN estimation models. Different ANN forecasting models for SPI and SDI were trained and tested. In addition, the effects of the spatial distribution of precipitation on flows were determined by using the Thiessen Method to develop the SDI prediction model. The results generated by the ANN prediction models and resulting values were compared and the performances of the models were analyzed. The combination of ANN and SPI predicted meteorological drought with high accuracy but the combination of ANN and SDI was not as good in predicting hydrological drought.

**Keywords:** ANN, Drought Indices, Hydrological Drought, Meteorological Drought, Yesilirmak Basin, Turkey.



## INTRODUCTION

Drought, an environmental disaster, can have worldwide impacts, and occur in almost all climatic zones and is associated with water shortage (Mishra & Singh, 2010), and causes the deaths of many thousands of people. As drought is linked to many factors like climate and regional properties, defining it is hard and is still the subject of debate. Setting the debate aside, the effects of drought are being increasingly felt worldwide. Drought has major effects, especially on the availability of water resources, agriculture, forestry, hydro-electricity generation, health and socio-economic activities. The effects of drought on water resources are seen in low soil moisture and river flows, reduction in reservoir levels and less groundwater storage (Tallaksen & Van Lanen, 2004). Generally, humans become aware of drought when faced with water shortage (Hejazizadeh & Javizadeh, 2011). Drought is evident when the water requirements of plants and water supplies to city dwellers are not being adequately provided because the amount of water entering dams is insufficient to meet the demand (Salinger, 1995). It is not easy to detect the beginning of a drought which can arise suddenly, spread quickly and end in different ways (Wilhite, 2000).

Describing and monitoring drought is also difficult. The criteria that different researchers take into account in drought analysis sometimes differ (Guttman, 1998). Some of the criteria are rainfall-temperature ratio, precipitation-evaporation rate, precipitation regime and vegetation. Inconsistencies in approaches to make drought analysis generate differences in the calculation of the water balance sheet. To minimize inconsistencies and understand their origins, several methods should be used in drought analysis. To that end, researchers have employed more than one drought index. The best known of these are the De Martonne Index, the Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Palmer, 1960) and the Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). Guttman (1998) compared the performance of the use of PDSI and SPI across the United States. The results of this study indicated that indices based on precipitation were simpler and more successful in predicting drought. SPI-1 deals with soil moisture, while SPI-3 examines the flow conditions of small rivers (White & Walcott, 2009). On the other hand, the use of SPI-6, SPI-9, SPI-12 and SPI-24 are generally based on the flows in larger rivers, reservoir levels and even groundwater (Merkoci, Mustaqi, Mucaj, & Dvorani, 2013).

Mishra and Singh (2011) examined the definition of drought and compared the strengths and weaknesses of different indices. They defined the degree, intensity, sharpness and return time of drought with different indices and reported that the best results for the SPI method were obtained with the use of gamma distribution because rainfall fits it better than other distributions. Mishra and Singh (2011) thoroughly reviewed various aspects of methods and models used for the prediction of drought. They examined different drought indices for different drought types, namely agricultural, hydrological meteorological and socioeconomic. Based on these investigations, they proposed the use of the PDSI for agricultural drought and the SPI for meteorological drought. Soleimani, Ahmadi, and Zehtabian (2013) examined drought in a semi-arid region of Iran with three methods, namely the SPI, Modified China Z-Score and Rainfall Deciles. They reported that the best results were generated with SPI. In a study from the southern hemisphere, Deo and Sahin (2015) examined the usefulness of Extreme Learning Machine (ELM) and ANN models to predict the Effective Drought Index (EDI) in eastern Australia with the data of 1957 to 2008 and the monthly EDI of the period 2009 to 2011. The authors reported that ELM showed excellent performance in comparison to the ANN model.

Nalbantis (2008) reported a new index named the Streamflow Drought Index (SDI), which is a simpler and more effective index than other hydrological drought indices. This new method, which was first applied to the Evinos and Boeotikos Kephisos basins in Greece, allows the identification of drought conditions with non-stationary models, such as in the Markov chain. In a study from Iran in western Asia, Tabari, Abghari and Talaee (2012) calculated the SDI-3, SDI-6, SDI-9 and SDI-12. In their study, which was based on the analysis of the hydro-meteorological data from 14 different stations in the north-west of the country generated between 1975 and 2009, it was concluded that there was a high level of drought at almost every station, and in the last 12 years of that period, the drought reached maximum intensity. In a Chinese study, Hong, Guo, Zhou, and Xiong (2015) conducted a drought analysis of the Yangtze River Basin for the years 1882 to 2009 by using the SDI-12 and stated that the model was very successful in predicting drought.

Tanoglu (1943) conducted one of the first studies on drought in Turkey. A drought map was prepared by using temperature and precipitation values based on the De Martonne method. Following that study, Erinç (1949) investigated drought in Turkey with the Thornwaite method, which uses monthly precipitation, temperature and evaporation values.

The same author applied the index developed from the rainfall and evaporation rates at 80 meteorological stations in Turkey to develop a climate classification system. Fifty-three years later, Sirdas (2002) used SPI to analyze the spatial and temporal records of 60 weather stations in Turkey for the period 1930 to 1990. The study revealed that the southern, western, and eastern regions are drier than the north-eastern and north-western regions. Sonmez, Komuscu, Erkan, and Turgu (2005) also investigated drought spatially and temporally in Turkey with SPI and reported severe droughts over short time periods (quarterly) in south-eastern and eastern Anatolia. Later, Keskin, Terzi and Taylan (2009) modeled SPI-3, SPI-6, SPI-9 and SPI-12 values with the Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) models and fuzzy logic models. They used the index values for the precipitations of the current month and the previous month as the input variables and modeled the current month's SPI value as the output variable. The authors reported that SPI-12 and ANFIS models showed better agreement than fuzzy logic models. Bacanlı, Firat, and Dikbas (2009) also investigated the application of the ANFIS method to the prediction of drought. Different ANFIS models were created by using SPI values generated from the mean monthly rainfalls at 10 stations in Central Anatolia. They compared the best results of the ANFIS and FFNN models and determined that ANFIS can be successfully applied to the prediction of drought. Oguztürk (2010) used SPI to investigate the occurrence of drought by analyzing the data generated by 14 meteorological stations in the Kizilirmak River Basin between 1950 and 2007. By using the SPI values for all the months back to 1950 for ANN modeling, the SPI values for 2007 were estimated. The authors stated that the ANN model estimates for the first three months of the year were close to the actual data, but they deviated from the actual results for the following months. Durdu (2010) investigated meteorological drought in the Buyuk Menderes River Basin between 1975 and 2006 by using SPI. The ARIMA and Seasonal-ARIMA models were applied to drought detection, with ARIMA modeling successfully predicting drought two months in advance. Separately, Oguzturk and Yildiz (2016) determined the Theissen coefficients for the Kirsehir, Nevsehir, Kayseri, Gemerek, Sivas and Zara meteorological stations, which are in the catchment of the Hirfanli Dam, and then calculated their SPI values for the period 1950 to 2013. They stated that the reason for using the SPI is that only the precipitation data are needed and that by using them, drought could be successfully predicted for different time periods. Based on their research results, Oguzturk and Yildiz (2016) further reported that the Hirfanli Dam Basin is vulnerable to drought. Selcuk (2017) studied drought by using hydrological and meteorological drought indices and reported that these two indices yielded partially compatible results. In addition, models were created with WEKA to estimate the SDI and flows by using meteorological parameters independent of SDI. However, modeling did not produce satisfactory results. Altin, Saris, and Altin (2019) studied hydrological drought with the SDI at eight river-gauging stations in the Eastern Mediterranean in Turkey, namely, between 1972 and 2014 (4 stations), between 1973 and 2015 (2 stations), and between 1969 and 2011 (2 stations). SDI analyses showed that the number of drought years was highest in the 3-month period between October and December. Many researches aiming at the determination and prediction of hydrological and meteorological drought are available for various geographies of the world (Masinde, 2014; Buckland, Bailey, & Thomas, 2019; Poornima & Pushpalatha, 2019; Azimi & Moghaddam, 2020; Erogluer & Apaydin, 2020; Shin, Huang, Dirmeyer, Halder & Kumar, 2020; Taylan, Terzi & Baykal, 2021).

Against that background of the use of different approaches to the global problem of drought and its prediction, the basic aim of this study was to bring a different perspective to drought prediction by investigating the applicability of ANN to SPI and SDI modeling. The estimation of the SDI, in combination with ANN, is the novel element in this study. Moreover, the use of the SDI was applied for the first time to the Yesilirmak River Basin in Turkey.

## **MATERIAL**

The Yesilirmak River, which is 519 km in length, is a major water resource in the north-east of Turkey. Its drainage basin covers an area of 36,114 km<sup>2</sup> or approximately 5% of the nation's surface area. It originates in the Kose Mountains in the south-west of Susehri District of Sivas Province. The average annual rainfall across the basin is 646 mm. The average monthly rainfall is around 50 mm, which increases to 60 to 65 mm in winter. The lowest average rainfall is received in the summer months, namely 26.5 and 24.6 mm in July and August, respectively. The average annual temperature in the basin is around 12°C. Temperatures in the seaside areas are relatively high compared to the interior areas. The average basin water yield is 5.1 L/sec/km<sup>2</sup> and the average annual flow is 5.80 km<sup>3</sup>. The data from nine meteorological stations, and three flow gauging stations (Cirdak, Gemerek and Seyhoglu), in the Yesilirmak River basin, were used for this study. The most important factor in the selection of these flow observation stations is the absence of any dam effect on their upstream.

The monthly rainfall records available from the meteorological stations covered the period between 1970 and 2015. The SPI values were calculated on the basis of these data. In addition, the monthly flow data from the gauging stations for the period 1970 to 2011 were used to calculate the SDI.



Figure 1. The geographical location of the Yesilirmak River Basin (TUBITAK, 2010)

Table 1. Statistical details of stations used in this study

	Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m.)	Min.	Max.	Mean	SD	Variance	Skewness	Kurtosis
Weather Stations (mm)	Corum	40.5461	34.9362	776	0.00	220.10	37.23	28.70	823.53	1.39	4.45
	Gumushane	40.4598	39.4653	1216	0.00	141.90	38.51	27.14	736.51	0.82	0.52
	Samsun	41.3435	36.2553	4	0.00	269.80	58.35	38.86	1510.18	1.36	3.23
	Sivas	39.7437	37.0020	1294	0.00	139.20	36.99	28.48	811.19	0.83	0.42
	Susehri	40.1623	38.0752	1164	0.00	162.20	34.68	26.83	720.04	0.99	1.16
	Tokat	40.3312	36.5577	611	0.00	141.10	36.69	28.06	787.38	0.90	0.57
	Yozgat	39.8243	34.8159	1301	0.00	192.30	49.19	37.84	1432.13	0.83	0.44
	Zile	40.2960	35.8905	719	0.00	158.10	37.49	29.69	881.68	1.12	1.47
	Zara	39.8928	37.7473	1338	0.00	171.40	43.22	33.74	1138.06	0.93	0.60
Flow Gauging Stations (m <sup>3</sup> /sec)	Cirdak	40.0029	36.0847	1040	0.00	29.10	3.90	4.76	22.64	2.23	5.60
	Gomeleonu	40.1822	37.0724	865	1.01	103.00	18.15	20.31	412.38	1.70	2.28
	Seyhoglu	40.2706	35.2503	530	0.00	41.90	6.24	7.29	53.21	2.10	4.85

## METHODOLOGY

### Standard Precipitation Index (SPI)

SPI developed by McKee et al. (1993, 1995). SPI is used for the modelling of rainfall data, and is obtained by dividing the difference between the precipitation and mean of precipitation in a specific period by the standard deviation (Eq. (1)) and the SPI classes are shown in Table 2 (McKee et al., 1993).

$$SPI = \frac{x_j - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

**Table 2.** Drought classification with SPI values (McKee et al., 1993)

SPI	Drought category
$2 \leq \text{SPI}$	Extremely wet
$1.50 \leq \text{SPI} < 2.0$	Very wet
$1.0 \leq \text{SPI} < 1.50$	Moderately wet
$-1.0 \leq \text{SPI} < 1.0$	Near normal
$-1.50 < \text{SPI} \leq -1.0$	Moderately dry
$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.50$	Severely dry
$-2 \geq \text{SPI}$	Extremely dry

Thom (1958) proposed Gamma distribution for historical precipitation time series (Yacoub & Tayfur, 2020). Probability density function of Gamma distribution is defined as (Eq. (2)) (Yacoub & Tayfur, 2020):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}; x, \alpha, \beta > 0 \quad (2)$$

where x is the amount of rainfall,  $\Gamma(\alpha)$  is the gamma function and  $\alpha$  is shape,  $\beta$  is scale parameter. Shape and scale parameters can be estimated as (Eqs. (3-5)) (Bacanli, 2017; Yacoub & Tayfur, 2020):

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (4)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \sum \frac{\ln(x)}{n} \quad (5)$$

Here, n refers to the number of rainfall observations, with cumulative probability distribution function given below (Eq. (6)) (Bacanli, 2017):

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (6)$$

Then cumulative probability function is calculated for a given period (1, 2, 6, 9, 12, 24 months). If the precipitation data series have zero values, then cumulative probability becomes as follows (Eq. (7)):

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (7)$$

The cumulative probability value H(x) is converted into a Z variable with the standard normal random value showing the SPI with a mean value of zero and variance that equals to 1 (Abramowitz & Stegun, 1965; Yacoub & Tayfur, 2017). H(x) is the value of the SPI. Normalization of the SPI values enables the prediction of temporal and spatial variations in the precipitation series for that station (McKee et al., 1993; Guttman, 1999).

### Streamflow Drought Index (SDI)

The SDI method was developed by Nalbantis (2008). It is hypothesized that a series of monthly streamflow volumes,  $(Q_{(i,j)})$  is available, with i referring to the hydrological year and j denoting the month in that year, that is, October - September (Gumus & Algin, 2017). Based on this, cumulative volumes are shown in Eq. (8):

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12k = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$



Here,  $V_{(i,k)}$  refers to the cumulative streamflow volume of  $i$ th hydrological year, and  $k$ th reference period (Nalbantis, 2008; Nalbantis & Tsakiris, 2009).

Based on the cumulative streamflow volumes,  $V_{(i,k)}$ , the SDI is defined for the  $i$ th hydrological year, as follows (Eq. (9)):

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

From the mean ( $\bar{V}_k$ ), and standard deviation,  $S_k$ , of the cumulative stream flow volume, the SDI for  $k$ th reference period within  $i$ th hydrological year can be calculated via Equation 9, with the truncation level set at  $V_k$ , although other values can be used.

The SDI has five categories ranging between extreme wet and extreme drought, as given in Table 3 (Nalbantis, 2008).

**Table 3.** Drought classification with SDI values (Nalbantis, 2008)

State	SDI	Drought category
0	$0 \leq SDI$	Non-drought
1	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	Mild drought
2	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	Moderate drought
3	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	Severe drought
4	$SDI < -2.0$	Extreme drought

## DROUGHT FORECASTING WITH ANN

### Input variables

In the present study, the values of SPI for the previous months were used to generate a drought estimation model with the Feed Forward Neural Networks (FFNN) in ANN method, with the SPI outputs for 1, 3, 6, 12 and 24 months included. To do this, various models were used for each SPI output of 1, 3, 6, 12 and 24 months. Also, one model was produced for predicting the SDI outputs for the 3-, 6-, 9- and 12-month periods. The datasets for all stations were divided into three subsets, namely training, validating, and testing. The training dataset included data records between 1970 and 2001 for SPI, and 1970 to 1999 for SDI. The validation dataset was 2002 to 2008 for SPI, and 2000 to 2005 for SDI. The testing dataset consisted of data records 2009 to 2015 for SPI, and 2006 to 2011 for SDI. The models were tested via the evaluation of a dataset not employed in the training process to have a more reliable evaluation and comparison.

Detailed explanations and functioning of FFNN's are available in the literature (Lowe & Tipping, 1996; Zhang, Patuwo, & Hu, 1998; Dawson & Wilby, 2001; Firat & Gungor, 2004; Şen, 2004; Dogan, Isik, & Sandalci, 2007; Cigizoglu, 2008; Feng and Hong, 2008; Oyeboode & Stretch, 2019; Demir & Ulke Keskin, 2020).

### Model Structures

One of the most important decisions in the development of a satisfactory forecasting model is the selection of the appropriate input variables. In the present study, different combinations of the antecedent SPI values of stations were used to develop the appropriate input structures, as shown in Table 4.

**Table 4.** The structures of drought forecasting models for the Yesilirmak River Basin

Model	Input structure	Output
M1	SPI(t-1)	SPI(t)
M2	SPI(t-1) SPI(t-2)	SPI(t)
M3	SPI(t-1) SPI(t-2) SPI(t-3)	SPI(t)
M4	SPI(t-1) SPI(t-2) SPI(t-3) SPI(t-4)	SPI(t)
M5	SPI(t-1) SPI(t-2) SPI(t-3) SPI(t-4) SPI(t-5)	SPI(t)
M6	SPI(t)	SDI(t)



where SPI(t)/SDI(t) represents the SPI/SDI values at time (t), and SPI(t-1), ..., SPI(t-n) are the antecedent SPI values respectively at times (t-1), ..., (t-n).

The performances of the developed FFNN models were evaluated on the basis of statistical criteria (e.g. the Correlation Coefficient (R) (Eq. (10)), and Efficiency, (E) (Eqs. (11-13)), (Nash & Sutcliffe, 1970; Kitanidis & Bras, 1980), and the Root Mean Square Error (RMSE) (Eq. (14)).

$$R = \frac{\sum_{t=1}^N (Y_{obs(t)} - \overline{Y_{obs}})^2 \cdot (Y_{for(t)} - \overline{Y_{for}})^2}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Y_{obs(t)} - \overline{Y_{obs}})^2 \cdot (Y_{for(t)} - \overline{Y_{for}})^2}} \quad (10)$$

$$E = \frac{E_1 - E_2}{E_2} \quad (11)$$

$$E_1 = \sum_{t=1}^N (Y_{obs(t)} - \overline{Y_{obs}})^2 \quad (12)$$

$$E_2 = \sum_{t=1}^N (Y_{for(t)} - Y_{obs(t)})^2 \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Y_{obs} - Y_{for})^2}{N}} \quad (14)$$

where Yfor is the forecasted SPI/SDI value, Yobs is the observed SPI/SDI value, (Yfor ) is the average of the forecasted SPI/SDI values, and (Yobs ) is the observed SPI/SDI value.

Values of R and E close to 1.0 indicate good model performance. The RMSE is used often as a measure of the difference of values predicted by a model or an estimator. Such a difference is named “residual”. Theoretically, if this value were to equal zero, the model would represent the perfect fit, which is not possible (Firat, 2008; Firat & Gungor, 2009).

## RESULTS AND DISCUSSION

In the first stage of this study, five models with various input variables were trained and tested with the FFNN method. The performances of the models for SPI forecasting were then compared. Ultimately, the best model was identified, based on the criteria selected for performance evaluation. The performances of the best fit FFNN models for each SPI value in Gumushane, Samsun and Sivas stations are shown in Table 5. The purpose of choosing these three stations is that Gümüşhane meteorological station is located at the upstream of Yeşilirmak River basin, Sivas meteorological station is located in the middle of the basin and Samsun meteorological station is located downstream of Yeşilirmak River basin.

**Table 5.** The performances of the best fit models for SPI-1 for three meteorological stations in the Yesilirmak River Basin, Turkey

	Station	Training R	Validating R	R	Testing Set RMSE	E
SPI-1	Gumushane (M4)	0.46	0.20	0.46	0.7024	0.16
	Samsun (M1)	0.21	0.09	0.20	0.9200	0.02
	Sivas (M5)	0.55	0.48	0.60	0.6356	0.20
SPI-3	Gumushane (M4)	0.84	0.74	0.83	0.3493	0.59
	Samsun (M3)	0.76	0.72	0.73	0.5135	0.49
	Sivas (M4)	0.84	0.82	0.87	0.2715	0.68
SPI-6	Gumushane (M3)	0.88	0.85	0.89	0.2090	0.78
	Samsun (M2)	0.82	0.76	0.85	0.3412	0.68
	Sivas (M2)	0.87	0.90	0.89	0.2627	0.72
SPI-12	Gumushane (M5)	0.91	0.90	0.94	0.2394	0.73
	Samsun (M4)	0.87	0.89	0.92	0.2516	0.75
	Sivas (M4)	0.90	0.89	0.93	0.2195	0.82
SPI-24	Gumushane (M4)	0.96	0.96	0.96	0.0200	0.97
	Samsun (M3)	0.94	0.93	0.93	0.0663	0.92
	Sivas (M4)	0.95	0.94	0.95	0.0975	0.90

As seen in Table 5, the models showed major variations, based on the three performance criteria. The best results were generated with the Gumushane M4, SPI24 model which had the lowest value of RMSE at 0.0200, the highest efficiency at 0.97, and the highest correlation at 0.96. The overall results from this study indicate that the results of ANN modeling are better if long-term SPI values are used. In Figs. 2-4, the time series graphs for the best model results and real SPI values for the Samsun, Gumushane and Sivas meteorological stations are given. The SPI-1 results had the worst performance in all cases.

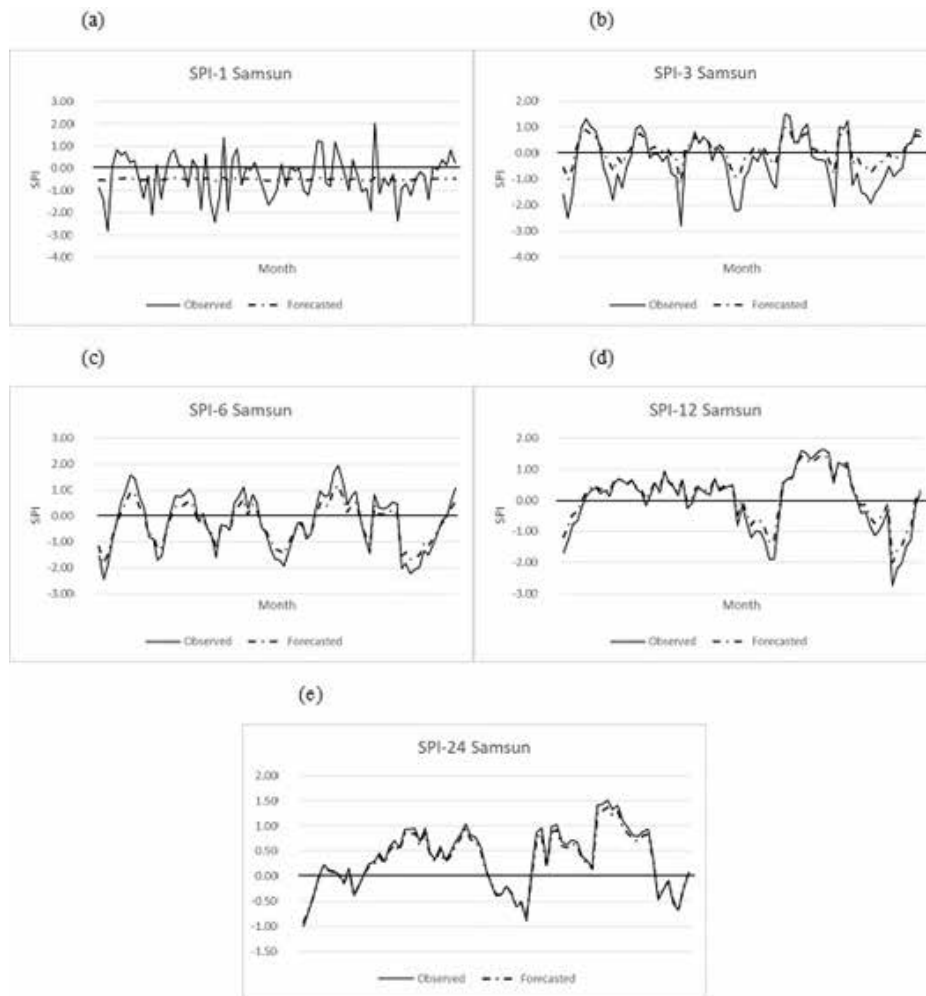


Figure 2. The testing data results of best fit models for the Samsun SPI

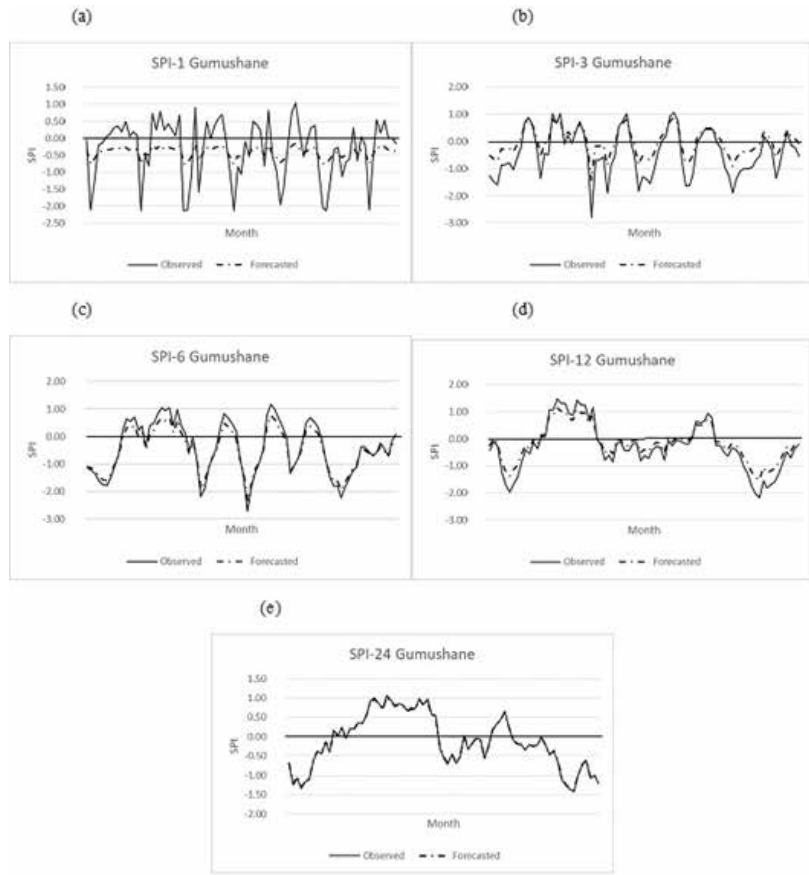


Figure 3. The testing data results of best fit models for the Gumushane SPI

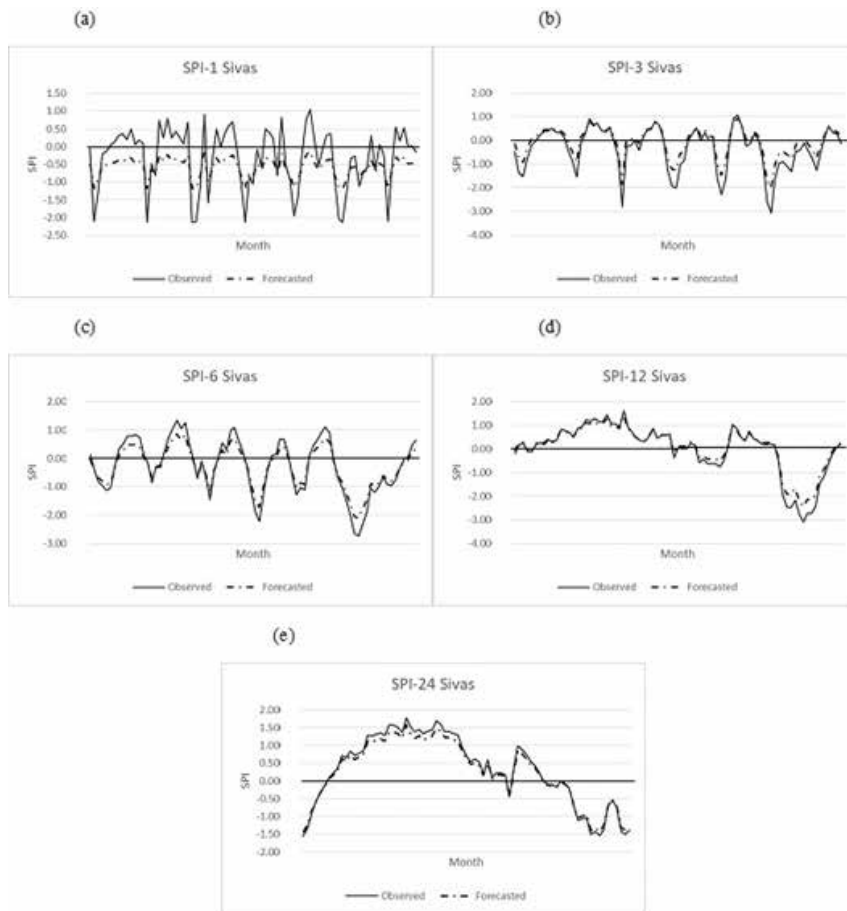


Figure 4. The testing data results of best fit models for the Sivas SPI

In Figs. 2-4, the series almost overlap for the 12 and 24-month SPI time intervals for Samsun (Figs.2a, 2b), Gumushane (Figs.3a, 3b) and Sivas (Figs.4a-4b).

In the second part of this study, the aim was to estimate the SDI values by using SPI (M6). The relationships between the recordings at the meteorological stations and the flows at the three flow observation stations (Gomelonü, Cirdak and Seyhoglu) were calculated with the Thiessen method (Eq. (15)):

$$P_{moy} = \frac{\sum_i(W_i \sum_T P_i(t))}{\sum_i W_i} \quad (15)$$

where  $P_{moy}$  is the mean areal rainfall,  $W_i$  is the weighting factor of  $i$  and is the rainfall depth measured at time  $t$  at gauge  $i$ . The weighting factor ( $W_i$ ) of gauge  $i$  is calculated by using the Thiessen polygons (Eq. (16)) (Boyogueno, Mbessa & Tatiense, 2012):

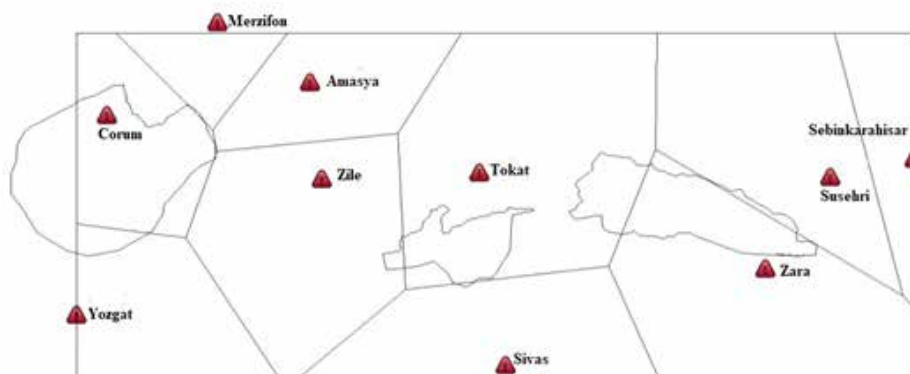
$$W_j = \frac{a_{i,j}}{A_i} \quad (16)$$

where  $a_{(i,j)}$  is the surface intersection of the “polygon  $j$ ” and “sub- basin  $i$ ”; and  $A_i$  is the total area of sub-basin  $i$  (Boyogueno et al., 2012).

The Thiessen coefficients are given in Table 6 and the Thiessen areas of the stations in the basin are presented in Fig. 5. After the contributions of flows at the individual meteorological stations to total flow were determined, the SPI values were calculated for intervals of 3, 6, 9 and 12 months. These new index values were used as inputs to the FFNN model, with the results given in Table 6.

**Table 6.** Thiessen coefficients for the meteorological stations

		Meteorological Stations						
		Thiessen Coefficient						
		Corum	Yozgat	Zara	Tokat	Susehri	Zile	Sivas
Flow Gauging Stations	Gomeleonu	-	-	67.5%	28.3%	4.2%	-	-
	Cirdak	-	-	-	93%	-	6.3%	0.7%
	Seyhoglu	89.2%	10.8%	-	-	-	-	-

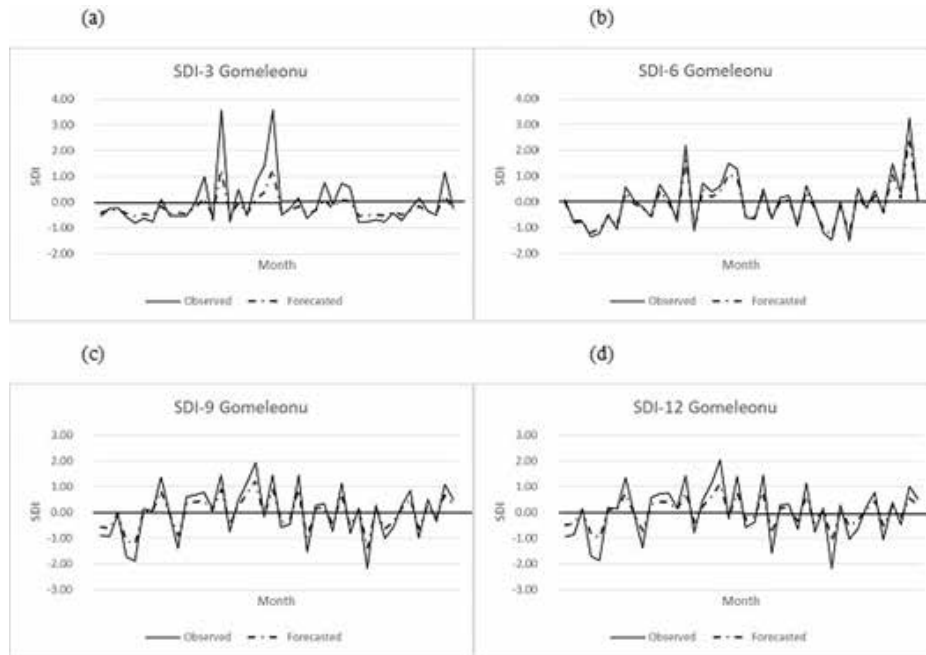


**Figure 5.** Rainfall gauging stations and Thiessen areas

**Table 7.** The performances of modelling for SPI to SDI for three flow gauging station in Yesilirmak River basin, Turkey

	Station	Training R	Validating R	R	Testing Set RMSE	E
SPI-3	Gomeleonu	0.85	0.56	0.62	0.6196	0.47
	Cirdak	0.60	0.40	0.50	0.7134	0.31
	Seyoglu	0.72	0.76	0.61	0.5374	0.48
SPI-6	Gomeleonu	0.92	0.83	0.81	0.2304	0.77
	Cirdak	0.74	0.76	0.72	0.4697	0.50
	Seyoglu	0.66	0.71	0.60	0.5637	0.43
SPI-9	Gomeleonu	0.82	0.72	0.79	0.3659	0.63
	Cirdak	0.77	0.75	0.71	0.3686	0.63
	Seyoglu	0.78	0.50	0.69	0.4963	0.50
SPI-12	Gomeleonu	0.74	0.78	0.75	0.3376	0.53
	Cirdak	0.73	0.72	0.68	0.5072	0.47
	Seyoglu	0.58	0.74	0.74	0.6916	0.30

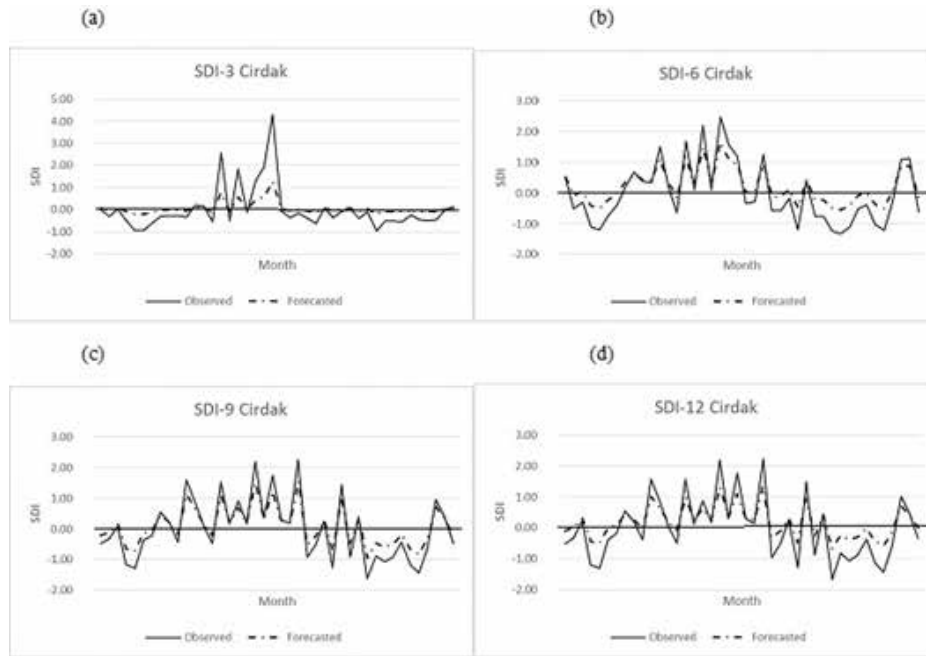
In Table 7, the model SDI-6(M6) for the Gomeleonu station had the best performance. This model had the best efficiency, correlation rates and the lowest RMSE values. As can be seen in Fig. 6, the time-series graph of the model with the best performance is more compatible than the other conversion of SPI to SDI models.



**Figure 6.** The results of testing data for Gomeleonu SDI

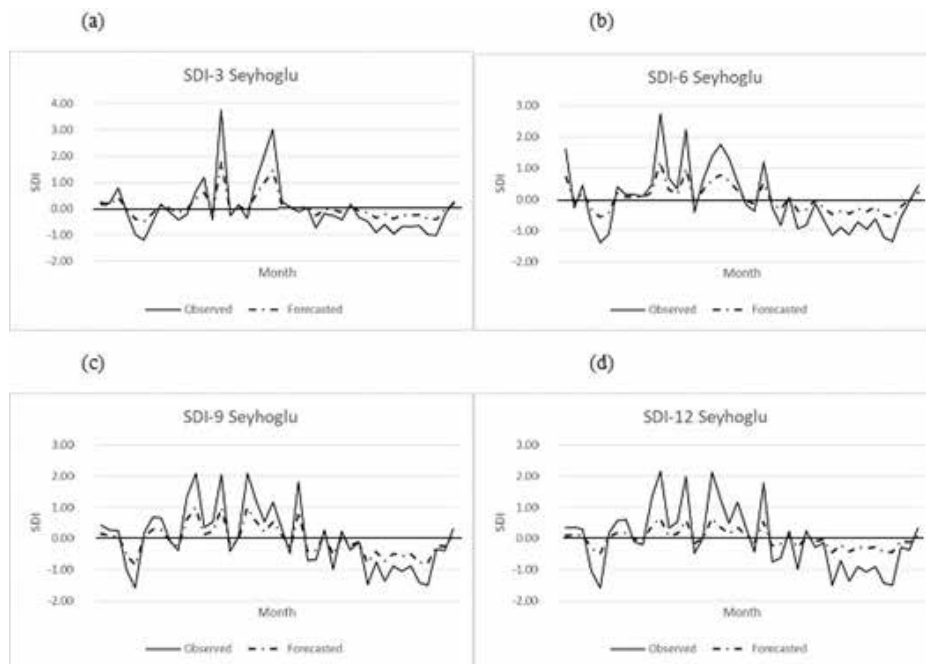
The best efficiency and RMSE results for Cirdak are for the 9-month period (SDI-9, M6) but the highest correlation rate is seen for SDI-6(M6) (Table 10). In addition, the time series adaptation of SDI-9(M6) is quite high compared to other Cirdak SPI to SDI conversion results (Fig. 6).





**Figure 7.** The results of testing data for Cirdak SDI

In Table 7, the best results for Seyhoğlu are for the modeling of the 9-month period (SDI-9, M6). This model had better correlation, efficiency and RMSE than the other Seyhoglu SDI-6 models. Moreover, the time-series graph showed less consistency than all the other SPI to SDI modeling results (Fig. 8d).



**Figure 8.** The results of testing data for Seyoglu SDI

As can be seen in Figs. 6-8, the developed models were not successful in capturing peak SDI values. This situation is more evident in low efficiency models, suggesting that low efficiency models cannot effectively capture peak SDI values.

## CONCLUSION

SPI is among the common methods used to predict drought. This study investigated the applicability and capability of FFNN methods, in combination with SPI, for drought forecasting by employing a series of independent variables.

To determine the applicability of the ANN method to drought forecasting, nine rainfall gauging stations located in the Yesilirmak River Basin in Turkey were identified as the study units. Different FFNN forecasting models for SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-12 and SPI-24 were trained and tested. The results and observations from the developed models were compared and evaluated on the basis of their performance in training and testing sets. The models SPI-12 and SPI-24 were more successful than the models for shorter periods, namely SPI-1, SPI-3 and SPI-6, in predicting long-term drought. In essence, this study has demonstrated that the FFNN method can successfully estimate SPI and hence can be applied effectively to drought prediction.

In the second section, the SDI values were estimated with the FNN model from the SPI values. For this purpose, 10 rainfall and three flow gauging stations in the Yesilirmak River basin were used. In the SDI estimation produced using FFNN, the contributions of the catchment areas of rainfall stations to the flow gauging stations were calculated with the Theissen method. The SPI method was applied to the stations' rainfall data. These new values were used as input for SDI estimation. The results of FFNN did not yield very successful predictions, except for the Gomeleonu station. The main reason appears to be that the ten rainfall stations did not adequately record both the amount of precipitation in the catchment areas of the flow gauging stations and the uncertainties in the rainfall-runoff relationship. The Theissen coefficients were also calculated from the limited amount of information generated by these stations. To the authors' knowledge, no other study has applied SDI estimation based on SPI to the Yesilirmak River Basin.

More broadly, the further development and use of this model are potentially useful in drought prediction in different environments. Global climate change means that more extreme climate events, including drought, are occurring with more regularity and more intensity. The current study demonstrated that FFNN can be used in combination with SPI to effectively predict meteorological drought in the Yesilirmak River Basin in northern Turkey. This novel method can assist water resource managers and representatives of bulk water users, including cities and regions, to more effectively plan for the availability of less water and hence mitigate some of the negative effects of drought.

## Authors Contribution

ABH implemented calculations. UZ and AUK wrote manuscript.

## REFERENCES

- Abramowitz, M., & Stegun, I. (1965). Handbook of mathematical functions. National bureau of standards, applied mathematics series-55. Washington, D.C.
- Altın, T. B., Sarış, F., & Altın, B. N. (2019). Determination of drought intensity in Seyhan and Ceyhan River Basins, Turkey, by hydrological drought analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(1-2), 95-107. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02957-y>
- Azimi, S., & Moghaddam, M. A. (2020). Modeling Short Term Rainfall Forecast Using Neural Networks, and Gaussian Process Classification Based on the SPI Drought Index. *Water Resour Manage* 34(4), 1369-1405. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02507-6>
- Bacanli, U. G., Firat, M., & Dikbas, F. (2009). Adaptive neuro-fuzzy inference system for drought forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 1143-1154. <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0288-5>
- Bacanli, U. G. (2017). Trend analysis of precipitation and drought in the Aegean region, Turkey. *Meteorological Applications*, 24(2), 239-249. <https://doi.org/10.1002/met.1622>
- Boyogueno, S. H., Mbessa, M., & Tatiense, T. T. (2012). Prediction of flow-rate of Sanaga Basin in Cameroon USING HEC-HMS hydrological system: application to the Djerem sub-basin at Mbakaou. *Energy Environ Res*, 2(1), 205-216. <https://doi.org/10.5539/eer.v2n1p205>
- Buckland, C. E., Bailey, R. M., & Thomas, D. S. G. (2019). Using artificial neural networks to predict future dryland responses to human and climate disturbances. *Sci Rep*, 9, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40429-5>
- Cigizoglu H.K. (2008). Artificial Neural Networks In Water Resources. In: Coskun H.G., Cigizoglu H.K., Maktav M.D. (eds) *Integration of Information for Environmental Security*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6575-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6575-0_8)
- Dawson, C. W. & Wily, R. L. (2001). Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 25(1), 80-108. <https://doi.org/10.1177/030913330102500104>
- Demir, V. & Ülke Keskin, A. (2020). Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Yükseklik Modellemesi (Samsun-Mert Irmağı Havzası Örneği). *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 6 (1), 54-61.

- Deo, R. C., & Sahin, M. (2015) Application of the extreme learning machine algorithm for the prediction of monthly Effective Drought Index in eastern Australia. *Atmospheric Research*, 153, 512-525. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.016>
- Dogan, E. , Isik, S. & Sandalci, M. (2007). Günlük Buharlaşmanın Yapay Sinir Ağları Kullanarak Tahmin Edilmesi. *Teknik Dergi*, 18(87), 4119-4131.
- Durdu, O. F. (2010). Application of linear stochastic models for drought forecasting in the Buyuk Menderes river basin, Western Turkey. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24, 1145-1162. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0366-3>
- Eriç, S. (1949). The climates of Turkey according to Thornthwaite's classifications. *Annals of the Association of American Geographers*, 39, 26-46.
- Erogluer, T. A., & Apaydin, H. (2020). Estimation of Drought by Streamflow Drought Index (SDI) and Artificial Neural Networks (ANNs) in Ankara-Nallihan Region. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(2), 348-357. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i2.348-357.3045>
- Feng, L. & Hong, W. (2008). On hydrologic calculation using artificial neural networks. *Applied Mathematics Letters*, 21(5), 453-458. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2007.06.004>
- Firat, M. & Güngör, M. (2004). Askı Madde Konsantrasyonu ve Miktarının Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi. *Teknik Dergi*, 15(73), 3267-3282.
- Firat, M. (2008). Comparison of Artificial Intelligence Techniques for river flow forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 123-139. <https://doi.org/10.5194/hess-12-123-2008>
- Firat, M., & Gungor, M. (2009). Generalized Regression Neural Networks and Feed Forward Neural Networks for prediction of scour depth around bridge piers. *Advances in Engineering Software*, 40(8), 731-737. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.12.001>
- Gumus, V., & Algin, H. M. (2017). Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan-Ceyhan River Basins, Turkey. *Meteorological Applications*, 24(1), 62-73. <https://doi.org/10.1002/met.1605>
- Guttman, N. B. (1998). Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113-121. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Hejazizadeh, Z., & Javizadeh, S. (2011). Introduction to drought and its indices. Iran: Samt Publications.
- Hong, X., Guo, S., Zhou Y., & Xiong, L. (2015). Uncertainties in assessing hydrological drought using streamflow drought index for the upper Yangtze River basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29, 1235-1247. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0949-5>
- Keskin, M. E., Terzi, O., Taylan, E. D., & Kucukyaman, D. (2009). Meteorological drought analysis using data-driven models for the Lakes District, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 54(6), 1114-1124. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.6.1114>
- Kitanidis, P. K., & Bras, R. L. (1980). Real time forecasting with a conceptual hydrological model. 2. Applications and results. *Water Resour Res*, 16(6), 1034-1044. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p01034>
- Lowe, D., & Tipping, M. (1996). Feed-forward neural networks and topographic mappings for exploratory data analysis. *Neural Comput & Applic*, 4(2), 83-95. <https://doi.org/10.1007/BF01413744>
- Masinde, M. (2014). Artificial neural networks models for predicting effective drought index: Factoring effects of rainfall variability. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 19(8), 1139-1162. (2014). <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9464-0>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th. Conference on Applied Climatology, Anaheim, California.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995, January). Drought Monitoring with Multiple Time Scales. 9th Conference on Applied Climatology, Dallas. Texas.
- Merkoci, A. L., Mustaqi, V., Mucaj, L., & Dvorani, M. (2013). Drought and implementation of Standardised Precipitation Index (Spi) on The Albanian Territory. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(1), 161-166.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling- a review. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157-175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European Water*, 23(24), 67-77.
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Oguzturk, G. (2010). A drought analysis of the Kizilirmak basin using the standardized precipitation index (SPI) method and drought estimation using the artificial neural networks method. MSc Thesis, Kirikkale University, Kirikkale, Turkey.

- Oguztürk, G., & Yıldız, O. (2016). Assessing hydrological responses to droughts in the Hirfanli dam basin, Turkey. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 3(5), 116-123.
- Palmer, W. C. (1960). *Meteorological Drought*. Research Paper No.45, US.
- Oyebode, O. & Stretch, D. (2019). Neural network modeling of hydrological systems: A review of implementation techniques. *Natural Resource Modeling*, 32(1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/nrm.12189>
- Poornima, S., & Pushpalatha, M. (2019). Drought prediction based on SPI and SPEI with varying timescales using LSTM recurrent neural network. *Soft Comput*, 23(18), 8399-8412. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04120-1>
- Salinger, J. (1995). Conditions leading to drought in New Zealand. *Water Atmosphere*, 3(1), 11-12.
- Selçuk, D. (2017). Drought analysis and estimation in Kizilirmak basin using hydrometeorological parameters. Master's thesis, Ondokuz Mayıs University, Samsun, Turkey.
- Shin, C. S., Huang, B., Dirmeyer, P. A., Halder, S., & Kumar, A. (2020). Sensitivity of U.S. Drought Prediction Skill to Land Initial States. *Journal of Hydrometeorology*, 21(12), 2793-2811. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0025.1>
- Sırdas, S. (2002). Meteorological drought modelling and application to Turkey. Doctoral thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey.
- Soleimani H, Ahmadi H, & Zehtabian G. 2013. Comparison of temporal and spatial trend of SPI, DI and CZI as important drought indices to map using IDW Method in Taleghan watershed. *Annals of Biological Research*, 4(6), 46-55.
- Sönmez, F. K., Komuscu, A. U., Erkan, A., & Turgu, E. (2005). An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Natural Hazards*, 35(2), 243-264. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-5704-7>
- Şen, Z. (2004). *Yapay Sinir Ağları İlkeleri*. İstanbul: Su Vakfı Yayınları.
- Tabari, H., Abghari, H., & Talaei, H. (2012). Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. *Hydrological Processes*, 26, 3351-3361. <https://doi.org/10.1002/hyp.8460>
- Tallaksen, L. M., & Van Lanen, H. A. J. (2004). *Hydrological Drought: Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier, Netherlands.
- Tanoglu, A. (1943). Indices D'aridite De La Turquie. *Turkish Geographical Review*, 1, 36-41.
- Taylan, E.D., Terzi, Ö., & Baykal, T. (2021). Hybrid wavelet-artificial intelligence models in meteorological drought estimation. *J Earth Syst Sci*, 130(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01488-9>
- Thom, H. C. S. (1958). A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review*, 86(4), 117-122.
- The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) (2010) *Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması-Yesilirmak Havzası*, 557 pp (in Turkish).
- White, D. H., & Walcott, J. J. (2009). The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop and Pasture Science*, 60, 599-616. <https://doi.org/10.1071/CP08378>
- Wilhite, D. A. (2000). *Drought: A global assessment*. Routledge Press, London and New York, Volume I.
- Yacoub, E., & Tayfur, G. (2017). Evaluation and assessment of meteorological drought by different methods in Trarza region, Mauritania. *Water Resour Manage*, 31, 825-845. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1510-8>
- Yacoub, E., & Tayfur, G. (2020). Spatial and temporal of variation of meteorological drought and precipitation trend analysis over whole Mauritania. *Journal of African Earth Sciences*, 163, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103761>
- Zhang, G., Patuwo, B.E., & Hu, M. Y. (1998). Forecasting with artificial neural networks: the state of the art. *Int J Forecast*, 14(1), 35-62. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(97\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(97)00044-7)