

KARAYOLLARINDA ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ ALEV AKILLI EL

Bu kitap bilimsel amaçlı araştırmaları
içeren akademik bir yayındır.

EĞİTİM
yayınevi

KARAYOLLARINDA ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Alev Akıllı El

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam

Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Tasarım Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-508-6

1. Baskı, Aralık 2025

Kütüphane Kimlik Kartı

KARAYOLLARINDA ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Alev Akıllı El

XII+88 s., 135x215 mm

Kaynakça var, dizin yok.

E-ISBN: 978-625-385-508-6

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mechanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM

yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis: İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah.

Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok,

No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

+90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42

bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.

P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America

americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah.

10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

sevkiyat@egitimyayinevi.com

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye

+90 332 499 90 00

bilgi@egitimkitabevi.com

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr

bilgi@kitapmatik.com.tr

EĞİTİM YAYINEVİ
GRUBU

EĞİTİM
yayınevi

SALON
yayınevi

Kitapmatik
Tasarım

kitapmatik
Tasarım

EĞİTİM
Kitabevi

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VI
ÖNSÖZ.....	VII
PREFACE.....	IX
ÖZET	XI
ABSTRACT.....	XII

GİRİŞ	1
2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ	5

2.1. Enerji Depolamanın Önemi	7
2.1.1. Elektrik Arzının Yük Talebine Uygun Hale Getirilmesi	7
2.1.2. Yenilebilir Teknolojilerinin Etkinleştirilmesi.....	8

3. YOL KAPLAMALARINDA ENERJİ DEPOLAMAK İÇİN KULLANILAN MEVCUT TEKNOLOJİLER	11
---	----

3.1. Güneş Enerjisinin Depolanması	14
3.1.1. Yollarda Fotovoltaik Teknolojisi ile Enerji Depolama	14
3.1.2. Yollarda Güneş Kolektörleri Sistemi ile Enerji Depolama	19
3.2. Termoelektrik jeneratör kullanılarak enerjinin depolanması.....	25
3.2.1. Termoelektrik Jeneratör ile Enerji Depolama Sistemlerindeki Sorunlar	29
3.3. Yollarda Piezoelektrik Enerji Depolama.....	30
3.3.1. Mekanik Yükleme ve Titreşim	35

3.4. Yollarda Elektromanyetik Enerji Depolama	36
3.4.1. Elektromanyetik Ticari Cihazlar ve Sistemler.....	41
3.5. Yollarda Rüzgâr Enerjisi Depolama.....	43
3.6. Yollarda Faz Değişim Malzemeleri (FDM) ile Enerji Depolama	44
4. AKILLI MALZEME TEKNOLOJİSİ	51
5. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	55
6. KARAYOLLARINDA ENERJİ DEPOLAMADA KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR	59
SONUÇ.....	62
REFERANSLAR	64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Karayollarında enerjinin geri kazanımında kullanılan mevcut kaynaklar [5]	3
Şekil 2. SolaRoad Bisiklet yolunda kullanılan güneş enerji sistemi	15
Şekil 3. Asfalt güneş kolektörlerinde ısı iletim mekanizmaları.....	21
Şekil 4. Çalışmada oluşturulan deneysel düzenek.....	25
Şekil 5. Yol en kesitindeki sıcaklık dağılımı ve termoelektrik enerjinin depolanması	26
Şekil 6. Boru-kaplama-termoelektrik jeneratör sistemi.....	27
Şekil 7. Termoelektrik enerji depolama prototipi: (a) prototipin şeması, (b) bileşenler	28
Şekil 8. Piezoelektrik enerjisinin çalışma prensibi (a) sıfır gerilim, (b) gerilim ve (c) basınç altında [5].....	31
Şekil 9. Piezoelektrik Teknolojisi (a) piezoelektrik prosedürü (b) elektrik devreleri[101].....	32
Şekil 10. Bir aracın piezoelektrik enerji toplayıcı levha üzerinde uyguladığı basınç sayesinde aydınlatılan sokak lambası	34
Şekil 11. Yollardan ve Araçlardan mekanik enerji toplama mekanizmaları.....	36
Şekil 12. Elektromanyetik tabanlı çok işlevli asfalt kaplamanın fonksiyonları [122].....	37
Şekil 13. Elektromanyetik tabanlı asfalt yol kaplamalarının üç aşamalı enerji dönüşüm süreci	38
Şekil 14. Elektromanyetik hız tümseği temelli yol enerji depolama sisteminin şematik gösterimi [127].....	40
Şekil 15. Elektromanyetik enerji depolama prototipi[128]	41
Şekil 16. (a) Pavnext tarafından geliştirilen NEXT-road prototipi, (b) Pavnext Co. Tarafından uygulanacak olana ilk pilot tesis	42
Şekil 17. Karayolları için Rüzgâr Türbini Tasarım Şeması	43
Şekil 18. FDM'lerin Sınıflandırılması	46

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Karayolunda enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması [15]	12
Tablo 2. Başlıca yol enerjisi toplama teknolojilerinin avantajları ve dezavantajları	56

ÖNSÖZ

Günümüzde enerjiye olan talep, sanayileşme, kentleşme ve ulaşım altyapısının hızla gelişmesiyle birlikte artış göstermekte; buna karşın fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı ve çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, enerji geri kazanımı ve depolama teknolojileri, doğal kaynakların tükenmesini önlemenin ve küresel enerji krizine çevre dostu bir yanıt vermenin en etkili yollarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Karayolları, geniş yüzey alanları ve sürekli olarak maruz kaldıkları dinamik yükler nedeniyle önemli miktarda enerjinin açığa çıktığı mühendislik yapılarıdır. Bu enerjinin büyük bir kısmı, ısı, titreşim veya deformasyon biçiminde boşa harcanmakta; oysa uygun teknolojilerle bu enerji yeniden kazanılabilir, depolanabilir ve elektrik üretimi, ısıtma, soğutma ya da yapısal iyileştirme gibi çeşitli alanlarda değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, klasik yol mühendisliğinin sınırlarını aşarak, karayolu altyapılarını aynı zamanda aktif enerji sistemleri haline getirmeyi hedefleyen yenilikçi bir vizyonun ürünüdür.

Bu kitap, karayollarında enerji depolama ve geri kazanım teknolojilerine ilişkin güncel gelişmeleri, teorik temelleri ve uygulama örneklerini bir araya getirmektedir. Fotovoltaik sistemler, faz değişim malzemeleri, piezoelektrik sensörler, termoelektrik jeneratörler, iletken borular ve indüksiyon ısıtma gibi yenilikçi çözümler, altyapı mühendisliği perspektifinden ele alınmış; her bir sistemin performans ölçütleri, avantajları, sınırlamaları ve uygulanabilirlik potansiyeli detaylı olarak incelenmiştir.

Ayrıca kitapta, bu teknolojilerin enerji verimliliğine, karbon emisyonlarının azaltılmasına ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerine katkılarına da odaklanılmıştır. Türkiye'nin coğrafi, iklimsel ve teknolojik koşulları dikkate alınarak, karayolu altyapısında enerji depolama teknolojilerinin ulusal düzeyde uygulanabilirliği tartışılmış; gelecekte yapılması gereken

araştırmalar ve olası iř birliği alanlarına ilişkin öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmanın hem akademik çevrelere hem de uygulayıcı mühendislere karayolu altyapılarının birer enerji üretim ve depolama platformuna dönüştürölmesi yönünde yeni bir bakış açısı kazandırması hedeflenmiştir. Kitapta yer alan bilgiler, gelecekteki araştırmalara ışık tutacak, yenilenebilir enerji teknolojilerinin altyapı sistemlerine entegrasyonu konusunda stratejik bir temel oluşturacaktır.

Alev AKILLI EL
Bitlis Eren Üniversitesi
2025

PREFACE

Today, the demand for energy continues to increase due to rapid industrialization, urbanization, and the expansion of transportation infrastructure. However, the limitations and environmental impacts of fossil fuel resources make the development of sustainable energy solutions an absolute necessity. In this context, energy recovery and storage technologies emerge as some of the most effective methods to prevent the depletion of natural resources and to provide an environmentally friendly response to the global energy crisis.

Highways, with their vast surface areas and continuous exposure to dynamic loads, are engineering structures where a significant amount of energy is released. Much of this energy—manifested as heat, vibration, or deformation—is wasted. Yet, through appropriate technologies, this energy can be recovered, stored, and utilized in various applications such as electricity generation, heating, cooling, or structural enhancement. This approach transcends the traditional boundaries of highway engineering and represents an innovative vision that aims to transform road infrastructures into active energy systems. This book brings together current developments, theoretical foundations, and practical examples related to energy storage and recovery technologies in highways. Innovative solutions such as photovoltaic systems, phase change materials, piezoelectric sensors, thermoelectric generators, conductive pipes, and induction heating have been examined from the perspective of infrastructure engineering. Each system's performance criteria, advantages, limitations, and applicability potential are discussed in detail.

In addition, the book focuses on the contributions of these technologies to energy efficiency, reduction of carbon emissions, and the achievement of sustainable transportation goals. Considering Turkey's geographical, climatic, and technological conditions, the national applicability of energy storage technologies within highway infrastructure is discussed, and

recommendations are presented for future research and potential collaboration areas. This study aims to provide both academic researchers and practicing engineers with a new perspective on transforming highway infrastructures into energy-generating and energy-storing platforms. The information presented in this book is expected to shed light on future research and form a strategic foundation for the integration of renewable energy technologies into infrastructure systems.

Alev Akıllı El
Bitlis Eren University
2025

ÖZET

Enerji geri kazanımı, doğal kaynakların tükenmesini önleyerek küresel enerji sorunlarına sürdürülebilir çözümler sunmayı amaçlayan en yenilikçi ve umut vadeden teknolojik alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Karayolu altyapılarından enerji geri kazanımı, kaplama sistemlerinde genellikle atıl durumda bulunan enerjinin toplanması, depolanması ve daha sonra kullanılabilir hâle getirilmesini konu alan yenilikçi bir araştırma sahasıdır. Bu yaklaşımın en önemli avantajı, mevcut geniş asfalt yüzeylerin enerji toplama ve depolama potansiyelinden etkin biçimde yararlanabilmesidir.

Güncel uygulamalarda enerji depolama ve geri kazanımı amacıyla geliştirilen ileri düzey teknolojiler arasında iletken borular, fotovoltaik (PV) ses bariyerleri, faz değişim malzemeleri (PCM), piezoelektrik sensörler, termoelektrik jeneratörler ve indüksiyon ısıtma sistemleri yer almaktadır. Bu teknolojilerin çıktığı potansiyelleri arasında elektrik enerjisi üretimi, bölgesel ısıtma ve soğutma sistemlerinin desteklenmesi, kaplama yüzeylerinde buz çözme uygulamaları, kablosuz ağlara enerji sağlanması, kaplama koşullarının izlenmesi ve kendi kendini iyileştirme özelliklerinin geliştirilmesi gibi çok yönlü işlevler bulunmaktadır.

Bu kitap kapsamında, karayolu altyapılarında kullanılan farklı enerji depolama teknolojilerine ilişkin kapsamlı bir inceleme yapılmış; mevcut sistemlerin yapısal özellikleri, çalışma prensipleri, performans düzeyleri ve uygulanabilirlik potansiyelleri detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, gelecekte yürütülecek araştırmalara yön verecek nitelikte olup, enerji geri kazanımı temelli kaplama teknolojilerinin temiz, sürdürülebilir ve yüksek verimli bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceğine dair farkındalığın artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Karayolu, Enerji Depolama, Fotovoltaik Sistemler, Piezoelektrik sensörler, Yenilebilir Enerji

ABSTRACT

Energy recovery has emerged as one of the most innovative and promising technological approaches aimed at providing sustainable solutions to global energy challenges while preventing the depletion of natural resources. Energy recovery from highway infrastructures represents an emerging research field focused on capturing, storing, and reusing the energy that is typically wasted within pavement systems. The most significant advantage of this approach lies in its ability to effectively utilize the vast surface area of existing asphalt pavements for energy harvesting and storage purposes.

In current applications, advanced technologies such as conductive pipes, photovoltaic (PV) noise barriers, phase change materials (PCM), piezoelectric sensors, thermoelectric generators, and induction heating systems have been developed for energy storage and recovery from pavement structures. The potential outputs of these systems include electricity generation, district heating and cooling, de-icing of pavement surfaces, powering wireless networks, monitoring pavement conditions, and enhancing self-healing capabilities.

Within the scope of this book, a comprehensive examination of various energy storage technologies utilized in highway infrastructures has been conducted. The structural characteristics, operating principles, performance levels, and applicability potentials of these technologies have been analyzed in detail. The findings of this study are expected to guide future research, identify existing knowledge gaps, and contribute to the recognition of pavement structures as clean, sustainable, and high-potential energy sources.

Keywords – Highway, Energy Storage, Photovoltaic systems, Piezoelectric sensors, Renewable energy

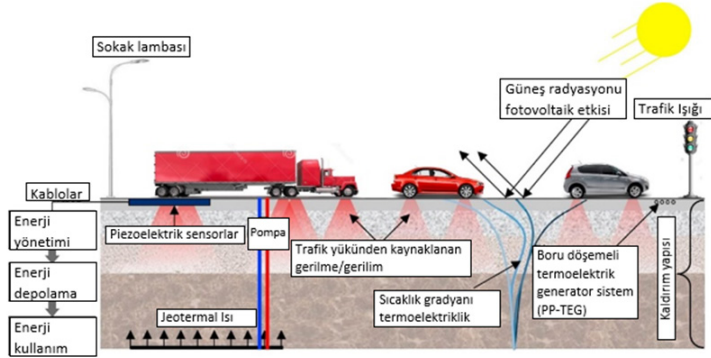
GİRİŞ

Sürdürülebilir kalkınma ve yol altyapısı, gelecekteki yaşam kalitesinin temel taşları arasında yer almaktadır [1]. Bu altyapıya sürdürülebilir şekilde enerji sağlamak ve izlemek, son yıllarda önemli araştırmaların odaklandığı zorlu konular arasında yer almıştır [2]. Araştırma alanları, veri toplamadan akıllı iletişime, yönlendirme tabelalarından yapısal sağlık izleme sistemlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Ortak noktaları ise, yol kenarında elektrik şebekesine bağlı olmaksızın sürdürülebilir şekilde üretilen elektrik enerjisine duyulan ihtiyaçtır [3]. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla sürdürülebilir yol kenarı enerji üretimi, çevresel enerji kaynaklarının elektriğe dönüştürülmesini sağlayan enerji hasadı teknolojileriyle gerçekleştirilebilir [4]. Bu enerji kaynakları arasında güneş, termal ve mekanik enerji yer almaktadır. Bu bağlamda kullanılan teknolojiler ise sırasıyla güneş panelleri, termoelektrik jeneratörler ve elektromanyetik veya piezoelektrik enerji depolama cihazlarıdır. Bu teknolojilerin her biri farklı gelişim aşamalarında olup, kendine özgü avantajlar ve dezavantajlar barındırmaktadır [5]. Bununla birlikte, teknoloji türü ne olursa olsun, enerjinin geri kazanımı fosil yakıtlarla üretilen enerjinin neden olduğu karbon emisyonlarını ortadan kaldırma gibi açık bir avantajı bulunmaktadır [6]. Diğer bir önemli avantajı ise, enerji kaynağının yerelleştirilmesi sayesinde yol kenarına elektrik taşımak için elektrik hatlarına olan ihtiyacın ortadan kalkmasıdır [7].

Yenilebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarının keşfi, sürdürülebilir kalkınma açısından dünya genelinde karşılaşılan en kritik zorluklardan biridir. Günümüzde petrol, kömür,

hidroelektrik, doğal gaz ve nükleer enerji, enerji üretiminde en yaygın kullanılan kaynaklardır. Buna karşın, enerjinin geri kazanımı, yenilebilir ve temiz enerji üretimi sağlama potansiyeliyle öne çıkan ve altyapının sürdürülebilirliğini artıracak umut verici bir teknolojidir. Enerjinin geri kazanım teknolojileri, genellikle kullanılmayan veya boşa harcanan enerjiyi toplayarak onu daha işlevsel bir forma dönüştürmektedir. Güneş, rüzgâr, su, termal ve kinetik enerji enerjinin geri kazanımı için değerlendirilebilecek yaygın enerji kaynakları arasında yer alır [8–11]. Son yıllarda araştırmacılar, pizoelektrik, termoelektrik, elektromanyetik ve fotovoltaiik enerji depolama gibi çeşitli tekniklerden yararlanarak çevresel enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde etmek üzere yoğunlaşmışlardır [12].

Yollar, toplulukları birbirine bağlamada ve insanları taşımada önemli rol oynayan başlıca sivil altyapılardan biridir. Geleneksel olarak yol trafik yükünü taşıyan yapı platformu olarak kabul edilir. Yol yüzeyleri, sürekli olarak araç yüküne ve güneş radyasyonuna maruz kalır; bu da kaplama katmanlarında mekanik titreşim ve termal gradyanlara neden olur [13]. Mekanik enerji, elektromanyetik malzeme için manyetik alan veya piezoelektrik malzeme için gerinim alanı aracılığıyla elektrığe dönüştürülebilir. Güneş enerjisi, fotovoltaiik hücre, ısı akışı veya termoelektrik alan aracılığıyla toplanabilir. Bu nedenle, yoldaki boşa giden enerji toplanabilir ve farklı uygulamaları olan kullanılabilir enerjiye dönüştürülebilir. Şekil 1’de yol kaplama yüzeylerinde uygulanabilen tüm mevcut enerji toplama teknolojileri gösterilmiştir.



Şekil 1. Karayollarında enerjinin geri kazanımında kullanılan mevcut kaynaklar [5]

Geleneksel olarak, yol altyapısının temel işlevi, farklı trafik yüklerini taşımaktır; ancak araştırmalar, çoklu görev gerçekleştiren veya akıllı kaldırım uygulamalarının, özellikle yakın gelecekte otonom ve elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla, ekonomi ve çevre üzerinde daha fazla fayda sağlayabileceği yönünde umut verici bulgulara ulaşmıştır [14]. Video kameralarla entegre edilen güvenilir sensör ağları aracılığıyla kaplama hasarlarını ve trafik akışını tespit etmek ve izlemek, akıllı kaplama gelişimine yönelik önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Bu sensör ağlarına enerji sağlamak, akıllı kaplama teknolojilerinin gelişimini engelleyebilecek temel zorluklardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, yol kaplamasından enerji depolama teknolojilerinin kullanımı son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiş ve bu alanda birçok çalışma yayımlanmıştır [15].

Enerji üretiminin ötesinde, termal enerji hasadı teknolojilerinin çevreye ve asfalt kaplamalarına sağladığı ek faydalar da önemlidir [16]. Asfaltın siyah renkli olması, güneş enerjisini emme ve ısıyı depolama konusunda yüksek bir kapasiteye sahip olmasını sağlar. Yapılan araştırmalara göre, asfalt kaplama sıcaklıklarının yazın öğle saatlerinde 60°C 'yi aşabildiği bildirilmiştir [17]. Bu özellik, asfalt kaplamanın kendisi ve çevresi üzerinde birkaç olumsuz etkiye yol açabilir.

Bu olumsuzluklardan ilki, asfaltın hızlı bir şekilde aşınmasına neden olabilir. Yüksek sıcaklıklar altında bitümün sünekliği azalır, çünkü hafif bileşenler oksitlenir ve buharlaşır, bu da kaplamanın çatlama ve yorulma gibi sorunlarla başa çıkma kapasitesini zayıflatır ve kullanım ömrünü kısaltır [18,19]. Isıyla ilgili kaplama hasarlarının artması ise bir diğer olumsuzluktur. Isıyla ilgili meydana gelen en önemli hasar çeşidi tekerlek izlerinin oluşmasıdır. Trafik yükleri ve aşırı sıcaklıkların birleşimi, asfalt kaplamanın plastik deformasyonuna uğramasına veya tekerlek izinin meydana gelmesine neden olur; bu da yolun işlevselliği ve güvenlik seviyesini olumsuz etkiler [20–22]. Bir diğer olumsuz etki ise kentsel ada ısısı etkilerinin artması. Şehirlerin hızlı bir şekilde kentleşmesi, doğal arazinin büyük bir kısmının yollarla kaplanmasına yol açmaktadır. Yaz aylarında, asfalt kaplama gündüzleri büyük miktarda ısıyı emer ve depolar; gece ise bu ısıyı atmosfere salar, bu da kentsel ada ısı etkilerinin en önemli sebeplerinden biridir [23]. Bu bağlamda, kaplamada termal enerji hasadı teknolojilerinin uygulanması, gündüz gece enerjisinin çıkarılmasına yardımcı olabilir ve bu depolanan ısıyı ve kaplamanın yüzey sıcaklığını düşürür [24]. Sonuç olarak, bu teknolojiler, termal kaynaklı kaplama hasarlarının minimize edecek, kaplamanın ömrünü uzatacak ve kentsel ısı adası etkilerini azaltacaktır.

Bu kitabın temel amacı, karayolu altyapılarında enerji depolama ve geri kazanım teknolojilerinin bilimsel, mühendislik ve çevresel boyutlarını bütüncül bir yaklaşımla ele almaktır. Karayolları, günümüzde yalnızca ulaşımın sürekliliğini sağlayan yapılar olmaktan çıkarak, enerji üretimi ve yönetimi açısından stratejik bir potansiyel sunan sistemler haline gelmiştir. Bu kapsamda kitap, karayolu yüzeylerinden ısı, mekanik titreşim veya güneş ışıınımı gibi farklı enerji biçimlerinin toplanması, depolanması ve yeniden kullanılmasına yönelik geliştirilen teknolojileri incelemektedir. Ayrıca, bu sistemlerin tasarım ilkeleri, malzeme özellikleri, enerji verimliliği, ekonomik uygulanabilirliği ve sürdürülebilirlik etkileri detaylı olarak değerlendirilmektedir.

2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Enerji krizlerinin giderek derinleştigi, fosil yakıt rezervlerinin hızla azaldığı ve bu kaynakların yanması sonucu ortaya çıkan çevresel kirliliğin küresel ölçekte ciddi boyutlara ulaştığı günümüzde, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Küresel iklim değişikliği, enerji arz güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye’de de güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması yönünde önemli adımlar atılmaktadır. Ancak bu enerji kaynaklarının doğası gereği periyodik, değişken ve düşük enerji yoğunluklu olmaları, elde edilen gücün sürekliliğini sınırlamakta ve şebekeye doğrudan entegre edilmesini güçleştirmektedir [25–27]. Bu durum, yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygın biçimde kullanılmasının önündeki temel teknik ve ekonomik engellerden birini oluşturmaktadır.

Diğer yandan, enerji sistemlerinin karmaşıklığı ve ölçeği her geçen yıl artmakta hem ulusal hem de uluslararası enerji ağlarının karşılıklı etkileşimleri güç sistemlerinin güvenli, istikrarlı ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesini zorlaştırmaktadır. Türkiye de son yıllarda hızla büyüyen enerji talebini karşılayabilmek için, ulusal elektrik şebekesini Avrupa Enterkonnekte Sistemi ile senkronize hale getirerek uluslararası enerji alışverişinde etkin bir rol üstlenmiştir. Ancak bu gelişme, enerji sisteminde kararlılık, frekans regülasyonu ve güç kalitesi konularında yeni teknik zorlukları da beraberinde getirmiştir.

Geleneksel güç sistemlerinde, enerji akışı kontrolü büyük ölçüde merkezi yapıda tasarlanmış kontrol üniteleri aracılığıyla

sağlanmaktadır. Bu kontrol sistemlerinde birden fazla geri besleme döngüsü ve kontrol bağlantısı bulunur; dolayısıyla sistemdeki yük, üretim veya talep koşullarında meydana gelen ani değişiklikler, kontrol cihazlarının etkisini doğrudan etkilemektedir. Bu durum, özellikle yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu sistemlerde, kontrol cihazlarının dinamik yanıt kabiliyetini sınırlamakta ve sistemin genel kararlılığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Geleneksel kontrolörler çoğu zaman aktif (P) ve reaktif (Q) gücü aynı anda etkin bir biçimde yönetememekte, bu da sistemin esnekliğini azaltmakta ve güç dengesizliklerinin giderilmesini zorlaştırmaktadır.

Türkiye gibi enerji talebi sürekli artan, aynı zamanda yenilenebilir kaynak potansiyeli yüksek olan ülkelerde bu durum daha da kritik hale gelmektedir. Güneş ve rüzgâr enerjisinden üretilen elektriğin şebekeye entegrasyonu sırasında meydana gelen dalgalanmalar, şebeke kararlılığını tehdit edebilmekte; özellikle kırsal ve dağlık bölgelerde enerji kalitesinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu bağlamda, enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi ve mevcut şebekelere entegrasyonu, yalnızca üretim-tüketim dengesinin sağlanması açısından değil, aynı zamanda enerji arz güvenliği ve sistem kararlılığının artırılması açısından da stratejik bir önem taşımaktadır.

Günümüzde hem Türkiye’de hem de dünya genelinde yürütülen çalışmalar, enerji depolama teknolojilerinin örneğin bataryalar, termal enerji depolama sistemleri ve mekanik depolama birimleri güç sistemlerindeki dalgalanmaları dengeleyebilecek, yük yönetimini optimize edebilecek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını mümkün kılacak çözümler sunduğunu göstermektedir. Bu teknolojilerin karayolu altyapısına entegre edilmesi ise, enerji üretim ve depolama potansiyelini artırarak, geleceğin akıllı ve kendi enerjisini üreten yollarının temelini oluşturacaktır.

2.1. Enerji Depolamanın Önemi

2.1.1. Elektrik Arzının Yük Talebine Uygun Hale Getirilmesi

Elektrik enerjisi, üretim ile tüketim arasındaki dengenin sağlanamadığı dönemlerde sistem kararlılığını sürdürebilmek için depolama teknolojilerine ihtiyaç duyan bir enerji türüdür. Elektrik üretiminin tüketimi aştığı, yani arz fazlasının olduğu dönemlerde fazla enerji depolanabilir; bu depolanan enerji, tüketimin üretimi aştığı zaman dilimlerinde sisteme geri kazandırılarak kullanılır. Bu mekanizma, yalnızca enerji arz güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda üretim kaynaklarının daha kararlı, ekonomik ve sürdürülebilir biçimde işletilmesini sağlar.

Bu stratejinin temelinde, enerji üretiminin talep dalgalanmalarına doğrudan tepki vermek yerine enerji depolama sistemleri (EDS) aracılığıyla dengeleme yaklaşımı yer alır. Böylece enerji üretimi, günün farklı saatlerinde veya mevsimsel talep değişimlerinde sürekli artırılıp azaltılmak zorunda kalmaz; bunun yerine üretim sabit, optimum ve verimli bir seviyede tutulabilir. Özellikle yakıt bazlı enerji santrallerinde (örneğin kömür, petrol ve doğal gazla çalışan termik santraller) sabit üretim seviyelerinde çalışma, sistem verimliliğini artırmakta, yakıt tüketimini azaltmakta ve operasyonel maliyetleri düşürmektedir.

Enerji depolama sistemlerinin bu dengeleme işlevi, aynı zamanda elektrik şebekesinde frekans kararlılığı, gerilim regülasyonu ve güç kalitesi gibi kritik parametrelerin korunmasına da katkı sağlar. Depolama sistemleri, ani yük değişimleri veya yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimindeki dalgalanmalar karşısında tampon görevi üstlenerek şebeke dengesini sürdürür. Böylece üretim-tüketim farkı kaynaklı dalgalanmalar minimize edilmekte, tüketiciye kesintisiz ve kaliteli bir enerji akışı sunulmaktadır.

Bu yaklaşımın bir diğer önemli avantajı ise, fosil yakıtlı üretim santrallerine olan bağımlılığın azaltılmasıdır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, hidroelektrik vb.) süreksizlik sorunlarını dengeleyen enerji depolama teknolojileri sayesinde, sistemin enerji ihtiyacının daha büyük bir kısmı karbon emisyonu düşük, çevre dostu kaynaklardan karşılanabilir hale gelir. Böylece, hem enerji üretiminde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak kolaylaşır hem de fosil yakıtların çevresel ve ekonomik maliyetleri azaltılmış olur.

Türkiye açısından bakıldığında, elektrik enerjisi talebinin her yıl ortalama %4–5 oranında artış gösterdiği, enerji arzının ise önemli ölçüde fosil yakıtlara dayandığı göz önüne alındığında, enerji depolama sistemlerinin önemi daha da artmaktadır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verilerine göre, ülke genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu gücü 2025 yılı itibarıyla 60 GW seviyesine yaklaşmıştır. Ancak bu kaynaklardan elde edilen enerjinin kesintili ve öngörülemeyen doğası, ulusal şebekede kararlılık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, batarya enerji depolama sistemleri (BESS), pompaj depolamalı hidroelektrik sistemler, süperkapasitörler ve termal depolama çözümleri gibi teknolojilerin, enerji arz-talep dengesini sağlamak üzere ulusal stratejilere entegre edilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir.

Sonuç olarak, elektrik enerjisinin üretim fazlası dönemlerinde depolanıp talep fazlası dönemlerinde kullanılması, yalnızca enerji üretim maliyetlerini azaltmakla kalmamakta; aynı zamanda enerji sisteminin verimliliğini, esnekliğini ve sürdürülebilirliğini de önemli ölçüde artırmaktadır. Bu yaklaşım, Türkiye'nin 2030 ve 2053 karbon nötr hedefleri doğrultusunda enerji dönüşümünde kritik bir rol oynamakta ve geleceğin akıllı, dayanıklı ve düşük karbonlu enerji altyapılarının temelini oluşturmaktadır.

2.1.2. Yenilebilir Teknolojilerinin Etkinleştirilmesi

Güneş ve rüzgâr enerjisi, günümüzde elektrik üretimi açısından en yaygın şekilde değerlendirilen iki temel yenilenebilir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu kaynaklar, karbon salımını azaltmaları, sürdürülebilir enerji

arzına katkı sağlamaları ve uzun vadede fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaları bakımından büyük önem taşımaktadır. Ancak, bu iki enerji kaynağının doğası gereği kesintili ve öngörülemeyen üretim profiline sahip olmaları, enerji arz-talep dengesini doğrudan etkilemekte ve enerji sistemlerinin sürekliliği açısından önemli zorluklar yaratmaktadır.

Güneş enerjisi, hidrojenin helyuma dönüştüğü sürekli füzyon reaksiyonları sonucunda oluşan ışıma enerjisidir. Bu süreçte meydana gelen kütle değişimi, ısı enerjisine dönüştürülerek uzay boşluğuna yayılmaktadır. Güneş enerjisinin ışıyım şiddeti yaklaşık 1370 W/m^2 olmakla birlikte, atmosferde meydana gelen soğurma ve yansımalar nedeniyle yeryüzüne ulaşan miktar $0-1100 \text{ W/m}^2$ arasında değişiklik göstermektedir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin küçük bir kısmı dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden çok daha fazladır. Güneş enerjisi, fotovoltaiik (PV) panellerin kullanıldığı fotovoltaiik sistemler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [28]. Bu sistemlerde kullanılan teknolojinin nispeten basit yapıda olması ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha düşük maliyetli olması, güneş enerjisine olan talebin artmasını sağlamıştır.

Güneş enerjisi yalnızca gündüz saatlerinde ve belirli meteorolojik koşullarda üretim yapabilirken, rüzgâr enerjisinden elde edilen güç de rüzgâr hızındaki ani değişimlere ve coğrafi faktörlere bağlı olarak dalgalanmaktadır. Bu nedenle, düşük tüketim dönemlerinde (örneğin gece saatleri veya düşük talep mevsimleri) yenilenebilir enerji santrallerinden üretilen elektriğin önemli bir kısmı şebekeye aktarılamamakta veya ekonomik değerini yitirmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara göre, yenilenebilir enerji kaynaklı üretimin yaklaşık %20 ila %30'unun bu nedenle etkin biçimde değerlendirilemediği tahmin edilmektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji yatırımlarının ekonomik geri dönüş oranlarını düşürmekte ve enerji piyasalarında arz-talep dengesizliğine neden olmaktadır. Bu noktada enerji

depolama teknolojileri (EDT) devreye girmekte ve söz konusu süreksizlik sorununa etkili bir çözüm sunmaktadır. Enerji depolama sistemleri, düşük talep dönemlerinde üretilen ancak kullanılmayan elektriği depolayarak, sistemde enerji talebinin arttığı pik dönemlerde bu enerjiyi yeniden kullanıma sunma imkânı sağlar. Bu mekanizma, yalnızca şebeke kararlılığını ve enerji arz güvenliğini desteklemekle kalmaz; aynı zamanda yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin ekonomik değerini de artırır. Böylece, yenilenebilir enerji kaynakları daha öngörülebilir, güvenilir ve maliyet açısından rekabetçi bir hale gelir.

3. YOL KAPLAMALARINDA ENERJİ DEPOLAMAK İÇİN KULLANILAN MEVCUT TEKNOLOJİLER

Yol kaplamalarından enerji depolamak için kullanılan en bilinen teknolojiler arasında piezoelektrik sensörler, asfalt güneş kolektörleri, fotovoltaiik sensörler, faz değişim malzemeleri ve elektromanyetik jeneratörler yer alır [29]. Piezoelektrik sensörler, araç hareketlerinden kaynaklanan mekanik gerilmeleri ve zorlamaları toplamak ve bunları elektrik enerjisine dönüştürmek için kaplama tabakasının içine yerleştirilen cihazlardır [30]. Dolayısıyla, piezoelektrik sensörlerden çıkan enerji, araç ağırlığından, hareketinden ve titreşimlerden üretilir. Asfalt güneş kolektörü, yüksek güneş emilim katsayısına sahip asfalt yüzey tabakasının koyu renginden yararlanmak ve güneş enerjisinin emilmesini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Emilen güneş enerjisi, kaldırım tabakalarında ısı şeklinde birikir. Bu ısıyı kullanmak için, içinde sıvı bulunan özel borular asfalt tabakasına gömülür. Mekanizma sırasında, sıvı çevredeki döşemenin yüksek sıcaklığıyla ısıtılıyor ve enerji düşük sıcaklıktaki jeotermal ısı pompaları kullanılarak toplanmaktadır [31].

Fotovoltaiik teknolojisinde ise, kaplama yapısının yüzeyi güneş hücreleri yani sensörler ile birleştirilir. Güneş sensörleri tarafından alınan güneş ışığı bir fotovoltaiik etki yoluyla elektrığe dönüştürülür [12]. Faz değişim malzemelerinin kullanımına bakıldığında, enerji depolama süreci oldukça basittir. Faz değişim malzemeler, erime ve dönme süreçleri

sırasında termal enerjiyi depolayıp serbest bırakacak şekilde sıcaklığı kontrol edebilen ürünlerdir. Faz değişim malzemeler asfalt kaplamalar ile birleştirildiğinde, asfaltın kendi kendini iyileştirmesi yoluyla çatlamayı önleyebilirler. Elektromanyetik jeneratörler açısından yol kaplamasındaki enerjinin depolama prensipleri, piezoelektrik sistemlerindeki benzerdir [32]. Elektromanyetik jeneratörler, düşük ortam titreşimlerini kullanan ve voltaj üreten mıknatıslardan yapılır [33]. Köprülerde, elektromanyetik jeneratörler geçen trafiğin yarattığı titreşimleri toplamak için kullanılabilir bir kaynaktır. Bu durumda, depolanan enerji köprülerin yapısal durumunun izlenmesinde kullanılabilir [34]. Tablo 1’de karayolunda kullanılan enerji depolama sistemlerine ait amaç, avantaj ve sınırlamaları verilmiştir.

Tablo 1. Karayolunda enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması [15]

Enerji depolama sistemleri	Amaç	Avantajları	Sınırlamalar
Fotovoltaik paneller	Doğrudan güneş radyasyonundan elektrik üretmek için yol yüzeyine PV panelleri yerleştirilir.	Daha yüksek enerji üretir.	Yüksek maliyetlidir, trafik yüküne maruz kalır, düşük aşınma direncine sahiptir, hava koşullarına bağlıdır, doğrudan güneş ışığına ve gölge koşullarına bağımlıdır ve toz ve kire karşı hassastır.
Hava ile güneş kolektörü	Güneş radyasyonu asfalt tabakasına gömülü bir ısıtma borusudur. Hava borudan dolaşır ve termal enerjiyi iletir/değiştirir.	Buz çözme, UHI’nin azaltılması ve termal rahatsızlığın azaltılması, bina klimasında kullanılabilir.	Hava koşullarına bağlı, aşırı verimsiz ve soğuk havalarda etkisiz.

Sıvı ile güneş kolektörü	Güneş radyasyonu asfalt tabakasına gömülü bir ısıtma borusudur. Bir sıvı borunun içinde dolaşır ve termal enerjiyi iletir/ değiştirir.	Yüksek enerji geri kazanımı.	Yolların inşası ve bakımı üzerindeki etkisi, hava koşullarına bağlı olması, çalışması için enerji gerektirmesi, sızıntı sorunları.
Termoelektrik	Güneş radyasyonu, asfalt kaplamaya gömülü termoelektrik jeneratörün sıcak yüzeyini ısıtır. Diğer yüzey bir ısı emici tarafından soğutulur ve ortaya çıkan sıcaklık gradyanı elektrik enerjisi yaratır.	Geniş bir uygulama yelpazesi sunar ve diğer teknolojilerle kolayca entegre edilebilir.	Düşük verimlilik derecesine ve yüksek birim maliyetine sahiptir ve hava koşullarına duyarlıdır.
Piezoelektrik	Geçen araçların uyguladığı stres/ gerinmeye tepki olarak piezoelektrik malzemeler elektrik enerjisi üretir.	Her türlü yola uygundur, hava koşullarına karşı duyarsızdır, çok çeşitli ebat ve şekillerde üretilebilir, kaldırımın ömrü üzerinde zararlı bir etkisi yoktur.	Üretilen enerji miktarına göre maliyetlidir ve trafik dalgalanmalarına dayanacak bir yedek paket gerektirir.
Elektromanyetik	Hareket eden bir aracın ürettiği mekanik enerji, mekanik bir sisteme basınç uygulayarak mıknatıs ve bobin arasında karşılıklı hareketlere neden olur ve böylece elektrik gücü yaratır.	Yüksek elektrik çıkışı, yol bakımı üzerinde hiçbir etkisi yoktur, hava koşullarından etkilenmez.	Mekanik aksamlar ve trafik akışına etkisi nedeniyle yüksek bakım gereksinimi vardır, tüm yollar için uygun değildir.

Enerji depolama sistemi, enerji jeneratörü, elektrik devresi ve depolama aygıtı olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Elektrik enerjisinde, ortamdaki diğer enerjilerin dönüştürülmesinden sonra, üretilen voltajı yükseltmek ve

düzenlemek için elektrik devresi kullanılır. Depolanan enerji, şarj edilebilir piller veya süper kapasitörlerde depolanabilir. Her bir enerji depolama teknolojisinin prensibine bağlı olarak, depolanan enerji miktarı önemli ölçüde değişiklik gösterir. Büyük miktardaki enerji doğrudan elektrik gücü ve şebeke için kullanılabilir. Öte yandan, nispeten küçük miktardaki enerji, buzlanmayı önlemek, aydınlatmak veya trafik cihazlarına güç sağlamak için ayrıca yol kaplama yüzeyini ısıtmak için kullanılabilir [35–37].

3.1. Güneş Enerjisinin Depolanması

Yol kaplama yüzeyine gelen aşırı miktardaki güneş ışığı, temel olarak güneş-elektrik veya güneş-termal dönüşüm teknikleriyle faydalı enerjiye dönüştürülmektedir. Güneş-elektrik tekniği, güneş fotovoltaik teknolojisi kullanılarak elektrik üretirken [38], güneş-termal tekniği ise termoelektrik ve piroelektrik üretim tekniklerini içerir ve yol kaplamasının altına yerleştirilen borulardan akan su veya hava aracılığıyla termal enerji toplanır.

3.1.1. Yollarda Fotovoltaik Teknolojisi ile Enerji Depolama

Fotovoltaik hücre, güneş radyasyonunu elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır. Yollarda uygulanan enerji depolama sistemlerinden biri olan güneş fotovoltaik dönüşümünün, tipik bir güneş panelinin metrekaresi başına yaklaşık 1000 KW'lık bir enerji üretimi ile en verimli çözümlerden biri olduğu kanıtlanmıştır [39,40]. Ancak, fotovoltaik güneş panelleri, daha yüksek verimlilikte güç üretimi için geniş arazi ve güneş ışığına maruz kalması gerekmektedir. Kentsel alanlarda uygun arazinin yüksek maliyeti ve azlığı nedeniyle fotovoltaik güneş panelleri yalnızca uzak yerlerde kurulabilir bu da iletim sırasında önemli güç kaybına neden olur.

Dünyanın ilk güneş enerjili bisiklet yolu 2014 yılında Hollanda'da kurulmuştur [41]. SolaRoad isimli 70 m uzunluğundaki bu bisiklet yoluna güneş kolektörleri

yerleştirilerek inşa edilmiştir [42]. 2016 yılında, tatmin edici performansı nedeniyle yol uzunluğu 100 m'ye çıkarılmıştır. Güneş kolektörleri 2014 yılında bisiklet yolunun 118 m²'ne uygulandı ve 2016 yılında 144m²'ye çıkarılmıştır. Bu pilot proje, Hollanda Uygulamalı Bilimsel Araştırma Örgütü (TNO) tarafından geliştirilen önceden üretilmiş bir panel teknolojisinin dahil edilmesiyle inşa edilmiştir [43]. SolaRoad, 2.5×3.5 m'lik beton modüllerden oluşur. Bu beton modüller, standart kaplamanın üst yüzeyini değiştirmek için alt katmanda kullanılmıştır. Üst katman olarak pürüzlü ve şeffaf bir kaplamaya sahip temperli cam kullanılmıştır. Yaklaşık 1 cm kalınlığındaki üst katman kaymaya dayanıklıdır ve güvenli bir yol yüzeyi görevi görece kadar güçlüdür. Bu iki katmanın içinde kristalin silisyum güneş hücreleri vardır. Yıllık metrekare başına 70 kWh enerji üretmekte ve inşaat maliyeti metrekare başına 1.21 ABD dolarıdır [16]. Şekil 2'de SolaRoad bisiklet yoluna ait görseller verilmiştir.



Şekil 2. SolaRoad Bisiklet yolunda kullanılan güneş enerji sistemi

2016 yılında Fransa, Normandiya bölgesinde dünyanın ilk güneş enerjili yolunu kullanıma açmıştır. 2800 metrekare fotovoltaik panel içeren 1 km uzunluğunda ki bu yoldan üretilen güç kasabanın sokak aydınlatmasını çalıştırmak için

kullanılmıştır [44]. Yolda kullanılan paneller çok ince bir polikristalin silikon filmi içermektedir. Bu paneller sadece birkaç milimetre kalınlığında ve reçineler ile polimer içeren çok katmanlı bir alt tabaka kaplamasına sahiptir. Güneş ışığını geçirecek kadar şeffaf ve trafik yüklerini taşıyacak kadar dirençlidir. Bu ağır hizmet tipi, kaymaya dayanıklı fotovoltaik panellerin temel avantajı, doğrudan mevcut yollara ve otoyollara uygulanabilmesidir. Bu yol metrekaresine başına yıllık 99 kWh enerji üretmektedir.

Son yıllarda kaplamalardan enerji elde etme potansiyeli araştırmacıların ilgisini çekmiş ve bu doğrultuda çeşitli teknolojiler incelenmiştir [45]. Kullanılan teknolojilerden fotovoltaik sistem, üç ana katmandan oluşur: temperli camdan yapılan üst yarı saydam katman, bir polimer katman ve reçine ile bağlanmış cam agregalarından oluşan katmandır [46].

Kore İnşaat Teknolojisi Enstitüsü'nden bazı araştırmacılar, fotovoltaik hücrelerin kaplamaya dahil edilmesinin fizibilite araştırmasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda, mevcut ince film fotovoltaik hücrelerin mekanik ve çevresel etkilerden kaynaklanan erken korozyon ve aşınma nedeniyle kaplamaya gömülmesinin uygun olmadığını belirlemişlerdir. Ek olarak, ince film panellerinin kullanılmasındaki en büyük zorluklardan biri, araçlar için yeterli çekiş gücü ve güneş radyasyonu için geçirgenlik sağlanmasının olduğu aynı zamanda trafik yükünü destekleyecek yüksek yük taşıma kapasitesine sahip uygun bir kaplama malzemesi olabileceğini belirlemişlerdir [47].

Ma ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, güneş hücrelerinin kaymayı önleyici temperli cam ve arka destekli temperli cam arasına yerleştirildiği ve Etilen Vinil Asetat (EVA)/Polivinil Bütiral (PVB) ile çevrelendiği bir fotovoltaik yer karosu üretmişlerdir. Modülün verimliliği %15 ve basınç dayanımı 15-16 MPa olarak belirlenmiştir [48]. Northmore ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, kaplama üzerinde güneş panellerinin malzeme tasarımı, eğilme tepkisi ve kaplamaya etkileşimini içeren kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, fotovoltaik

hücrelerini korumak için lamine, temperli ve dokulu cam kullanmışlar ve önerilen modelin yorulma değerini 16 MPa olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, tekerlek yükü altında güneş paneli performansını analiz etmek için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Önerilen modülün kaplama uygulaması için yapısal olarak sağlam olduğunu belirtmişlerdir [49].

Yol yüzeyine yerleştirilen fotovoltaiik panel, Amerikalı Scott Brusaw tarafından geliştirilen ve “Güneş Paneli Yolu” projesini hayata geçiren öcü bir fikirdir. Bu cihaz, güneş enerjisini elektriğe dönüştürmenin yanı sıra karayolu trafiğinin neden olduğu yük ve gerilimleri taşıyabilen bir fotovoltaiik paneldir [50]. Asfalt aşınma tabakasının yerini alacak şekilde tasarlanan güneş yol paneli, aşağıdaki üç katmandan oluşmaktadır:

- Fotovoltaiik hücreler ve LED diyotlar içeren, aşınmaya dayanıklı, kendi kendini temizleyen ve son derece dayanıklı pürüzlü camdan yapılmış yüzey katmanı: bu katmanın ana işlevi, hava koşullarına direnmek ve altındaki elektronik bileşenleri korumaktır.
- Yükleri ve aydınlatmayı kontrol etmek ve izlemek için bir mikroişlemci içeren ara elektronik katman
- Ara katman tarafından toplanan enerjiyi karayoluna bağlı çeşitli depolama sistemlerine ileten ve kaldırım yükünü alt zemin katmanına ileten alt katman.

Güneş enerjili yol altıgen panellerinin her biri yaklaşık 13.38 m² alan kaplamaktadır [51]. Üretilen doğru akım enerjisi (DC), yol yüzeyinin yakınında bulunan depolama sistemlerine taşınabilir ve evler, sokak aydınlatması, yol işaretleri ve servis istasyonları gibi çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere birincil şebekeye yönlendirilebilir. Doğru akım enerji, bir DC-AC dönüştürücü veya güneş mikro invertörü kullanılarak alternatif akıma (AC) dönüştürülür ve ardından elektrik şebekesini besler. Elde edilen gelir, üretilen enerji miktarına bağlı olarak önemli olabilir: Ortalama günlük güneş ışıınımı süresi 4 saat olduğunda, her bir fotovoltaiik

panelin günde yaklaşık 7.6 kWh enerji üretebilmesi beklenir. Ancak, fotovoltaiik hücrelerin ömrü, toz birikimi için bakım prosedürleri ve yüksek maliyetler, yol yüzeylerine uygulanan fotovoltaiik panellerin iyileştirilmesi, aşılması gereken zorluklar arasında yer almaktadır.

Efthymiou ve arkadaşları, ısı adası azaltımı için bir fotovoltaiik kaplama sistemi geliştirmişlerdir. Çalışma kapsamında fotovoltaiik kaplamaların kentsel ortamdaki etkisini araştırarak analiz etmişlerdir. Analizler, kentsel termal ortamın sayısal modellemesi ve simülasyonu ile birleştirilmiş deneysel sonuçlar verilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda fotovoltaiik hücreli kaplamaların toprak ve asfaltla karşılaştırıldığında sıcaklığı önemli ölçüde düşürülebileceğini belirlemişlerdir [39]. Dezfooli ve arkadaşları kauçuk ve pleksiglas içine gömülü güneş paneli ve iki gözenekli kauçuk tabaka arasına gömülü kaplama adı altında, güneş enerjisini toplayıp fotovoltaiik hücrelere dönüştürülebilen iki prototip tasarlamışlardır. Çalışmada gücün verimliliğinin panellerin yerleşim yerine göre azalabileceğini belirlemişlerdir [52].

Teorik olarak, bir yol sistemine düşen tüm güneş enerjisi PV hücreleri aracılığıyla toplanabilir ve kullanılabilir. Enerji üretiminin verimliliği ve uygulamaların pratik olarak göz önüne alındığında, kaplamalar, yol eğimleri, tünel çatıları, yol boyunca yönetim ve servis alanları, orta refüjler ve gürültü bariyerleri gibi belirli yol ile ilişkili yapılar, güneş enerjisi toplamak için uygun alanlar olarak değerlendirilebilir [45]. Mevcut yollar üzerine yerleştirilen PV hücreleri, mevcut arazi kaynaklarını tam olarak kullanarak sürekli ve önemli miktarda elektrik üretme potansiyeline sahiptir; bu durum, küresel ölçekte birçok araştırmacının ve endüstrinin dikkatini çekmiştir [53].

Bununla birlikte, PV hücrelerinin saha uygulamaları basit bir kurulumun ötesine geçen zorluklar içerir. Örneğin, kaldırımlara entegre edildiklerinde, yük taşıma kapasitesi, dayanıklılık ve hava koşullarına dayanıklılık gibi hususlar,

PV hücrelerinin yapısal tasarımıyla ele alınması gereken kritik faktörlerdir.

Kaplamalarda fotovoltatik hücrelerin kullanımına yönelik tüm çalışmalarda, güneş panelleri genellikle üst kısmı şeffaf bir katmanla kaplı koruyucu yapılar içinde yerleştirilmektedir. Koruyucu yapılar yük taşıma işlevini üstlenirken, şeffaf katman ise hem yük aktarımını hem de güneş ışığının hücrelere iletilmesini sağlamaktadır. PV hücrelerinin uygulamasında karşılaşılan en önemli sorun hem enerji üretim performansını hem de kaplama performansını optimize etmek amacıyla güneş hücrelerinin yapısal tasarımının iyileştirilmesidir. Kaplamalarda kullanılan fotovoltatik hücrelerin güç çıkışı, doğrudan hücrelerin kendi üretim kapasitesi tarafından belirlendiği için, koruyucu yapıların bu üretime olan etkisini en aza indirerek kaplamalardaki enerji verimliliğini arttırması gerekmektedir. Bu nedenle, belirli özel alanlarda fotovoltatik hücreleri, koruyucu yapı tasarımına gerek kalmaması için kaplama yapısına doğrudan entegre edilmeksizin, eğimli yüzeylerde, tünel çatılarında veya gürültü bariyerlerinde uygulanabilir.

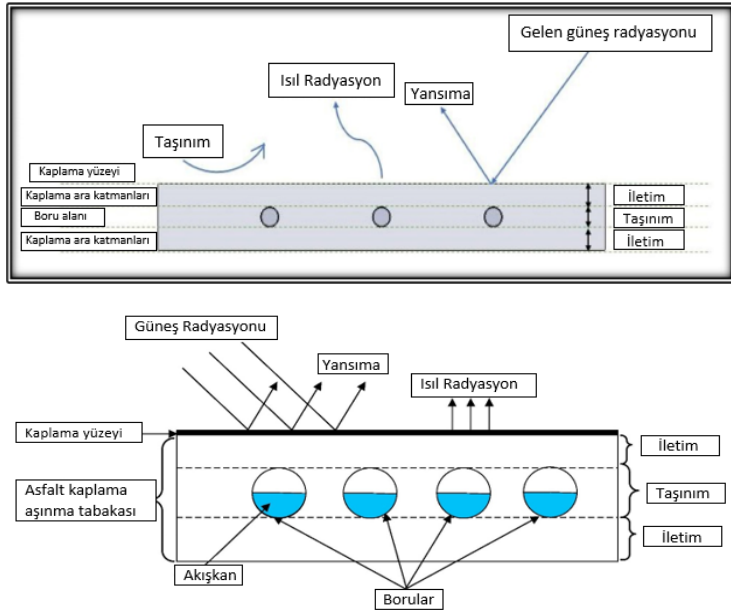
3.1.2. Yollarda Güneş Kolektörleri Sistemi ile Enerji Depolama

Güneş enerjisi yalnızca fotovoltatik hücreleri kullanarak enerji depolamakla kalmaz aynı zamanda güneşten gelen ışınlarının neden olduğu termal enerjiyi de üretebilir [54].

Asfalt kaplamaların yüzey sıcaklığı yazın 70 °C'ye kadar ulaşabilir ve üst katmanda sıcaklığın aşırı artışına neden olur, bu da genellikle ısı adası etkisi olarak bilinir. Bu durum, klima kullanımına bağlı olarak enerji tüketiminde bir artışa ve şehirlerde hava kalitesinde bir düşüşe yol açar. Ayrıca, bu kadar yüksek sıcaklıklara maruz kalan kaplamalar tekerlek izi oluşumuna karşı daha hassas hale gelir [55].

Asfalt karışımı, agrega, bitüm ve hava boşluklarından oluşan bir yapıdadır ve dünya genelinde en yaygın kullanılan

kaplama malzemeleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, asfalt betonunun ısı iletim performansı, genellikle yalıtım malzemelerinin özelliklerini andırır. Termal performansın verimliliği arttıkça, enerji tüketimi azalır. Asfalt karışımının ısı iletkenliği; bağlayıcı madde, hava boşlukları, iletken bileşenler ve agregalar gibi faktörlerden etkilenir [56,57]. Bu doğrultuda, iletkenliği artırmak amacıyla asfalt karışımlarına iletken malzemeler eklenir. Sonuç olarak, asfalt karışımının ısı iletkenliği; kullanılan hammaddelerin türü, agregaların tane dağılımı ve karıştırma ile sıkıştırma süreçleri gibi özelliklerden doğrudan etkilenmektedir [58]. Yol yüzeyleri, yaz aylarında bir gün boyunca metrekaşe başına 40 MJ/m²'ye kadar önemli miktarda güneş radyasyonu emmekte ve bu durum, kaldırım yapısında yüksek sıcaklıklara yol açmaktadır [59,60]. Bu termal enerji, genellikle kaldırım yapısına entegre edilmiş bir ısı eşanjörü sistemi (çoğunlukla borular) aracılığıyla toplanabilir. Bu tür sistemler, yaygın olarak Kaldırım Güneş Kolektörü olarak adlandırılmaktadır [61–63]. Çalışma akışkanı (hava veya su), kaldırım yapısını soğutarak ısı enerjisini çeker ve bu enerji farklı amaçlar için kullanılabilir [64]. Örneğin, evsel sıcak su temini (DHW), bina ısıtması veya adsorpsiyon çevrimleri yoluyla bina soğutması gibi uygulamalar bu enerji kullanım alanları arasında yer almaktadır [65–67]. Asfalt güneş kolektörleri, içinde bir sıvının dolaştığı ve kaldırım gömülü borulardan oluşan bir sistemdir. Güneş radyasyonu, kaldırım sıcaklığının artmasına yol açar. Kaldırım ile borular içinde dolaşan sıvı arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle, kaldırımdan sıvıya bir ısı transfer süreci gerçekleşir. Bu durum, kaldırım sıcaklığında bir düşüşe ve dolaşan sıvının sıcaklığında bir artışa neden olur (Şekil 3).



Şekil 3. Asfalt güneş kolektörlerinde ısı iletim mekanizmaları

Kaldırım sıcaklığındaki bu düşüş, ısı adası etkisinin hafifletilmesine ve kalıcı deformasyon riskinin azalmasına katkı sağlar [31]. Bununla birlikte, asfalt güneş kolektörlerini cazip kılan temel özellik, dolaşan sıvının sıcaklık artışını enerji elde etmek için kullanabilme potansiyelidir. Bu sistemler genellikle düşük sıcaklıkta çalışan jeotermal ısı pompalarıyla entegre edilerek hem verimli bir enerji üretimi hem de makul işletme maliyetleri sağlanır. Elde edilen enerji, çoğunlukla kar eritme sistemlerinde veya yakındaki binaların termal konforunu sağlamak amacıyla kullanılır.

Beton güneş kolektörleri de mevcut olmakla birlikte, asfaltın siyah rengi nedeniyle güneş ışınımını emme kapasitesi betonunkinden daha yüksektir [68]. Bu nedenle, asfalt güneş kolektörleri, beton kolektörlere kıyasla daha yüksek bir performans sergiler.

Asfalt güneş kolektörlerine yapılan ilk atıf, 1979 yılına dayanmaktadır ve "Asfaltlama ve güneş enerjisi sistemi ve

yöntemi” başlıklı bir patente dayanmaktadır. Bu teknolojinin kar eritme sistemi olarak öncü uygulamalarından biri, İsviçre’de geliştirilen SERSO sistemidir. Bu sistem, bir köprü tabliyesine gömülü borulardan oluşmakta ve yaz aylarında köprü üzerinden yayılan enerjinin yaklaşık %20’sini depolayabilmekteydi. Benzer şekilde, Japonya’nın Ninohe kentinde 1995 yılında kurulan GAIA sistemi, SERSO’ya benzeyen ve tamamen otomatik olarak çalışan ilk sistem olmuştur [69].

Asfalt güneş kolektörlerinin kar eritme sistemleri olarak kullanımı üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır [70–73]. Bu sistemlerin ticarileştirilmesi konusunda da çeşitli şirketler öncülük etmiştir. Örneğin, Hollandalı Ooms International Holding tarafından geliştirilen Road Energy Systems® (RES) ve WinnerWay© gibi sistemler piyasada yer almaktadır. İngiliz şirketi ICAX™ Ltd. ise, Toddington’daki bir kar eritme sistemi veya Howe Dell Okulu’nda binanın termal konforuna katkı sağlayan asfalt güneş kolektörü gibi projelerde bu teknolojiyi başarıyla uygulamıştır. Bunun yanı sıra, Alternatives ve Novotech Inc. gibi şirketler, Worcester Politeknik Enstitüsü ile iş birliği içinde çalışarak Roadway Power System adında bir asfalt güneş kolektörü geliştirmiştir. Bu sistem, bir türbinle entegre edildiğinde elektrik enerjisi üretme kapasitesine sahiptir [31].

Asfalt güneş kolektörleri sistemleri, kaplamalardan termal enerjiyi çıkarmak için kullanılan en yaygın enerji depolama sistemlerinden biridir. Son zamanlarda birçok araştırmacı bu alanda çalışma gerçekleştirmiştir. Shaopeng ve arkadaşları, küçük ölçekli asfalt levhaların uygulanmasıyla asfalt kaplamaların güneş kolektörü kullanılarak sıcaklık dağılımını araştırmışlardır Asfalt levhaları ısıtmak için laboratuvarında simülasyon testleri yapmışlardır. Levhalarda toplanan termal enerji, suyun dolaştırılmasıyla toplanmıştır. Akış hızının, toplamaya başlama süresinin ve levhaların ilk sıcaklık dağılımının güneş enerjisini toplama süreci üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda,

asfalt kaplamaların güneş kolektörler tarafından toplanan enerji ile soğutulabileceğini dolayısıyla şehirlerdeki ısı adası etkisinin azaltılabileceğini belirlemişlerdir [73]. Yinfei ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, asfalt kaplamanın güneş ışığı Emilimini arttırmak için yeni bir ısı kaynaklı strateji geliştirmeye çalışmışlardır. Aynı zamanda asfalt kaplamadaki ısı birikimini azaltmak için ısı salınımının hızlandırılmasının da gerçekleştirmeye çalışmışlardır. Bu şekilde yüzey ve iç sıcaklıklar aynı anda azaltılabilecekti. Bu amaçla, toplam yedi çelik çubuk yerleştirme modunun sıcaklık özellikleri incelenmiş ve yeni bir ısı kaynaklı yapı önerilmiştir.

Çalışmada, yapılan sistem üzerinde tekerlek izi dirençleri ve maksimum tekerlek izi derinlikleri simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonucunda, önerilen yapının kontrol yapısından %30,6 daha fazla güneş ısını emdiğini belirlemişlerdir. Çelik çubukların yerleştirilmesi ile ısı akış özellikleri değişkenlik göstermiştir. Üst katmandaki asfalt karışımındaki ısı çelik çubuklar tarafından emilmiş ve daha sonra hızlı bir şekilde aşağı doğru ısı transferi periyodundan sonra alt katmandaki asfalt karışıma bırakılmıştır. Yüzey ve iç sıcaklıklar, kontrol yapısına kıyasla sırasıyla 3.5°C ve 6.4°C düşmüştür. Sıcaklık düşüşü, bir iç mekân ısınlama testi ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak, önerilen yapının maksimum tekerlek izi derinliği %49,2 oranında azalmıştır. Önerilen ısı indüksiyonu stratejisinin, güneş Emilimini indükleyerek ve ısı salınımını hızlandırarak asfalt kaplamayı soğutmak için kullanılabilirliğini belirtmişlerdir [74].

Abbas ve arkadaşları, kanatlı boru ve iletken asfalt karışım teknikleri kullanılarak asfalt kaplamadaki güneş kolektörlerinin termal performansının değerlendirmesini ve karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada 500 mm uzunluğunda bakır bir boru ve 500×160×50 mm sıcak karışımlı asfalt levhanın ortasına gömülmüştür. Çalışmada, farklı boyutta ve iletkenliğe sahip kanatlı tüpler, asfalt kaplama karışımları içerisinde ise kuvarsit, cüruf agregaları, silika,

metalik atız tozu ve çelik lifler kullanılmıştır. Sonuçlara göre kuvarsit ve cüruf agregalarının kullanılması ile asfalt güneş kolektörlerinin termal tepkisi sırasıyla %18,7'ye ve %20,18'e kadar arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca endüstriyel atıkların genişletilmiş yüzeyler olarak kullanılmasıyla önemli bir termal iyileştirme elde etmişlerdir [75]. Wang ve arkadaşları, asfalt kolektörlerinde hangi parametrelerinin önemli olduğunu vurgulamak amacıyla ısı iletim cihazının geleneksel asfalt karışımına kıyasla termal tepkisini tahmin etmek için sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Asfalt kaplama kolektörünü etkileyebilecek faktörler arasında asfalt kaplamanın ısı iletkenlik katsayısı, boruların aralarındaki mesafe, boru çapı ve ortam olarak su dikkate alınmıştır.

Sonuç olarak, geliştirilen sonlu eleman modeli, iletken asfalt güneş kolektörü deneylerinin laboratuvar ortamına yürütülmesine rehberlik edecek verimli bir hesaplama aracı sunmuşlardır [76]. Farzan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada hem ısı emici hem de ısı depolama üniteleri olarak işlev gören asfalt malzemeleri kullanan asfalt güneş hava ısıtıcılarının, ısı dinamiklerini ve termal verimliliğini araştırmışlardır. Bu amaçla, 1.2 m²'lik tek camlı bölmeli bir protipi inşa ederek iki farklı hava kütlesi akış hızında soğuk ve ılıman kış günlerinde veriler alınmıştır (Şekil 4). Çalışma sonucunda, dizayn edilen düzenek ile asfalt kaplamalarda güneş kolektörün kullanılmasının, aynı anda hem ısı hem de duyarlı ısı olarak depolanarak hizmet etmek için uygulanabilir bir yaklaşım olduğunu belirlemişlerdir [77].



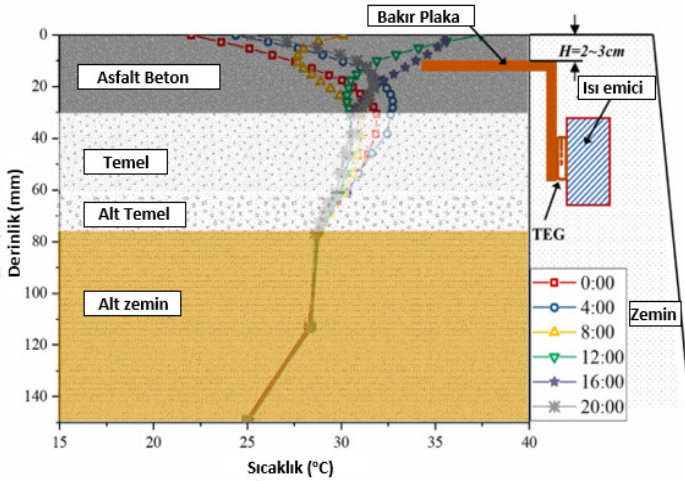
Şekil 4. Çalışmada oluşturulan deneysel düzenek

Yapılan literatür araştırmasında, asfalt kaplamaya döşenen güneş kolektörleri ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Genel olarak çalışmalarda, termal verimliliği iyileştirmek ve gece kullanımı için kullanılabilirliği uzatmak amacıyla duyarlı/gizli ısı depolama teknikleri değerlendirilmiştir [78–83].

3.2. Termoelektrik jeneratör kullanılarak enerjinin depolanması

Asfalt kaplama tasarımında, kaplama sıcaklığı ve dağılımı kritik faktörlerdir çünkü yüksek sıcaklıklar plastik deformasyon riskini artırırken, düşük sıcaklıklar kırılgan bir hasar neden olabilir [84,85]. Sıcaklık tahmin modelleri, güneş radyasyonu ve jeotermal ısıyı dikkate alarak kaplama malzemelerinin ısı iletkenliği, ısı kapasitesi ve termal yayılma gibi termal özelliklerine dayalı olarak sıcaklık dağılımını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Kaplama yüzey sıcaklığı, termal iletkenliğin artmasıyla azalır ve özgül ısı kapasitesindeki artışla maksimum sıcaklığa ulaşması daha fazla zaman alır [86].

Asfalt malzemenin termal davranışına dayanarak, yol kaplaması yapısı içindeki sıcaklık dağılımı termoelektrik teknolojisi için önemli bir parametredir. Yol kaplaması yapısının sıcaklık gradyanları hem derinliğe hem de zamana göre değişir [87]. Ayrıca yol kaplaması yapısı içindeki sıcaklık gradyanı, yol yüzeyi ile çevreleyen hava arasındaki sıcaklık gradyanından daha yüksektir. Bu nedenle, bir termoelektrik motor inşa etmek için uygun derinliği seçmek gerekir. Jiang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, termoelektrik inşa edilebilmek için uygun derinliğin 20-30 mm arasında olması gerektiğini belirlemişlerdir (Şekil 5). Bu derinlikteki maksimum sıcaklığın yüzeyden daha düşük olmasına rağmen, ortam havasına olan sıcaklık farkının önemli olduğunu ve güneş radyasyonu değişikliklerinden daha az etkilendiğini tespit etmişlerdir [88].

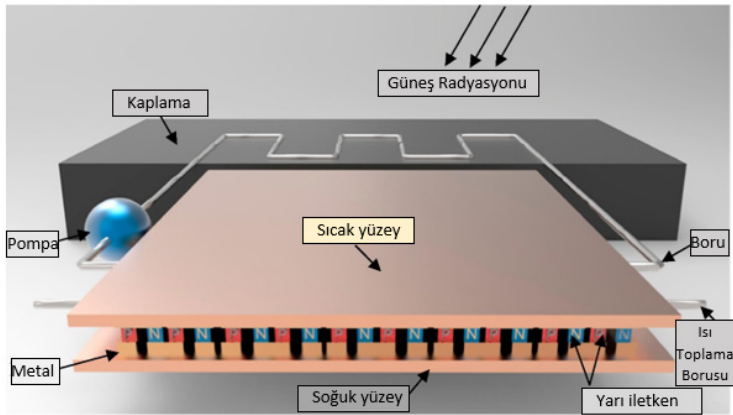


Şekil 5. Yol en kesitindeki sıcaklık dağılımı ve termoelektrik enerjinin depolanması

Termoelektrik jeneratör, çevredeki ortamın termal değişiminden enerji depolar. Termoelektrik prensiplerine dayalı olarak elektrik üretmek için kaplama katmanları arasındaki sıcaklık farklılıklarından yararlanabilir. Termal enerjini doğrudan elektrik gücüne dönüştürülmesi, termoelektrik

üretimini, ısı enerjisini verimli bir şekilde toplamak için umut vadeden teknolojilerden biri haline getirmiştir [89].

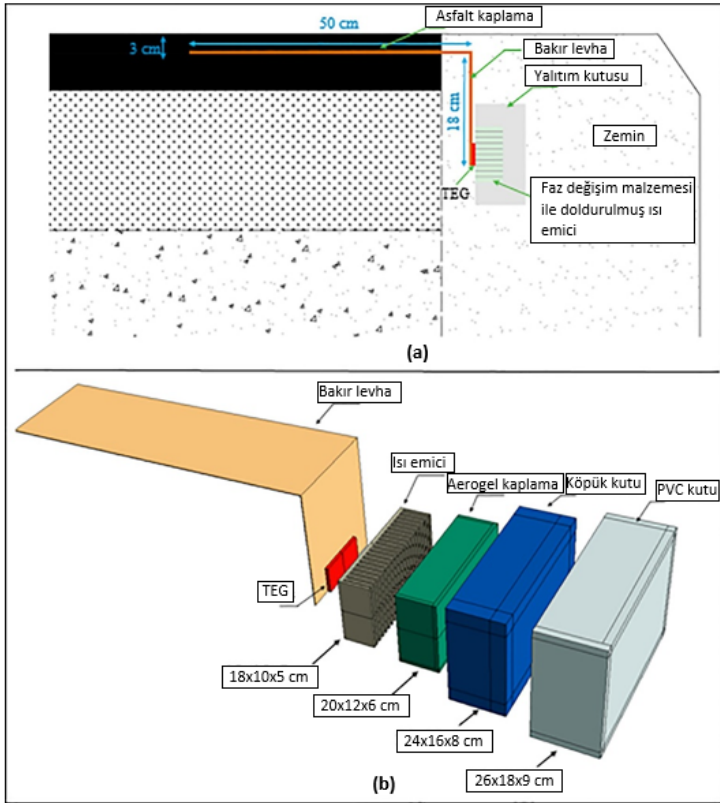
Hasebe ve arkadaşları, kaplamanın altındaki boru sistemi tarafından toplanan güneş termal enerjisini kullanan termoelektrik jeneratörler üzerine bir çalışma yapmışlardır. Termoelektrik jeneratörün sıcak ucunun termal enerjisi, ısıtma borusuna dolaşan sıvıdan gelerek aynı zamanda soğutma borusu başka bir girişten soğuk su taşınmasını sağlamıştır. Şekil 6'da kullanmış oldukları boru-kaplama-termoelektrik jeneratör sistemi verilmiştir. Yaptıkları deneylerden elde edilen veriler ışığında, güç çıkışının tepe direnç değerinde olduğunu ve akış hızıyla arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca sistemle kaplama yüzeyinin maksimum sıcaklığının geleneksel kaplama sıcaklığına göre azaldığını belirlemişlerdir [90].



Şekil 6. Boru-kaplama-termoelektrik jeneratör sistemi

Tahami ve arkadaşları soğutucu modül kullanarak kaplama yüzeyinden ısı çıkarılarak termoelektrik jeneratörün her iki tarafında termal gradyan oluşturmak için yeni bir termoelektrik enerji jeneratör sistemi geliştirmişlerdir (Şekil 7). Çalışmada, ısı transfer mekanizmasını optimize ederek ısı emici, yalıtım kutusu ve faz değişim malzemeleri kullanarak yenilikçi bir soğutma tekniği önererek, termoelektrik kaplama

yapısının verimliliğini arttırmak için yeni bir enerji depolama sistemi tasarlamışlardır. Sistem bileşenlerinin performansını değerlendirmek ve optimum tasarımlarını belirlemek için sonlu elemanlar analizi kullanarak simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarına dayanarak, sistemin verimliliği, faz değiştiren bir ısı emici dahil edilerek soğutma modülünü iyileştirildiğini ve ılıman bir bölge için 29 mW elektrik ürettiğini bu da yol kenarı kablosuz sensörleri ve yakın alan veri iletişimleri için bağımsız bir güç kaynağı olduğunu belirlemişlerdir [91].



Şekil 7. Termoelektrik enerji depolama prototipi: (a) prototipin şeması, (b) bileşenler

Datta ve arkadaşları, asfalt kaplamalı yollardan termoelektrik enerji elde etmek için bir prototip geliştirmişlerdir. Önerilen prototip, kaplama yüzeyinden ısı enerjisini toplar ve enerjiyi kaplamanın altında gömülü olan termoelektrik jeneratörlere aktarmaktadır. Prototipin değerlendirmesi sonlu elemanlar analizi, laboratuvar testleri ve saha deneyleri ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, üretilen sistemin güney Teksas'taki hava koşullarında 8 saatlik bir süre boyunca sürekli olarak ortalama 10mW elektrik gücü üretebileceğini bu enerji ile şebekeden uzak bölgelerdeki düşük watt'lı LED ışıklarını ve yol ile trafik sensörlerini sürdürülebilir şekilde çalıştırmak için yeterli olduğunu belirlemiştir [92].

Jiang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kaplama yüzey sıcaklığını azaltmak ve kaplama ısını kullanmak için yeni bir termoelektrik jeneratör sistemi tasarlamışlardır. Sistem, kaplama ısını kısmen elektrik enerjisine dönüştürerek kaplama sıcaklığını azaltırken kaplamada depolanan güneş enerjisini kullanabilmektedir. Tasarlanan sistemin kentsel ısı adası etkisini azalttığı ve asfalt kaplamada emilen güneş ısını dönüştürmek ve kullanmak için elverişli olduğunu belirlemiştir [93].

3.2.1. Termoelektrik Jeneratör ile Enerji Depolama Sistemlerindeki Sorunlar

Termoelektrik ünitelerin çoğu büyük termal ısı içindir. Küçük termal ısı için geometri tasarımı, toplanabilen ve dönüştürülebilen yeterli miktarda ısı akışı olduğundan emin olunmalıdır. Yol kaplaması altındaki termal akış analizleri, sonlu elemanlar yöntemi gibi hesaplamalı simülasyonlar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Sistemin tasarım sürecinde uygun malzemelerin seçimi diğer önemli bir husustur. Bu uygun, termoelektrik enerji depolama ünitesinin tasarımı ve enerji dönüşümünde maksimum verimliliği sağlamak için malzemelerin termal özelliklerini seçmek ve eşleştirmek oldukça önemlidir.

Termal enerji depolaması ise bir diğer önemli konudur. Depolama şeması termal gradyanın tersine çevrilmesini ve şönt devresinden kaynaklanan elektrik kaybını en aza indirmeyi dikkate almalıdır. Asfalt altına kurulum için, nemin etkileri enerji depolama sisteminin dayanıklılığını sağlamak için dikkate alınması gereken faktörlerden biridir [94].

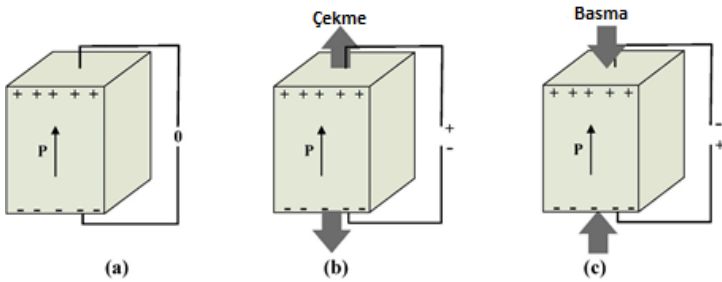
Sıcaklığın değişimi nedeniyle, termoelektrik jeneratör sisteminin çıkış voltajı sabit değildir. Bu nedenle bir enerji yönetim strateji gereklidir. Bir güç yönetim devresinin amacı, dönüştürülen enerjiyi, enerji depolama aygıtı kullanarak depolamaktır. Bu tür depolama aygıtlarının son derece uzun bir ömrü vardır ve binlerce kez şarj edilebilirler [95].

Mevcut uygulamalarda termoelektrik enerji depolama sistemlerinin üretim kapasitesi genel olarak düşük olsa da, enerji depolama sistemine uyum sağlayacak uygun enerji depolama cihazlarına ihtiyaç vardır. Ene yaygın kullanılan enerji depolama cihazları süper kapasitörler ve şarj edilebilir pillerdir. Termoelektrik enerji depolama sistemi tarafından yayılan güç çok düşük olduğundan, çıkış sabitlenmeden önce kapasitörün minimum şarj voltajına ulaşması sağlanmalıdır. Termoelektrik enerji depolama sistemini enerji depolama sistemine bağlamak için genellikle yükseltici dönüştürücüler kullanılmalıdır [96].

3.3. Yollarda Piezoelektrik Enerji Depolama

Piezoelektrik malzemeler, mekanik gerilimlere maruz kaldıklarında yüzeylerinde yük ayrışımı oluşturarak elektrik potansiyeli üretir; ters piezoelektrik etki ise bir elektrik alanı uygulandığında malzemenin geometrik boyutlarında doğrusal deformasyon meydana getirmesi ile karakterizedir. Bu özellikler, piezoelektrik malzemelerin mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdüğü enerji hasadı uygulamaları için temel prensibi oluşturur. Piezoelektrik enerji toplama mekanizmasının çalışma prensibi Şekil 8'de şematik olarak gösterilmiştir. Malzemeye uygulanan titreşim veya mekanik

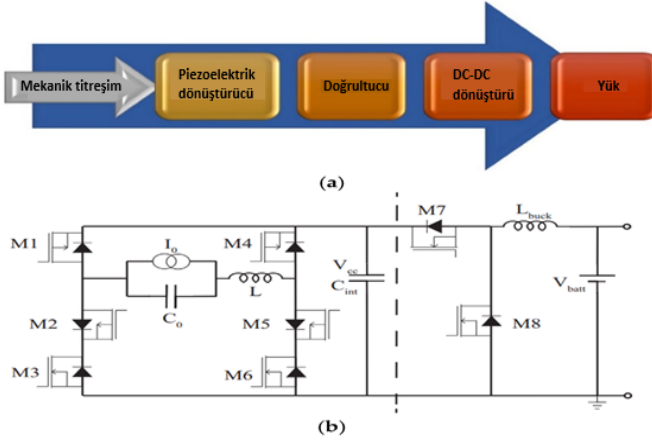
deformasyon, zamanla değişen bir elektrik potansiyeli üretir; bu potansiyel, alternatif akım (AC) sinyali olarak gözlemlenir ve sırasıyla doğrudan piezoelektrik etki (mechanical stress $\rightarrow$ electric charge) ve ters piezoelektrik etki (applied electric field $\rightarrow$ strain) mekanizmalarıyla ilişkilidir[97]. Üretilen AC voltajın genliği ve frekans spektrumu, uygulanan mekanik yükün büyüklüğü, yönü ve frekansına bağlı olarak değişir. Bu parametreler, piezoelektrik enerji hasadının verimliliğini ve tasarım optimizasyonunu doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir.



Şekil 8. Piezoelektrik enerjisinin çalışma prensibi (a) sıfır gerilim, (b) gerilim ve (c) basınç altında [5]

Şekil 9, bir piezoelektrik enerji toplayıcısının titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme sürecini, eşdeğer devre modeliyle birlikte göstermektedir. Bu sistemin temel çalışma prensibi, piezoelektrik malzeme kütesinin mekanik titreşimlere maruz kalması sonucu oluşan deformasyon hareketine dayanmaktadır. Piezoelektrik dönüştürücülerde meydana gelen bu titreşim veya mekanik hareket, piezoelektrik kapasitörün dielektrik yapısını bozarak elektriksel bir potansiyel farkı oluşturur [98]. Elde edilen gerilim, dönüştürücünün geometrisi, malzeme özellikleri ve uygulanan titreşimin genliği ile doğrudan ilişkilidir. Yeterli voltaj ve akım seviyelerine ulaşılabilmesi için genellikle birden fazla dönüştürücü hücresi seri veya paralel bağlantı konfigürasyonlarında birleştirilir [99]. Bununla birlikte, sistem performansı çeşitli dışsal faktörlerden etkilenir; özellikle araç ağırlığı, hız, lastik-yol etkileşimi ve

trafik yükü yoğunluğu gibi parametreler, piezoelektrik enerji dönüşüm verimliliğinde belirleyici rol oynamaktadır [100].



Şekil 9. Piezoelektrik Teknolojisi (a) piezoelektrik prosedürü (b) elektrik devreleri[101]

Piezoelektrik etki, esas olarak üç ana mod üzerinden karakterize edilir: piezoelektrik yük katsayısı, elektromekanik kuplaj katsayısı ve piezoelektrik voltaj faktörü.

Li ve ark., piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı düşük frekanslı uygulamalarda mekanik titreşimlerden enerji hasadı üzerine kapsamlı bir inceleme sunmuştur. Motorla çalışan tüm yol araçları, kütleleri ve yol yüzeyiyle etkileşimleri nedeniyle önemli mekanik titreşimler üretir [100]. Araç kaynaklı titreşimler genellikle düşük frekanslı olarak sınıflandırılır; çünkü 200 Hz'in altındaki frekanslar bu spektrumun düşük frekans bölgesine denk gelir [102]. Bu frekans aralığı, piezoelektrik malzemeler aracılığıyla enerji hasadı için uygun bir ortam sağlar.

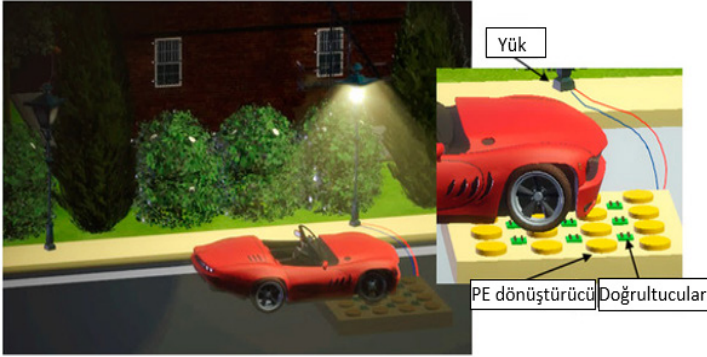
Piezoelektrik malzemeler, ürettikleri enerji ile elektrikli cihazlara güç sağlayabilme ve pil değiştirme gereksinimini ortadan kaldırma potansiyelleri nedeniyle yoğun bir araştırma ilgisi çekmektedir [103]. Bununla birlikte, piezoelektrik enerji toplamada karşılaşılan temel zorluklardan biri, titreşim frekansları ve genliklerindeki değişkenlik ve dalgalanmalardır,

bu da enerji hasadı verimliliğinin optimizasyonunu önemli ölçüde etkiler [104].

Bu durum, piezoelektrik malzemelerin ve cihazların farklı çalışma koşullarına uyum sağlayabilmesini ve yüksek verimlilikle çalışmasını gerektirir. Bu kapsamda, esnek geometrilere ve malzemelere sahip piezoelektrik cihazlar tasarlamak ve enerji dönüşümünü ve depolamayı optimize edebilen elektronik devreler geliştirmek temel çözümler arasında yer almaktadır. Ayrıca, piezoelektrik teknolojisinin performansını artırmak amacıyla malzeme araştırmaları günümüzde de devam etmektedir. Örneğin, Crossley ve ark., esneklik, hafiflik ve biyouyumluluk gibi avantajları nedeniyle polimer bazlı nano piezoelektrik jeneratörlerin potansiyelini vurgulamaktadır [105].

Öte yandan, Kumari ve Rakotondrabe , kurşun bazlı piezoelektrik malzemelerle ilişkili çevresel riskleri ele alarak, enerji hasadı uygulamaları için kurşunsuz piezoelektrik malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğini tartışmaktadır [106].

Yol yüzeyleri, üzerinden geçen araçlar ve yayalar tarafından oluşturulan periyodik ve uzun süreli mekanik strese maruz kalır. Bu yüzeylerdeki kuvvetler, mekanik deformasyon veya gerilim yoluyla voltaj üretebilen piezoelektrik (PE) cihazlar aracılığıyla toplanarak bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir [107]. Literatürde, piezoelektrik enerji toplayıcıların yerleşimi genellikle yol yüzeyinin hemen içinde veya altında konumlandırılmaktadır (Şekil 10). Bu konumda, geçen araçların ağırlığı dönüştürücüye uyguladığı mekanik stres sayesinde yeterli elektrik akımı üretilir. Bununla birlikte, bazı durumlarda yol yüzeyinin kalınlığı görece küçük olabilir ve altındaki yol katmanları (taban ve alt taban) yüksek stres seviyelerine maruz kalabilir. Bu tür durumlarda, PE cihazlarının taban veya alt taban katmanları içine gömülmesi, cihazların araçlardan kaynaklanan mekanik hasara karşı korunmasını sağlamakta ve uzun ömürlü enerji hasadı imkânı sunmaktadır [108,109].



Şekil 10. Bir aracın piezoelektrik enerji toplayıcı levha üzerinde uyguladığı basınç sayesinde aydınlatılan sokak lambası

Piezoelektrik cihazlar, mevcut enerji hasadı teknolojileri arasında en yüksek verimlilik sağlayan dönüştürücü sınıflarından birini temsil eder. Ayrıca, elektromanyetik enerji toplayıcılardan farklı olarak, piezoelektrik cihazlar yalnızca belirli noktalara (örneğin hız tümsekleri) değil, yol boyunca ardışık olarak yerleştirilebilir. Genellikle, bu cihazların ürettiği çıkışlar paralel bağlı doğrultucu devrelere iletilir ve sistemin toplam enerji üretimini artırmak için ek piezoelektrik dönüştürücüler bu devrelere seri veya paralel olarak bağlanabilir. Doğrultucu devreler, farklı cihazlardan gelen akımlar arasındaki parazitleri önlemek amacıyla bağlantıdan önce konumlandırılır[110,111].

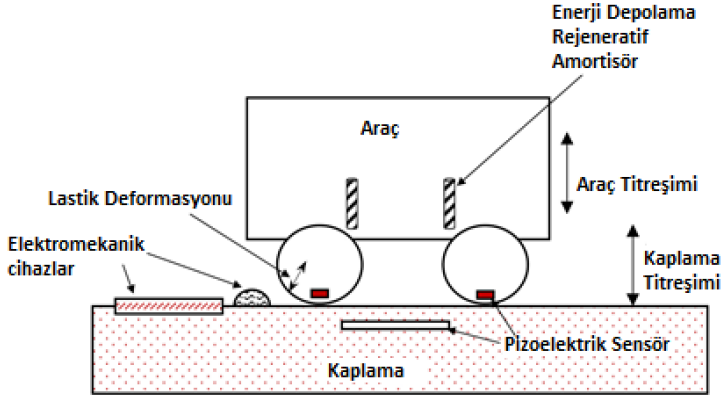
Liu ve arkadaşları, trafik algılama ve enerji hasadı amacıyla bir piezoelektrik dizi tasarlamış ve sistemin farklı yük, hız ve sıcaklık koşullarındaki performansını kapsamlı bir şekilde analiz etmişlerdir. Deneysel testler ve sayısal simülasyonlar, sinyal gücünü ve enerji dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla optimum eleman konfigürasyonu, yalıtım stratejileri ve poliüretan tabaka kalınlığı üzerinde yönlendirici bilgiler sağlamıştır[112]. Piezoelektrik sistem modellerindeki güncel gelişmeler, malzeme ve devre parametrelerinin evrensel ölçekleme yaklaşımıyla uyarlanması, farklı trafik yoğunlukları ve yükleme senaryolarında çıkış gücü verimliliğini

kayda değer ölçüde artırabileceğini göstermektedir[113].

Dayanıklılık, özellikle milyonlarca araç yük döngüsüne maruz kalan kaldırımlara yerleştirilmiş piezoelektrik dönüştürücüler için titreşim tabanlı enerji hasadında kritik bir parametredir. Bu cihazlar zamanla yorulma kaynaklı arızalara maruz kalmakta ve bu nedenle koruyucu önlemler gerektirmektedir. Beton bloklar[114], mermer küpler[115] veya harç parçaları [116] içine kapsülleme yöntemi, dönüştürücüleri mekanik stresten koruyarak kullanım ömürlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Örneğin, 0,7 MPa basınç ve 20 Hz frekansta test edilen yeni tip bir piezoelektrik enerji toplayıcı, 2,1 mm derinliğindeki bir kaldırım izi altında 500.000 yükleme döngüsünden sonra açık devre voltajının %97,4'ünü koruyarak yalnızca %2,6'lık bir azalma göstermiş ve yüksek dayanıklılığını ortaya koymuştur[117].

3.3.1. Mekanik Yükleme ve Titreşim

Kaldırımlar, başta hareket eden araçlar olmak üzere, kısmen de yayaların etkisiyle sürekli mekanik yükleme ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Araçların hareketi, yol yüzeyinde basınç, titreşim ve gerilme oluşturur; bu mekanik enerji, piezoelektrik, elektromanyetik veya elektrostatik dönüşüm teknikleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Şekil 11). Özellikle, yol yüzeyindeki düzensizliklerin neden olduğu araç titreşimleri, enerji geri kazanımlı sönümleyiciler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.



Şekil 11. Yollardan ve Araçlardan mekanik enerji toplama mekanizmaları

Piezoelektrik enerji hasadı yöntemi, piezoelektrik dönüştürücüler aracılığıyla mekanik titreşimleri elektrik enerjisine çevirir. Bu yöntemde iki temel teknoloji öne çıkmaktadır: sıkıştırma tabanlı (compression-based) ve saptırma tabanlı (deflection-based) sistemler [118].

Sıkıştırma tabanlı sistemlerde, piezoelektrik malzeme yığınları, üzerinden bir araç lastiğinin geçmesiyle sıkıştırılır ve bu mekanik deformasyon sonucunda anlık elektrik enerjisi üretilir.

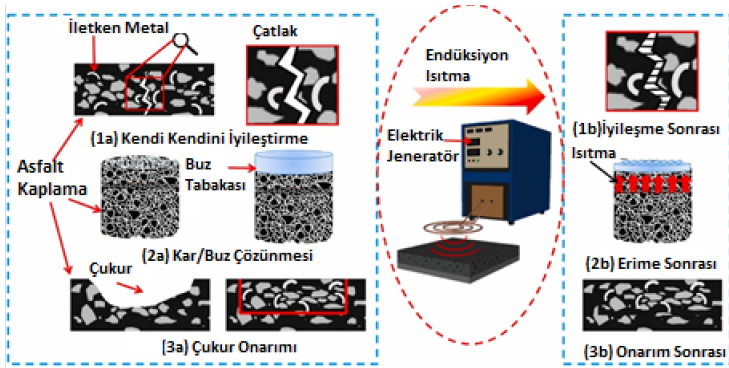
Saptırma tabanlı sistemlerde ise, bir dizi konsol kiriş veya bükülmüş piezoelektrik eleman, harici bir uyarı ile (örneğin bir aracın geçişiyle) titreşime geçer ve bu titreşimler sönümlenene kadar enerji üretimi devam eder.

3.4. Yollarda Elektromanyetik Enerji Depolama

Küresel enerji kaynaklarının tükenmesi ve çevre kirliliği, dünya genelinde hızla artan nüfus ve ekonomik büyümenin bir sonucu olarak günümüzün en önemli küresel sorunları hâline gelmiştir [119]. Karbon nötrlüğü hedefleri doğrultusunda, enerji tasarruflu teknolojilerin geliştirilmesi ve sürdürülebilir güç kaynaklarının sağlanması kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, yol mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar,

farklı enerji dönüşüm mekanizmaları üzerine çalışmalar yürüterek sürdürülebilir altyapı sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır. Bu teknolojiler arasında, yüksek enerji verimliliği potansiyeli nedeniyle dikkat çeken elektromanyetik indüksiyon teknolojisi, araştırmacılar tarafından elektromanyetik tabanlı çok işlevli asfalt kaplamalar geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır [120,121].

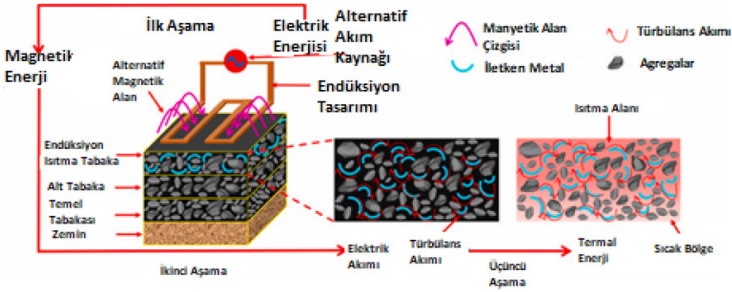
Bu teknoloji, asfalt kaplamaya iletken metal katkı malzemeleri eklenerek yol yüzeyine elektriksel iletkenlik kazandırılması prensibine dayanmaktadır. Böylece kaplama, alternatif bir manyetik alanın etkisi altında indüksiyon yoluyla ısı üretebilme özelliği kazanır. Bu süreçte, yol kaplaması enerji dönüşümü sayesinde, kendi kendini iyileştirme, kar ve buz çözme ile yüzey çatlaklarının onarımı için gerekli sıcaklık seviyelerine ulaşabilmektedir (Şekil 12). Son yıllarda, Elektromanyetik Tabanlı Çok İşlevli Asfalt Kaplamalar (EM-MAP), çevre dostu, yüksek verimlilikte ve temassız ısıtma kapasitesine sahip olmaları nedeniyle araştırmacıların yoğun ilgisini çeken yenilikçi bir konu hâline gelmiştir.



Şekil 12. Elektromanyetik tabanlı çok işlevli asfalt kaplamanın fonksiyonları [122]

Aslında, yukarıda belirtilen işlevlerin gerçekleştirilmesi sürecinde Elektromanyetik Tabanlı Çok İşlevli Asfalt Kaplamalar (EM-MAP) üç aşamalı bir enerji dönüşüm

mekanizmasından geçmektedir [123]. Şekil 13'te verildiği gibi birinci aşama, elektrik enerjisinin manyetik enerjiye dönüştürülmesini kapsamaktadır; bu aşamada, alternatif akımla çalışan endüksiyon ısıtma ekipmanları yol yüzeyinde alternatif bir manyetik alan oluşturmaktadır. İkinci aşama, manyetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini ifade eder; bu süreçte, yol yüzeyinde yer alan iletken metal katkıları, alternatif manyetik alana maruz kaldıklarında girdap akımları (eddy currents) üretmektedir. Üçüncü aşamada ise, iletken metalde oluşan bu girdap akımları Joule etkisi sonucunda ısı üretmekte, bu ısı daha sonra çevredeki asfalt matrisine ve agregalara aktarılmaktadır.



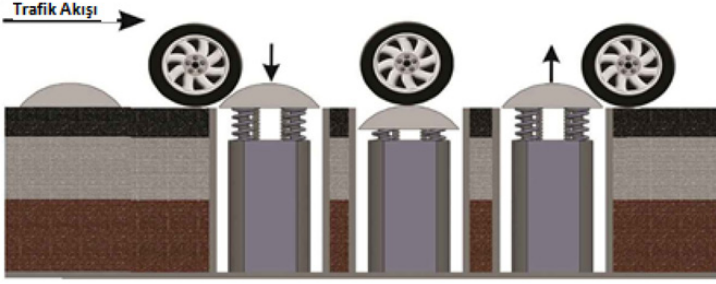
Şekil 13. Elektromanyetik tabanlı asfalt yol kaplamalarının üç aşamalı enerji dönüşüm süreci

Birçok araştırmacı, enerji dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla özellikle birinci ve üçüncü aşamalardaki süreçler üzerinde yoğunlaşmıştır. Ancak, ikinci aşamadaki manyetik enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm mekanizması üzerine yapılan araştırmaların hâlen sınırlı olduğu ve bu konunun gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma potansiyeli taşıdığı görülmektedir. Öte yandan, araştırmacılar birinci aşamada elektrik enerjisinin manyetik enerjiye dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla, indüksiyon ısıtma ekipmanının ısıtma gücü, frekansı ve indüksiyon bobini tipleri gibi parametreleri optimize etmeye yönelik çalışmalar yürütmektedir. Liu ve arkadaşları, ısıtma gücü ve frekansının

enerji dönüşüm verimliliği üzerindeki etkilerini incelemiş ve her iki parametredeki artışın EM-MAP sisteminin ısıtma hızını yükselttiğini belirlemiştir [124]. Bununla birlikte, ısıtma oranındaki artış, birinci aşamadaki enerji dönüşüm verimliliğinde doğrudan bir iyileşme anlamına gelmemektedir. Araştırmacılar, ısıtma gücü ve frekansını artırarak yalnızca alternatif manyetik alanın yoğunluğunu yükseltmiş ve bu şekilde ısıtma oranını artırmışlardır. Ancak, bu parametrelerin kontrolsüz biçimde artırılması enerji israfına yol açabilmektedir [125].

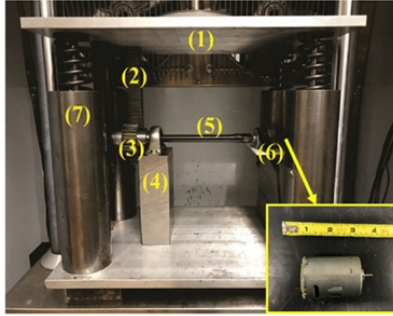
Apostolidis ve çalışma arkadaşları, birinci aşamada kullanılan iki tek turlu indüksiyon bobini arasındaki yatay mesafenin enerji dönüşüm verimliliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bulgular, bobinler arası mesafe arttıkça EM-MAP yüzey sıcaklığının da yükseldiğini göstermiştir. Bununla birlikte, yatay mesafenin artışı sistemin toplam kurulum maliyetini yükselttiğinden, enerji verimliliği ile ekonomik uygulanabilirlik arasında bir denge kurulması gerektiği sonucuna varılmıştır [126].

Gholikhani ve çalışma arkadaşları, yollarda hız tümseği biçiminde kullanılmak üzere bir elektromanyetik enerji toplayıcı geliştirmiştir (Şekil 14). Bu sistem, bir jeneratörün içerisindeki milin dönmesini sağlamak amacıyla, düşey hareketi dönme hareketine dönüştüren bir kremayer-pinyon mekanizması kullanılarak tasarlanmıştır. Kremayerin, yanal hareketleri sönümleyebilmesi için hareketli mekanik elemanlara bağlanması gerekmektedir. Bu yaklaşım, yapısal basitlik, mekanik dayanıklılık ve bakım kolaylığı gibi bir dizi avantaj sunmaktadır [127].



Şekil 14. Elektromanyetik hız tümseği temelli yol enerji depolama sisteminin şematik gösterimi [127]

Deneysel sonuçlar, geliştirilen sistemin günde yaklaşık 10 Wh enerji üretebildiğini ve hız tümseğine bir dişli kutusu gibi amplifikasyon sağlayan ek bir bileşen entegre edilmesiyle verimliliğin daha da artırılabilceğini ortaya koymuştur. Hız tümseklerinin enerji hasadı amacıyla kullanılmasının başlıca avantajı, elde edilen enerjinin sistemin kendi çalışmasını sürdürmesi, çevredeki altyapılara —özellikle yol aydınlatmalarına— güç sağlaması ve yoğun trafik bölgelerinde hız kontrolüne katkıda bulunmasıdır. Ayrıca, sistemin geçen araçları ağırlık ve boyutlarına göre sınıflandırma potansiyeli bulunmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu teknoloji hâlen geliştirme aşamasındadır ve gelecekte elde edilecek enerji çıktısının önemli ölçüde artması beklenmektedir. Gholikhani ve arkadaşları, Şekil 15'te gösterildiği üzere, küçük ölçekli bir jeneratör içeren elektromanyetik bir enerji toplayıcı prototipi geliştirmiştir. Tasarlanan prototip, aşağıdaki ana bileşenlerden oluşmaktadır: (1) üst plaka, (2) kremayer, (3) pinyon ve kavrama mekanizması, (4) destek elemanı, (5) şaft, (6) elektromanyetik jeneratör ve (7) üst plaka için destek ve yay sistemi.



Şekil 15. Elektromanyetik enerji depolama prototipi[128]

Prototip, basitlik ve mekanik dayanıklılık avantajları nedeniyle kremayer-pinyon prensibine dayalı olarak üretilmiştir. Cihazın performansı, trafik koşullarını temsil edecek şekilde Evrensel Test Makinesi (UTM) kullanılarak gerçekleştirilen çoklu yük döngüsü testleriyle değerlendirilmiştir. Testler sırasında üretilen gerilim ve güç çıktıları ölçülmüş; her yükleme döngüsü sonunda 3,21 mW'lık bir güç çıkışına ulaşıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, mevcut prototipin temel ve basit bir tasarımı temsil ettiği dikkate alındığında, tasarım optimizasyonu ve yapısal iyileştirmeler ile enerji üretim kapasitesinin önemli ölçüde artırılabilmesi öngörülmektedir. Araştırmacılar, bu teknolojinin özellikle uzak ve altyapı erişimi kısıtlı **bölgelerde** uyarı işaretleri ve aydınlatma sistemlerinin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılabileceğini önermektedir[128].

3.4.1. Elektromanyetik Ticari Cihazlar ve Sistemler

Yol yüzeylerine entegre edilen elektromanyetik enerji toplama sistemleri, taşıt geçişleri sırasında ortaya çıkan kinetik enerjinin geri kazanımı için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Bu sistemler, taşıtların yol yüzeyine uyguladığı dikey (yukarı-aşağı) mekanik hareketi, uygun mekanik düzenekler aracılığıyla dönme hareketine dönüştürerek bir elektromanyetik jeneratörün çalışmasını sağlar. Böylece, araç geçişlerinden kaynaklanan mekanik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülerek çevresel enerji geri kazanımına katkıda bulunur.

Pavnext, F. Duarte tarafından kurulan ve geliştirme sürecini tamamlamış bir girişim olup, günümüzde gerçek yol uygulamalarında kullanılan ana ürünü NEXT-road ile dikkat çekmektedir. NEXT-road, araçlardan kaynaklanan kinetik enerjiyi toplayarak elektrik enerjisine dönüştürmek ve aynı zamanda araçların hızını kontrol etmek amacıyla yol kaplama yüzeyine entegre edilen bir cihazdır (Şekil 16). Sistem, sürücülerin ve araç yolcularının sürüş konforunu etkilemeyecek şekilde tasarlanmış ve saha testleriyle performansı doğrulanmıştır [129].



Şekil 16. (a) Pavnext tarafından geliştirilen NEXT-road prototipi, (b) Pavnext Co. Tarafından uygulanacak olana ilk pilot tesis

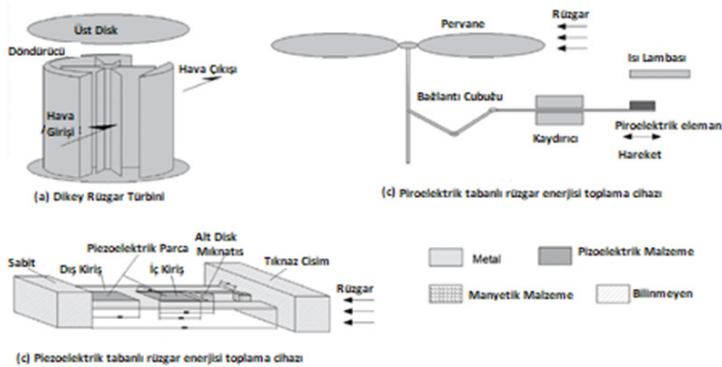
Toplanan enerji, yol yüzeyinin dışında depolanabilir ve elektrik şebekesine aktarılabilir veya lokomotiflerdeki trafik izleme sistemleri gibi cihazlara güç sağlamak amacıyla kullanılabilir. Şirketin gerçekleştirdiği testler, 20 metre

uzunluğundaki bir NEXT-road uygulamasında, hareket eden hafif bir aracın hızına bağlı olarak 10 Wh'a kadar enerji üretebileceğini göstermiştir. Bu değerlere göre, günlük 1000 araç geçişi sonucunda yaklaşık 10 kWh, yıllık olarak ise 3,65 MWh enerji elde edilebilmektedir.

3.5. Yollarda Rüzgâr Enerjisi Depolama

Araç hareketleri, yol yüzeyinde tipik olarak türbülanslı hava akımları oluşturarak düşük hızlı rüzgâr enerjisi potansiyeli yaratır [130]. Bu türbülans, otoyol kenarlarına entegre edilen rüzgâr türbinleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu amaçla kullanılan yaygın sistemlerden biri, dikey eksenli rüzgâr türbini (VAWT) olup, her yönden rüzgâr akışını yakalayabilmesi, düşük gürültü seviyesine sahip olması, düşük maliyetli olması, kentsel ortamlara uygunluğu ve kompakt yapısı nedeniyle avantajlıdır [131].

VAWT sistemlerinin rotor konfigürasyonu, kanat boyutları ve kurulum konumu, enerji üretim verimliliği üzerinde belirleyici etkilere sahiptir [132]. Ayrıca, manyeto-jeneratör ile çalışan geleneksel VAWT'lerin yanı sıra, son yıllarda piezoelektrik ve piroelektrik tabanlı rüzgâr türbinleri de geliştirilmiş olup, bu sistemler düşük hızlarda bile enerji üretimini mümkün kılmaktadır [133]. Şekil 17'de karayolları için rüzgâr türbini tasarım şeması verilmiştir.



Şekil 17. Karayolları için Rüzgâr Türbini Tasarım Şeması

Han ve arkadaşları, karayollarında enerji hasadı amacıyla kullanılabilecek rüzgâr türbinlerinin performansını değerlendirmeden önce, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımını kullanarak farklı araç tipleri için tipik türbülans özelliklerini analiz etmişlerdir. Araç hareketi, tepe hızı olarak adlandırılan maksimum rüzgâr hızını oluşturmaktadır. Bu değer, rüzgâr hızındaki artış veya azalmaları (yükselme ve zayıflama) gösterirken, aynı zamanda çevresel rüzgâr koşullarını da dikkate almaktadır. Negatif değerler ise, araç hareketinin ters yönünde oluşan türbülansın yarattığı rüzgârı temsil etmektedir [134].

Elde edilen bulgular, bu teknolojinin otoyollardan kayda değer miktarda enerji hasadı sağlayabileceğini ve üretilen enerjinin LED aydınlatma sistemlerini beslemek için yeterli olabileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, rüzgâr türbini sistemlerinin karmaşık tasarımı, sonuçların yalnızca belirli araç tiplerine dayandırılmış olması ve kuşlar gibi canlılar açısından güvenlik riskleri içermesi, teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlayan başlıca faktörler olarak belirtilmiştir [135].

3.6. Yollarda Faz Değişim Malzemeleri (FDM) ile Enerji Depolama

Faz değişim malzemeleri (FDM)'ler, özellikle katı-sıvı faz dönüşümü sırasında yüksek miktarda gizli ısı emme veya salma yetenekleri sayesinde termal enerjinin depolanmasında potansiyel taşıyan malzemeler olarak tanımlanmaktadır [136,137]. Bu malzemeler çevresel koşullardaki değişimlere tepki vererek, sıcaklıklarında belirgin bir değişiklik olmaksızın ısıyı emme, depolama veya geri salma özelliği göstermektedir [138]. PCM'lerin keşfi ve başarılı şekilde uygulanması 1970'li yıllara dayanmaktadır [139]. İlk uygulamalar, termal enerji depolama yoluyla yapı malzemelerinin ısıl verimliliğini artırmaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir [140,141]. Günümüzde ise bu malzemeler; soğutma sistemleri, ısı transferi süreçleri ve termal koruma sistemleri gibi çeşitli mühendislik alanlarında geniş uygulama alanı bulmaktadır [142].

Ayrıca, termal özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla köpüklü malzemelerde [143,144] ve son yıllarda asfalt gibi termoplastik yapıdaki malzemelerde de kullanılmaktadır [145,146].

Faz değişim malzemelerinin (FDM'lerin) geniş bir uygulama yelpazesine sahip olması, bu malzemelerin geleneksel malzemelere kıyasla sunduğu çeşitli üstünlüklerden kaynaklanmaktadır. Bu avantajlar arasında özellikle uygulama kolaylığı ve yüksek sistem güvenilirliği ön plana çıkmaktadır [140]. Söz konusu özellikler, günümüzde FDM'lerin bina sistemleri, elektronik bileşenler ve lojistik sektörleri gibi farklı endüstrilerde ticari uygulamalara entegre edilmesini mümkün kılmıştır [147]. Ancak, yol kaplamaları gibi bazı mühendislik alanlarında bu teknolojinin geliştirme ve optimizasyon süreçleri halen devam etmektedir.

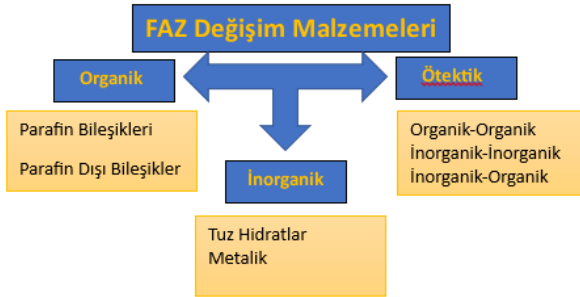
FDM'ler, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve düşük güç gereksinimi nedeniyle de dikkat çekmektedir. Artan enerji maliyetleri, bu malzeme grubunun geliştirilmesini teşvik eden bir diğer önemli faktördür. Ayrıca, faz geçişi sürecinde neredeyse izotermal bir sıcaklık aralığında çalışmaları, onlara yüksek enerji verimliliği kazandırmaktadır. Sahip oldukları çok sayıda avantaj sayesinde FDM'ler; serbest soğutma, buz çözme sistemleri, termal yönetim uygulamaları ve iklimlendirmede enerji verimliliğinin artırılması gibi pek çok alanda etkin biçimde kullanılmaktadır [148].

Faz değişim malzemelerinin en umut verici kullanım alanlarından biri de yol kaplamalarıdır. Bu alanda FDM uygulamalarının temel amacı, sıcaklık kontrolünü sağlamaktır [149]. FDM'ler, düşük sıcaklık koşullarında buz ve kar oluşumunu önlemenin yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda ısı adalarının oluşumunu azaltmaya yardımcı olarak kaplama yüzey sıcaklığının dengelenmesini sağlar. Bu belirgin işlevlerinin ötesinde, söz konusu malzemeler oksidatif yaşlanmanın azaltılması, tekerlek izi oluşumunun önlenmesi ve sünme davranışının en aza indirilmesi gibi kaplama performansını artırıcı etkiler de göstermektedir [150].

Bununla birlikte, FDM'lerin yol mühendisliği malzemelerine entegrasyonu önemli avantajlar sunsa da uygulama süreci çeşitli teknik zorluklar içermektedir. Özellikle, FDM'lerin asfalt, bitümlü karışımlar veya beton sistemlerine dâhil edilmesi sırasında malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinde istenmeyen değişiklikler meydana gelebilmektedir. Bu durum; mekanik dayanımın azalması, çatlama eğiliminin artması ve kimyasal etkileşimlere bağlı diğer bozulmalar gibi olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir [151].

Faz geçişi sırasında büyük miktarda ısı depolayabilen ve ters yöndeki geçiş sürecinde bu ısıyı aynı oranda geri salabilen birçok madde bulunmaktadır. Saf maddelerde faz değişimi sabit bir sıcaklıkta gerçekleşir ve erime ile katılaşma süreçleri, faz değişim malzemesinin (FDM'nin) fizikokimyasal özelliklerinde herhangi bir bozulma olmaksızın çok sayıda döngü boyunca tekrarlanabilir [152,153].

Örneğin, Huang ve çalışma arkadaşlarına göre [154,155], uygun türde parafin, erime süreci sırasında fazla ısının emilmesi yoluyla fotovoltaiik (PV) hücrelerin sıcaklığını sabitlemek amacıyla kullanılabilir. Benzer şekilde, Melcer ve diğerlerinin bildirdiği üzere, farklı özel uygulamalara yönelik olarak ticari ölçekte temin edilebilen çeşitli faz değişim malzemeleri mevcuttur [156]. FDM'lerin sınıflandırılması Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 18. FDM'lerin Sınıflandırılması

Makromoleküler hidrokarbonlara, özellikle parafinler ve mumlara dayalı faz değişim malzemeleri (FDM'ler), ısı

depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilmektedir [157]. Bu bileşiklerin FDM olarak kullanımı; yüksek ısı kapasite, toksik olmama, kimyasal olarak nötr yapı, güvenilirlik, aşındırıcı olmama ve düşük üretim maliyeti gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Ancak, organik faz değişim malzemelerinin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar arasında düşük ısıl iletkenlik ($\sim 0,2 \text{ W/(mK)}$), geniş bir erime sıcaklığı aralığı, yalnızca teknik sınıf parafinlerin kullanılabiliirliği nedeniyle yüksek maliyet ve düşük hacimsel gizli ısı depolama kapasitesi yer almaktadır [158].

Organik FDM'ler

Organik faz değişim malzemeleri (FDM'ler); parafinler, yağ asitleri ve diğer organik bileşikler olmak üzere çeşitli alt gruplara ayrılmaktadır [149]. Bu malzeme grubunun en önemli avantajlarından biri, korozyona neden olmamalarıdır [159]. Ayrıca, kimyasal ve fiziksel olarak kararlı yapıları sayesinde geniş bir sıcaklık aralığında kararlı performans sergileyebilmekte ve bu özellikleriyle uzun süreli kullanım için uygunluk göstermektedirler. Bununla birlikte, organik FDM'lerin en önemli dezavantajı yanıcılık özellikleridir; bu durum özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan uygulamalarda güvenlik açısından dikkate alınması gereken bir faktördür.

Parafin, organik FDM'ler arasında en yaygın olarak kullanılan malzemedir. Geliştirilmiş ısı özellikleri sayesinde, özellikle enerji verimliliğini artırmaya yönelik yapı malzemelerinde bileşen olarak geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [160,161]. Yol kaplamaları dâhil olmak üzere farklı yapı malzemelerinde kullanım durumlarında, parafin genellikle doğrudan malzeme matrisine eklenmek yerine, sızıntı ve bozunmayı önlemek amacıyla polimetil metakrilat gibi polimer kabuklar içerisinde mikroenkapsülasyon yöntemiyle kullanılmaktadır [162]. Bu yöntem, parafinin hem termal kararlılığını hem de malzeme ile uyumluluğunu artırarak faz değişim sürecinin daha kontrollü ve verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır.

İnorganik FDM'ler

İnorganik faz değişim malzemeleri (FDM'ler); hidratlı tuzlar, erimiş tuzlar, metaller ve diğer alt gruplardan oluşmaktadır. Bu malzemeler, yüksek ergime ısısına, yüksek ısıl iletkenliğe ve düşük hacim değişim oranına sahip olmalarıyla karakterize edilir. Örneğin, yağ tuzları yaklaşık 0,5 °C'lik düşük bir erime noktasına sahipken, palmitik asit gibi diğer bileşikler 64 °C'ye kadar daha yüksek erime sıcaklıkları sergileyebilmektedir. Ayrıca bu grubun gizli ısı depolama kapasitesi 46–196,9 kJ/kg aralığında değişmekte olup, bu değer organik FDM'lere kıyasla daha geniş bir enerji depolama aralığı sunmaktadır.

İnorganik FDM'lerin en önemli avantajlarından biri, yanıcı olmamaları ve çevresel açıdan güvenli bir alternatif oluşturmalarıdır. Bunun yanı sıra, bu malzemeler genellikle kolay temin edilebilir ve maliyet açısından rekabetçidir. Ancak, en önemli dezavantajları korozyon eğilimlerine karşı duyarlılıklarıdır; bu durum özellikle metalik bileşenlerle temas eden sistemlerde uzun dönemli performansı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu grup içerisinde en yaygın olarak kullanılan malzemeler tuz hidratları ve metalik alaşımlardır[163].

İnorganik FDM'ler termal enerji depolama uygulamaları kapsamında kapsamlı biçimde araştırılmıştır. Yapı mühendisliği alanında özellikle hidratlı tuzlar, çatı kaplama sistemleri gibi yapı elemanlarında ısıl konforun artırılması amacıyla kompozit bileşen olarak test edilmiştir[164]. Yol mühendisliği uygulamalarında ise bu FDM grubunun kullanımı oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte, asfalt karışımlarına nikel-titanyum (NiTi) alaşımı eklenerek gerçekleştirilen bazı çalışmalar, bu malzemelerin yol kaplamalarında sıcaklık düzenlemesi açısından potansiyel taşıdığını göstermektedir [165].

Ötektik FDM'ler

Bu grubun sınıflandırılması, bileşenlerin kimyasal karakterine dayanmakta olup üç ana alt gruba ayrılmaktadır: organik–organik, inorganik–organik ve inorganik–inorganik

ötektikler. Ötektik faz değişim malzemeleri (FDM'ler), farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin belirli oranlarda bir araya gelmesiyle oluşturulan sistemlerdir. Bu malzemeler, keskin erime noktalarına sahip olmaları ve yüksek hacimsel ısı depolama kapasiteleriyle karakterize edilir. En önemli avantajlarından biri, erime sıcaklıklarının bileşen oranları ayarlanarak istenen sıcaklık aralığına göre özelleştirilebilmesidir[166].

Ötektik FDM'ler, organik ve inorganik FDM'lere kıyasla daha yeni bir araştırma alanı olup, termal, kimyasal ve mekanik özellikleri henüz tam anlamıyla ortaya konmamıştır. Bu nedenle, performanslarının optimize edilmesi ve uzun dönem kararlılıklarının belirlenmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır[149].

Yapı malzemeleri alanında ötektik FDM'lerin uygulama potansiyeli giderek artmaktadır. Örneğin, Haily ve çalışma arkadaşları, binalarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla jeopolimer esaslı malzemelere laurik asit ve kaprik asitten oluşan ötektik bir karışım eklemiş ve bu uygulama sonucunda sürdürülebilir, enerji tasarruflu yapı malzemeleri geliştirilmiştir[167]. Benzer şekilde, Baskar ve arkadaşları, boyalara laurik ve palmitik asit içeren ötektik karışımlar ekleyerek yürüttükleri çalışmada, elde edilen kaplamaların beton yüzey sıcaklığını düşürmede etkili olduğunu ve termal düzenleme açısından yüksek verimlilik sağladığını göstermiştir[168]. Son yıllarda ise ötektik FDM'ler, termal stabilite ve ısı depolama potansiyelleri nedeniyle yol mühendisliği alanında da katkı malzemesi olarak incelenmeye başlanmıştır[166].

Faz değişim malzemelerinin (FDM) yol kaplamalarına entegre edilmesine yönelik başlıca üç teknoloji bulunmaktadır: daldırma, emdirme ve kapsülleme yöntemleri. Kapsülleme yöntemi ise genellikle makro ve mikro kapsülleme olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır[163]. Bunun dışında, FDM'nin bir boru sistemi veya ısı değişim ağları aracılığıyla dağıtılması

gibi alternatif yöntemler de literatürde yer almakla birlikte, bu yaklaşımlar oldukça sınırlı sayıda çalışmada değerlendirilmiş ve uygulamada nadiren tercih edilmiştir [169].

FDM'nin doğrudan çimentolu veya bitümlü karışımlara eklenmesi, malzemenin mikroyapısal bütünlüğü üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Özellikle, FDM katkısı çimento hamurunun hidrasyon sürecini yavaşlatmakta, agrega ile matris arasındaki bağlanma dayanımını azaltmakta ve bunun sonucunda betonun mekanik performansında belirgin bir düşüşe neden olmaktadır. Benzer şekilde, asfalt kaplamalarda doğrudan eklenen FDM'ler, bitümün viskoelastik ve reolojik özelliklerini değiştirerek karışımın stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir [170].

Bu nedenlerle, güncel araştırmalarda FDM'ler genellikle kapsüllenmiş formda ya da hafif gözenekli agregaların emdirilmesi yoluyla kullanılmaktadır. Bu yöntem, FDM'nin hem çevresel etkilerden korunmasını hem de mekanik yükler altında bütünlüğünü korumasını sağlamaktadır. Ancak, bu durumda kapsülleme ortamının doğru seçimi kritik öneme sahiptir. Seçilen kapsülleme malzemesi, yol kaplamalarının maruz kaldığı tekrarlanan trafik yükleri, termal genleşme-daralma döngüleri ve mekanik gerilmelere karşı yeterli direnç göstermelidir. Aksi takdirde, kapsüllerin çatlaması veya kırılması sonucu FDM'nin sızması, faz değişim işlevinin kaybolmasına ve dolayısıyla malzemenin ısı enerji depolama kapasitesinin azalmasına yol açacaktır [171].

Sonuç olarak, FDM'nin yol kaplamalarına entegrasyonunda uygun kapsülleme tekniğinin seçimi hem ısı performansın sürekliliği hem de mekanik dayanımın korunması açısından belirleyici bir faktördür. Bu kapsamda, kapsül malzemesinin termal kararlılığı, mukavemeti ve matrisle uyumluluğu üzerine yapılan detaylı karakterizasyon çalışmaları, FDM destekli akıllı yol kaplama sistemlerinin geliştirilmesinde temel bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

4. AKILLI MALZEME TEKNOLOJİSİ

Endüstriyel gelişim, yapılarda yüksek uyum kabiliyeti, güvenlik, performans, dayanıklılık ve enerji üretim potansiyeli sunan çok işlevli malzemelerin önemini giderek daha fazla ortaya koymaktadır [172,173]. Bu malzemelerin kentsel altyapı, inşaat ve enerji üretim sistemlerinde kullanımı, çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlarken sürdürülebilirliği ve verimliliği önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Öte yandan, günümüzde enerji üretimi büyük ölçüde fosil yakıtlara dayalı olup, bu durum hem çevresel tahribatı artırmakta hem de doğal kaynakların hızla tükenmesine neden olmaktadır [174]. Bu nedenle, araştırma ve uygulama alanlarında odak noktası giderek alternatif enerji kaynakları ile yenilikçi enerji toplama yöntemlerine yönelmektedir. Ancak güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların doğası gereği kesintili olması, sürekli ve güvenilir enerji üretimine yönelik yeni çözümlere duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, özellikle hareket hâlindeki araçlar tarafından oluşturulan titreşim veya deformasyon enerjisi gibi çevremizde bol miktarda mevcut ancak çoğunlukla kullanılmayan mekanik enerjinin etkin biçimde dönüştürülmesi önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Şekil hafızalı alaşımlar ve piezoelektrik malzemeler bu noktada öne çıkan, enerji hasadı ve yapısal sağlık izleme gibi uygulamalarda geniş potansiyel sunan iki önemli çok işlevli malzeme türünü temsil etmektedir [175].

Piezoelektrik malzemeler (PZT), uygulanan mekanik gerilme altında elektrik yükü üretebilmeleri ve bir elektrik alanına maruz kaldıklarında şekil değiştirebilmeleri nedeniyle benzersiz özelliklere sahip çok işlevli malzemelerdir. Bu çift

yönlü elektro-mekanik etkileşim, piezoelektrik malzemeleri sensör, aktüatör, dönüştürücü ve enerji hasadı sistemleri gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında son derece değerli kılmaktadır. Bu tür malzemeler genellikle kristal yapıda olup, asimetrik atomik dizilimleri nedeniyle mekanik stres uygulandığında yük ayrışması meydana gelir; bu durum, elektriksel potansiyel farkı ve dolayısıyla gerilim oluşumuna yol açar [176]. Bu olgu, sıkıştırma veya germe kuvvetlerinin elektriksel yük üretimine neden olduğu piezoelektrik etki olarak tanımlanmaktadır.

Piezoelektrik enerji hasadı alanındaki son gelişmeler, yenilikçi yaklaşımlar ve kapsamlı araştırmalarla yönlendirilmiştir [177]. Ye ve arkadaşları, farklı seramik malzemelerin piezoelektrik özelliklerini analiz ederek karşılaştırmış ve karayolu enerji hasadı uygulamaları için yüksek verimliliğe sahip özel bir piezoelektrik seramik yöntemi geliştirmiştir [178]. Jung ve çalışma ekibi, bir piezoelektrik giriş ve enerji yönetim devresi entegre edilen bir trafik yavaşlatıcı sistemi için enerji toplama tasarımı geliştirmiş; ayrıca, esnek enerji toplayıcının bükülme davranışını optimize etmek amacıyla sonlu elemanlar analizine dayalı bir yapısal optimizasyon yaklaşımı önermiştir [179]. Benzer şekilde, Lafarge ve diğerleri, araç süspansiyon sistemlerinde piezoelektrik konsol girişleri kullanarak enerji hasadını tahmin etmeye yönelik yenilikçi bir yöntem geliştirmiştir. Bu yaklaşım, önceki teorik modellere kıyasla gerçek saha koşullarında elde edilebilecek enerji miktarının daha güvenilir ve uygulanabilir bir tahminini sunmaktadır [180]. Ayrıca, enerji toplama sistemlerinde en uygun konumun belirlenmesi, sistem performansını artırmada kritik bir faktör olup, bu konuya ilişkin çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır [181].

Bununla birlikte, piezoelektrik malzemeler özellikle yol tümsekleri veya araç geçişleri gibi tekrarlayan mekanik yüklemelerin söz konusu olduğu enerji hasadı uygulamalarında mekanik yorgunluğa karşı hassasiyet göstermektedir. Bu

durum, malzemenin uzun dönem performansını ve enerji dönüşüm verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir sınırlayıcı faktördür. Serrano ve arkadaşları, piezoelektrik malzemelerde çatlak oluşumunun mikro jiroskop performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek, malzeme bozulmasının sistem yanıtı üzerindeki kritik rolünü ortaya koymuştur [182]. Benzer şekilde, Salazar ve arkadaşları, verimli ve uzun ömürlü piezoelektrik sistemler tasarlayabilmek için malzeme yorgunluğunun mekanizmalarının anlaşılmasının önemini vurgulamıştır [183].

Wang ve çalışma arkadaşları, yüksek performanslı bir piezoelektrik sensör geliştirerek bu sensörü tipik trafik yüklerini simüle eden 10 milyon yük döngüsüne tabi tutmuştur [184]. Araştırmacılar, aralıklı ve sürekli yükleme koşulları altında malzemenin dayanıklılık sınırlarını değerlendirmiş ve bu sınırların sistem kararlılığı üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Genel olarak, piezoelektrik malzemelerin mekanik titreşimlerin frekansı ve genliği kontrol altına alındığında daha kararlı, duyarlı ve verimli çalıştığı; bunun da çeşitli enerji hasadı uygulamalarında daha yüksek performans ve güvenilirlik sağladığı belirlenmiştir [185].

Bu çalışmalar, piezoelektrik malzeme sistemlerinde malzeme bileşiminin, geometrik konfigürasyonun ve yükleme koşullarının optimize edilmesinin yüksek verimlilik ve uzun ömür elde etmek açısından kritik öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Alternatif olarak, şekil hafızalı alaşımların (SMA'ların) akıllı amortisörler olarak kullanılması, piezoelektrik malzemelerin ömrünü ve performansını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir [186]. Martensitik faz dönüşümüne dayalı şekil hafızası etkisi (SME) ve yalancı elastiklik etkisi (PE) gibi olağanüstü özellikleri sayesinde SMA'lar; tıp, mekatronik, robotik ve inşaat mühendisliği gibi farklı alanlarda dikkate değer bir uyarlanabilirlik sergilemektedir [187]. Bu alaşımlar, ostenit ve martensit fazları arasındaki geçiş sayesinde termal veya

mekanik olarak etkinleştirilebilir. Piezoelektrik malzemelerle entegrasyonu, yalnızca bu malzemeler üzerindeki mekanik gerilme ve yorulmayı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sistemin genel ömrünü uzatarak enerji üretimi ve verimliliği de artırır [188]. Bu doğrultuda, literatürde hem SMA'ların hem de piezoelektrik malzemelerin avantajlarını bir araya getiren entegre enerji hasadı sistemlerine yönelik çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Örneğin, Guo ve ark., hibrit piezoelektrik ve güneş enerjisi sistemlerinin potansiyelini vurgulayarak enerji hasadı yaklaşımlarına ilişkin kapsamlı bir değerlendirme sunmuştur [189]. Benzer şekilde, Adeodato ve ark., piezoelektrik ve şekil hafızalı alaşım malzemeler kullanılarak geliştirilen kompozit bir amortisörün tasarımını ve bu malzeme kombinasyonunun şok emilim verimliliğine etkisini incelemiştir [190]. Liu ve ark. ise gelişmiş titreşim sönümleme performansı elde etmek amacıyla SMA ve PZT malzemelerini birleştiren bir amortisör tasarımı önermiş ve bu sistemlerde düzenleme ile kontrol stratejilerinin optimizasyonuna odaklanmıştır [191]. Bununla birlikte, bazı çalışmalar SMA'lar ile piezoelektrik malzemeler arasındaki sinerjinin enerji hasadı performansını artırdığını ve enerji üretim verimliliğinde kayda değer iyileştirmeler sağlayabileceğini ortaya koymuştur [192].

5. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Enerji toplama teknikleri incelendiğinde, bu yöntemler arasındaki temel farklılıklardan biri güç çıkış düzeyleridir. Elektromanyetik enerji toplayıcılar, kullanılan ortamdan bağımsız olarak, literatürde genellikle yaklaşık 15 W ile 600 W arasında değişen yüksek güç çıkışları sunmaktadır. Bu güç seviyeleri, sokak aydınlatma sistemleri, endüstriyel tesisler ve kablosuz iletişim altyapıları gibi uygulamalar için yeterli olmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu teknolojinin karayolu altyapısında uygulanabilirliği; trafik akışına olası etkileri, bakım gereksinimleri ve teknolojinin görece yeni olması gibi faktörler nedeniyle sınırlı kalmaktadır.

Piezoelektrik enerji toplayıcılar, yollardan enerji elde etmede kullanılan bir diğer yöntemdir. Bu sistemlerin güç çıkışları, elektromanyetik enerji toplama sistemlerine kıyasla belirgin biçimde daha düşüktür. Ayrıca, üretim ve bakım maliyetleri nispeten yüksek seviyededir. Bununla birlikte, piezoelektrik toplayıcılar doğrudan yol altyapısına koruyucu bir kılıf içerisinde entegre edilebilmekte ve bazı diğer yöntemlerin aksine performansları çevresel koşullardan, özellikle hava durumundan, önemli ölçüde etkilenmemektedir. Her ne kadar güç çıkışları sınırlı olsa da, bu sistemler mikro ölçekte enerji gereksinimi duyan uzak sensörler ve düşük güçlü elektronik sistemlerde etkin bir şekilde kullanılabilir.

Termoelektrik ve fotovoltaiik hücre tabanlı enerji toplayıcılar, enerji hasadı amacıyla yol kaplamaları da dahil olmak üzere çeşitli sivil yapılara entegre edilebilen sistemlerdir. Bu iki

teknoloji, performanslarının hava koşullarına ve bölgesel iklim koşullarına bağımlı olması açısından benzerlik göstermekte olup, bu durum uygulama alanlarını sınırlamaktadır. Elektromanyetik sistemlerle karşılaştırıldığında, güç çıkışları nispeten düşüktür. Bununla birlikte, her iki sistemin de kurulumu ve yol yapısına entegrasyonu genellikle kolaydır ve maliyetleri piezoelektrik toplayıcılara kıyasla daha düşüktür. Ancak, piezoelektrik sistemlerde olduğu gibi, bu teknolojilerin de sağladığı güç çıkışı sınırlıdır; dolayısıyla düşük güçlü sensörler ve elektronik cihazlar için uygun bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedirler (Tablo 2).

Tablo 2. Başlıca yol enerjisi toplama teknolojilerinin avantajları ve dezavantajları

Teknoloji	Avantajları	Dezavantajları
Piezoelektrik	İyi mekanik özellikler Kolay kurulum Performans hava koşullarına bağlı değil	Çok düşük güç çıkışı Pahalı imalat ve bakım
Termoelektrik	Kolay Kurulum	Çok düşük güç çıkışı Pahalı imalat ve bakım Hava ve sıcaklığa bağlı
Fotovoltaik	Ortalama güç çıkışı	Hava durumuna bağlı Pahalı imalat ve bakım Kırılgandır ve yollarla mekanik olarak uyumlu değildir. Nispeten düşük güç çıkışı
Elektromanyetik	Yüksek güç çıkışı Nispeten düşük bakım maliyeti	Trafik akışını etkilemek

Güneş teknolojilerinin potansiyeli, yalnızca güneş radyasyonunun mevcut olduğu yerler ve zaman dilimleriyle sınırlı olduğundan, mekanik enerji toplama yöntemleri daha güvenilir alternatifler olarak öne çıkmakta ve giderek artan bir araştırma ilgisi görmektedir. Bu yöntemler arasında piezoelektrik enerji toplayıcılar (PEH'ler), mekanik enerjiyi doğrudan yol yüzeyinden alarak elektrik enerjisine

dönüştürebilmeleri sayesinde en basit sistemlerden biridir. Tek bir PEH'in enerji çıktısının oldukça sınırlı olduğu bilinmekle birlikte, son yıllarda yapılan çalışmalar bu sistemlerin büyük ölçekli uygulamalar için de umut vadettiğini göstermektedir. Bu gelişme, çoklu PEH dizilerinin kullanımı ve çok katmanlı piezoyığın yapılandırılmaları gibi yeni teknolojik yaklaşımlarla mümkün olmaktadır. İsrail, Londra ve Güney Amerika'daki başarılı saha uygulamaları ile Kaliforniya'nın otoyollarında benzer sistemleri hayata geçirme planları, PEH'lerin gelecekteki karayolu altyapılarında artan potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Öte yandan, elektromanyetik enerji toplama sistemleri üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda artış göstermiştir. Ancak Wang ve arkadaşlarının da belirttiği üzere, bu sistemler doğrudan kaldırım titreşimlerinden enerji elde etmek için uygun değildir; daha çok köprülerin yapısal sağlık izleme sistemlerine güç sağlama amacıyla kullanılmaktadır [193]. Elektromanyetik teknolojiye yönelik çalışmaların büyük bir bölümü, araç süspansiyon sistemlerinde kullanılan elektromanyetik enerji geri kazanım sistemlerine (EHRSA) odaklanmıştır. Buna karşılık, kaldırım entegre elektromanyetik enerji toplama uygulamalarıyla ilgili çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Ayrıca, bu sistemlerin elektriksel çıkışını artırmak amacıyla amplifikasyon mekanizmalarına ve hareket doğrultucularına ihtiyaç duyulduğu bildirilmektedir.

Elektromanyetik EHRSA sistemlerinin karşılaştırılması, her tip kendine özgü avantaj ve sınırlamalarını ortaya koymaktadır. Doğrudan tahrikli sistemler, gerekli elektromekanik kuplaj sabitine ulaşabilmek için büyük mıknatıs ve bobinlere ihtiyaç duyduklarından, paketleme alanı açısından dezavantajlıdır. Buna karşın, dolaylı tahrikli sistemlerde hareket dönüştürme mekanizmasının karmaşık yapısı, araç dinamikleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu kategoride yer alan bilyalı vidalı sistemler, kremayer-pinyon sistemlerine kıyasla daha kompakt ve basit bir tasarıma sahip olup, daha düşük

maliyet ve daha yüksek dayanıklılık sunmaktadır. Ayrıca, üç kademeli kremayer-pinyon sistemlerinin aksine tek kademeli iletim yapısına sahip olmaları nedeniyle, enerji iletim verimlilikleri daha yüksektir ve bu özellikleri onları enerji toplama uygulamaları açısından daha umut verici kılmaktadır.

Hidrolik EHRS sistemlerinde ise, diğer tiplerde kullanılan katı iletim bileşenlerinin yerini sıvı ortamlar almakta, bu da sistemin genel güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, bilyalı vida sistemlerinin aksine, pistonun doğrusal hareket yönündeki değişim, dönüş yönünü etkilememektedir. Bu sistemler, ortak bir entegre güç üretim devresi ile farklı araç tiplerine kolaylıkla uyarlanabilmektedir. Ancak, sıvı ile hazne yüzeyi arasındaki sürtünmeden kaynaklanan enerji iletim kayıpları, verimliliği bilyalı vida sistemlerine kıyasla düşürmektedir. Bu nedenle, hidrolik EHRS'lar genellikle ağır vasıtalar ve arazi araçları için daha uygun görülmektedir.

Yol ısıtma ve kar eritme amacıyla jeotermal enerji hasadı, dünya genelinde köklü ve etkin bir uygulama alanı bulmuştur. Jeotermal yol sistemleri; termal çatlama riskini ortadan kaldırması, kentsel ısı adası etkisini azaltması, yol güvenliğini artırması ve çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlaması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak bu sistemlerin uygulanabilirliği, büyük ölçüde bölgenin jeolojik ve coğrafi özelliklerine bağlıdır.

Yollarda yağmur suyundan enerji hasadı söz konusu olduğunda, umut verici bir yaklaşım olarak geçiren yol kaplamalarının yer kaynaklı ısı pompası (GSHP) ve yeraltı suyu depolama sistemleri ile bütünleştirilmesi önerilmektedir.

Diğer yandan, rüzgâr enerjisi teknolojisi olgunlaşmış bir sistem olup, hem doğal hem de taşıt kaynaklı rüzgârdan enerji elde etmek amacıyla karayolu altyapılarına entegrasyonu giderek artan bir araştırma ilgisi görmektedir. Ayrıca, hibrit güneş fotovoltaik-rüzgâr türbini sistemleri, özellikle sokak aydınlatması uygulamalarında halihazırda ticari kullanıma sunulmuştur.

6. KARAYOLLARINDA ENERJİ DEPOLAMADA KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR

Enerji toplama sistemlerinin kaldırımlara entegre edilmesi, kaldırımların öncelikli olarak enerji üretimi için değil, güvenli ve dayanıklı taşıma amacıyla tasarlanmış olması nedeniyle önemli inşaat ve yapısal zorluklar doğurmaktadır. Sıvı dolu borular veya piezoelektrik dönüştürücüler gibi gömülü sistemler, kaldırım katmanlarının işlevselliğini etkileyebilmekte ve bu nedenle yapısal tahribatı en aza indiren tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi gerekmektedir [194].

Montaj sırasında yapılan frezeleme işlemleri, genellikle yüzey katmanlarının kısmen kaldırılmasını içerdiğinden, bileşenlerin beklenen frezeleme derinliğinin altında konumlandırılması, olası hasar riskini azaltmak açısından önem taşımaktadır. Öte yandan, kaplama tabakalarının kullanımı, ısı kaynağı ile sistem arasındaki temas direncini artırarak termal etkinliği azaltabilir; bu nedenle yerleştirme yöntemi, çoğu durumda daha uygun bir uygulama yaklaşımı sunmaktadır.

Ayrıca bu sistemlerin, trafik yükleri ve çevresel etkiler sonucunda oluşan çekme, basınç ve eğilme gerilmelerine karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanması, aynı zamanda düzenli bakım süreçlerinde aksamalara neden olmadan işletilebilmesi gerekmektedir.

Kentsel alanlarda, kaldırımların altındaki mevcut altyapı hizmetlerinin konum sınırlamaları ve sistemlerin genellikle uzun süreli park eden araçlarla kaplanmayan park alanlarıyla sınırlı

olması, enerji toplama sistemlerinin yerleştirilmesini oldukça karmaşık hâle getirmektedir. Hasat dizilerinin bağlantıları, pompa sistemleri ve yardımcı ekipmanların entegrasyonu için kaldırım veya hendek düzenlerinde değişiklik yapılmasını gerektiren erişilebilir kenar tasarımlarına ihtiyaç duyar.

Ayrıca, borular ile çevredeki kaldırım malzemeleri arasındaki temas, sıkıştırma sırasında gözenekli yapıların oluşmasına neden olarak ısı transfer verimliliğini düşürmektedir. Bu sorunu azaltmak amacıyla enjeksiyon malzemeleri, ince mastik asfalt tabakaları veya boru kanatları gibi çözümler önerilmektedir. Mevcut kaldırımlara sonradan sistem entegrasyonu genellikle zordur; yüzeye monte edilen fotovoltaiik (PV) veya piezoelektrik sistemleri minimum hazırlık gerektirirken, ısı eşanjörü olukları ekonomik olmayan derin kesimler gerektirebilmektedir.

Gömülü ısı eşanjörlerine sahip önceden üretilmiş kaplama sistemleri hâlen kavramsal düzeyde olup, ölçeklenebilir inşaat için önemli bir potansiyel sunsalar da çözülmemiş mühendislik sorunları barındırmaktadır [195]. Mevcut deneysel ve sayısal çalışmalar genellikle ideal koşullar altında yürütülmektedir. Ancak, yağmur suyu girişi ve mekanik hasar dikkate alındığında, bu ısı emici sistemlerin özellikle kış aylarında kullanılmadıkları dönemlerdeki kararlılığı belirsizliğini korumaktadır.

Ayrıca, bu cihazların genellikle mikroorganizma ve böcek popülasyonunun yoğun olduğu sıcak ve güneşli bölgelerde kullanılması, potansiyel biyolojik bozulma ve yapısal hasar riskini artırmaktadır. Tüm bu değişkenlerin ekipman performansı üzerindeki toplam etkisi ise hâlen tam olarak ortaya konulamamıştır.

Çeşitli enerji hasadı sistemlerinin yollarda uygulanması, kaçınılmaz olarak mevcut yol yapısını etkilemektedir. Paneller, kablolar ve borular gibi gömülü enerji hasadı elemanları, orijinal yol tabakaları arasında yapısal sürekliliği bozarak yolun mekanik dayanımını azaltabilir ve hasara karşı daha savunmasız hale getirebilir. Benzer şekilde, araçlara entegre

edilen enerji hasadı bileşenleri, araçların estetik görünümünü ve güvenlik performansını olumsuz etkileyebilmektedir.

Ayrıca, karayolu ulaşım sistemlerine entegre enerji hasadı teknolojileri, genellikle jeotermal enerji, güneş radyasyonundan kaynaklanan termal enerji ve yağmur suyu gibi yol çevresindeki doğal kaynaklardan yararlanmaktadır. Bu kaynakların kullanımı, yolun ve çevresindeki çevresel sistemlerin ekolojik dengesini değiştirme potansiyeline sahiptir. Örneğin, ısının sürekli olarak kullanımı ve çevreye salınımı, bitki örtüsünün gelişimini ve yaban hayatı habitatlarını olumsuz yönde etkileyebilir.

Dolayısıyla, enerji hasadı yalnızca mühendislik temelli bireysel bir tasarım olarak değil, çevre ile bütünleşik bir planlama süreci olarak ele alınmalıdır. Yenilenebilir karayolu ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi, enerji hasadı cihazları, araçlar, yol yapısı ve çevre arasındaki ilişkinin uyum içinde yönetilmesini ve çevresel etkisi düşük bir kalkınma yaklaşımının benimsenmesini gerektirmektedir.

Karayolu ulaşım sistemlerinde enerji hasadına yönelik mevcut araştırmalar, büyük ölçüde her bir teknolojinin enerji verimini artırmaya odaklanmaktadır. Ancak, bu sistemlerin çalışma ortamı üzerindeki etkileri çoğunlukla ihmal edilmektedir. Oysa bu etkiler gerçek ve göz ardı edilemeyecek düzeydedir. Bu nedenle, enerji üreten alt sistemler ile genel karayolu sistemi arasındaki etkileşim ve koordinasyonun da kapsamlı biçimde incelenmesi gerekmektedir. Enerji hasadının karayolu sistemlerine entegrasyonu, potansiyel çevresel etkiler önceden öngörülmediği takdirde, ekolojik denge üzerinde uzun vadeli olumsuz sonuçlara yol açabilir.

SONUÇ

Bu inceleme çalışması, karayolları boyunca sürdürülebilir elektrik üretimini mümkün kılan teknolojileri değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu doğrultuda, mevcut enerji kaynakları ve dönüşüm mekanizmaları belirlenmiş, tartışılmış ve uygulama senaryolarına bağlamlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yollarda en yaygın ve kullanılabilir enerji kaynaklarının araçlar ve doğal kaynaklar olduğunu göstermektedir. Araçlar, yol kaplamasına uyguladıkları mekanik stres, titreşimler ve geçerken oluşturdukları hava akımı gibi etkenler nedeniyle elektriğe dönüştürülebilen enerji kaynakları olarak birincil öneme sahiptir. Doğal kaynaklar arasında ise, güneş ışığı ve ısı şeklindeki güneş radyasyonu ile düşük hızlı rüzgârlar, enerji hasadı için potansiyel olarak değerlendirilebilmektedir.

Yollarda enerji toplamak amacıyla birçok malzeme ve teknoloji geliştirilmiştir. Bu sistemler, mikro elektromekanik sistemler, yol lambaları, trafik izleme cihazları ve bina tesisleri gibi çok çeşitli bileşenlere güç sağlamak için kullanılmaktadır. Yol enerjisi hasadı, enerjiyi depolamanın ve çevresel alanlarda kullanmanın bir yolunu sunarak, elektrikli araçlar için uygun bir altyapı oluşturma potansiyeline sahiptir. İnsanlar çevresel sürdürülebilirliğin öneminin farkına oldukça, yakıtle çalışan araçlardan elektrikli araçlara geçiş giderek zorunlu hâle gelecektir.

Buna rağmen, yol enerjisi hasadını sınırlayan çeşitli kısıtlar hâlen devam etmektedir. Bu zorluklar, bazı malzemelerin yalnızca mikro ölçeklerde verimli ve sürdürülebilir olması, diğerlerinin ise büyük ölçeklerde kazançlı ancak maliyetli

olması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, yol enerjisi hasadı uygulamalarının verimliliği ve ölçeklenebilirliği, hâlen önemli bir araştırma ve geliştirme alanı olarak değerlendirilmektedir.

Kaldırımlar ve yollardan elde edilen enerji, geleneksel enerji dönüşüm teknolojilerine kıyasla yenilenebilir, güvenli, temiz, basit, güvenilir, sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Günümüzde dünya, enerji krizi ve çevre kirliliği gibi ciddi tehditlerle karşı karşıya olduğundan, yol altyapısından enerji hasadı; mikro, mezo ve makro ölçekli uygulamalarda sahip olduğu yüksek potansiyel nedeniyle önemli bir rol oynamaktadır.

Ayrıca, trafik yönetimi, araç tespiti, yapısal sağlık izleme ve benzeri görevler için kablolu, otomatik ve akıllı sistemlere olan talebin artması, bu sistemlerin hayata geçirilmesinde yerinde güç üretim ünitelerinin varlığını kritik bir unsur hâline getirmektedir. Bu durum, araştırmacıları yol altyapısına entegre, sürdürülebilir ve akıllı enerji toplama sistemleri geliştirmeye yönlendirmiştir.

Bununla birlikte, mevcut çalışmalar, çoğu seçeneğin hâlen keşif aşamasında olduğunu göstermektedir. Bu sistemlerin teknik fizibilitesi, ekonomik uygulanabilirliği ve pratik uygulama ile ticarileştirme süreçlerinin çevresel etkileri, akademi, sanayi ve hükümet arasındaki etkin iş birliğine ve kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duymaktadır. Büyük ölçekli projelerin çoğu, özel sektör yatırımını teşvik etmek ve gerçek yol deneyimlerini sağlayabilmek için hükümet finansmanı gerektirmektedir. Ayrıca, geleneksel yol sistemlerinden enerji üreten sürdürülebilir yollara etkili bir geçiş için, kamuoyu ve paydaşlar arasında yaygın bir farkındalık kampanyası yürütülmesi de kritik öneme sahiptir.

REFERANSLAR

- [1] Mihyeon Jeon C, Amekudzi A. Addressing Sustainability in Transportation Systems: Definitions, Indicators, and Metrics. *J Infrastruct Syst* 2005;11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2005\)11:1\(31\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2005)11:1(31)).
- [2] Buhaug H, Urdal H. An urbanization bomb? Population growth and social disorder in cities. *Glob Environ Chang* 2013;23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.016>.
- [3] Gholikhani M, Tahami SA, Khalili M, Dessouky S. Electromagnetic energy harvesting technology: Key to sustainability in transportation systems. *Sustain* 2019;11. <https://doi.org/10.3390/su11184906>.
- [4] Sun W, Lu G, Ye C, Chen S, Hou Y, Wang D, et al. The State of the Art: Application of Green Technology in Sustainable Pavement. *Adv Mater Sci Eng* 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9760464>.
- [5] Wang H, Jasim A, Chen X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review. *Appl Energy* 2018;212. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.125>.
- [6] Morbiato T, Borri C, Vitaliani R. Wind energy harvesting from transport systems: A resource estimation assessment. *Appl Energy* 2014;133. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.055>.
- [7] Andriopoulou S. A review on energy harvesting from roads. 2012.
- [8] Fthenakis V, Kim HC. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.017>.
- [9] Pacca S, Horvath A. Greenhouse gas emissions from building and operating electric power plants in the upper Colorado river basin. *Environ Sci Technol* 2002;36. <https://doi.org/10.1021/es0155884>.

- [10] Yildiz F, Coogler KL. Low power energy harvesting with a thermoelectric generator through an air conditioning condenser. *J Eng Technol* 2017;34. <https://doi.org/10.18260/1-2--22810>.
- [11] Zhang Z, Zhang X, Rasim Y, Wang C, Du B, Yuan Y. Design, modelling and practical tests on a high-voltage kinetic energy harvesting (EH) system for a renewable road tunnel based on linear alternators. *Appl Energy* 2016;164. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.096>.
- [12] Cook-Chennault KA, Thambi N, Sastry AM. Powering MEMS portable devices - A review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Mater Struct* 2008;17. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/4/043001>.
- [13] Wang H, Li M. Comparative study of asphalt pavement responses under FWD and moving vehicular loading. *J Transp Eng* 2016;142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000902](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000902).
- [14] Wang J, Xiao F, Zhao H. Thermoelectric, piezoelectric and photovoltaic harvesting technologies for pavement engineering. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;151. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111522>.
- [15] Gholikhani M, Roshani H, Dessouky S, Papagiannakis AT. A critical review of roadway energy harvesting technologies. *Appl Energy* 2020;261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114388>.
- [16] Hossain MFT, Dessouky S, Biten AB, Montoya A, Fernandez D. Harvesting solar energy from asphalt pavement. *Sustain* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/su132212807>.
- [17] Chiarelli A, Al-Mohammedawi A, Dawson AR, García A. Construction and configuration of convection-

- powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures. *Int J Therm Sci* 2017;112. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.10.012>.
- [18] Yin F, Arámbula-Mercado E, Epps Martin A, Newcomb D, Tran N. Long-term ageing of asphalt mixtures. *Road Mater Pavement Des* 2017;18. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266739>.
- [19] Menapace I, Yiming W, Masad E. Chemical analysis of surface and bulk of asphalt binders aged with accelerated weathering tester and standard aging methods. *Fuel* 2017;202. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.042>.
- [20] Yinfei D, Shengyue W, Jian Z. Cooling asphalt pavement by a highly oriented heat conduction structure. *Energy Build* 2015;102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.020>.
- [21] Kim D, Kim YR. Development of Stress Sweep Rutting (SSR) test for permanent deformation characterization of asphalt mixture. *Constr Build Mater* 2017;154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.172>.
- [22] Salama HK, Chatti K. Evaluation of fatigue and rut damage prediction methods for asphalt concrete pavements subjected to multiple axle loads. *Int J Pavement Eng* 2011;12. <https://doi.org/10.1080/10298430903578978>.
- [23] Akbari H, Kolokotsa D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy Build* 2016;133. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.067>.
- [24] Zhu X, Yu Y, Li F. A review on thermoelectric energy harvesting from asphalt pavement: Configuration, performance and future. *Constr Build Mater* 2019;228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116818>.
- [25] Kamolyabutra D, Mitani Y, Tsuji K. Power system stabilizing control and current limiting by a SMES with a

- series phase compensator. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, 2001. <https://doi.org/10.1109/77.920123>.
- [26] Madawala UK, Thrimawithana DJ, Kularatna N. An ICPT-supercapacitor hybrid system for surge-free power transfer. *IEEE Trans Ind Electron* 2007;54. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.903961>.
- [27] Jia Y, Oti K, Yamamura N, Ishida M. A study on electric power smoothing system for lead-acid battery of stand-alone natural energy power system using EDLC. *Fourth Power Convers. Conf. PCC-NAGOYA2007 - Conf. Proc.*, 2007. <https://doi.org/10.1109/PCCON.2007.372973>.
- [28] AKCAN E, KUNCAN M, MİNAZ MR. PVsyst Yazılımı İle 30 Kw Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. *Eur J Sci Technol* 2020. <https://doi.org/10.31590/ejosat.685909>.
- [29] Walubita LF, Djebou DCS, Faruk ANM, Lee SI, Dessouky S, Hu X. Prospective of societal and environmental benefits of piezoelectric technology in road energy harvesting. *Sustain* 2018;10. <https://doi.org/10.3390/su10020383>.
- [30] Sodano HA, Inman DJ, Park G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. *Shock Vib Dig* 2004;36. <https://doi.org/10.1177/0583102404043275>.
- [31] Bobes-Jesus V, Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D, Rodriguez-Hernandez J. Asphalt solar collectors: A literature review. *Appl Energy* 2013;102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.050>.
- [32] Li Z, Zuo L, Luhrs G, Lin L, Qin YX. Electromagnetic energy-harvesting shock absorbers: Design, modeling, and road tests. *IEEE Trans Veh Technol* 2013;62. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2229308>.

- [33] Beeby SP, Torah RN, Tudor MJ, Glynne-Jones P, O'Donnell T, Saha CR, et al. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *J Micromechanics Microengineering* 2007;17. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/7/007>.
- [34] Sazonov E, Pillay P, Li H, Curry D. Self-Powered Sensors for Monitoring of Highway Bridges. *IEEE Sens J* 2009;9. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2019333>.
- [35] Morita K, Tago M. Operational Characteristics of the GAIA Snow-Melting System in Ninohe, Iwate, Japan. *Geo-Heat Cent Bulletin* 2000;21.
- [36] Pan P, Wu S, Xiao Y, Liu G. A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.029>.
- [37] Moure A, Izquierdo Rodríguez MA, Rueda SH, Gonzalo A, Rubio-Marcos F, Cuadros DU, et al. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. *Energy Convers Manag* 2016;112. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.030>.
- [38] Bowen CR, Taylor J, Le Boulbar E, Zabek D, Chauhan A, Vaish R. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Energy Environ Sci* 2014;7. <https://doi.org/10.1039/c4ee01759e>.
- [39] Efthymiou C, Santamouris M, Kolokotsa D, Koras A. Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Sol Energy* 2016;130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.054>.
- [40] Al-Qadami EHH, Mustaffa Z, Al-Atroush ME. Evaluation of the Pavement Geothermal Energy Harvesting Technologies towards Sustainability and Renewable Energy. *Energies* 2022;15. <https://doi.org/10.3390/en15031201>.

- [41] Johnston A, Riessner M, Luo C. Some recent environmental pavement technologies – Fact or fiction. 2017 Transp. Assoc. Canada Conf. Exhib. TAC 2017, 2017.
- [42] JIANG H, CEN Y, ZHA X, ZHANG Q. Current Situation and Development Trend of Solar Pavement Technology. DEStech Trans Environ Energy Earth Sci 2018. <https://doi.org/10.12783/dteees/epe2018/23749>.
- [43] Moskvitch K. News Briefing: In Num6ers - Sola Road. Eng Technol 2016;11. <https://doi.org/10.1049/et.2016.0513>.
- [44] Wu L, Yuan Y, Wu H. Solar Road Power Generation Assessment Based on Coupled Transportation and Power Distribution Systems. J. Phys. Conf. Ser., vol. 1659, 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1659/1/012041>.
- [45] Pei J, Zhou B, Lyu L. e-Road: The largest energy supply of the future? Appl Energy 2019;241. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.033>.
- [46] Vizzari D, Genesseeaux E, Lavaud S, Bouron S, Chailleux E. Pavement energy harvesting technologies: A critical review. RILEM Tech Lett 2021;6. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.131>.
- [47] Rahman M, Mabrouk G, Dessouky S. Development of a Photovoltaic-Based Module for Harvesting Solar Energy from Pavement: A Lab and Field Assessment. Energies 2023;16. <https://doi.org/10.3390/en16083338>.
- [48] Ma T, Yang H, Gu W, Li Z, Yan S. Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement. Energy Convers Manag 2019;183. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.035>.
- [49] Northmore AB, Tighe SL. Performance modelling of a solar road panel prototype using finite element analysis. Int J Pavement Eng 2016;17. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993203>.

- [50] Johny S, John SK. A Review on Solar Roadways: The Future of Roads. *Int J Recent Innov Eng Res* 2017.
- [51] Kulkarni AA. “Solar Roadways” – Rebuilding our Infrastructure and Economy. *Int J Eng Res Appl* 2013;3.
- [52] Dezfooli AS, Nejad FM, Zakeri H, Kazemifard S. Solar pavement: A new emerging technology. *Sol Energy* 2017;149. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.016>.
- [53] Zhou B, Pei J, Xue B, Guo F, Wen Y, Zhang J, et al. Solar/road from ‘forced coexistence’ to ‘harmonious symbiosis.’ *Appl Energy* 2019;255. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113808>.
- [54] Pei J, Guo F, Zhang J, Zhou B, Bi Y, Li R. Review and analysis of energy harvesting technologies in roadway transportation. *J Clean Prod* 2021;288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125338>.
- [55] Berdahl P, Akbari H, Levinson R, Miller WA. Weathering of roofing materials - An overview. *Constr Build Mater* 2008;22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.015>.
- [56] Minsk LD. Electrically conductive asphalt for control of snow and ice accumulation. *Highw Res Rec* 1968;227.
- [57] Somé SC, Gaudefroy V, Delaunay D. Estimation of bonding quality between bitumen and aggregate under asphalt mixture manufacturing condition by thermal contact resistance measurement. *Int J Heat Mass Transf* 2012;55. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.092>.
- [58] Tang N, Wu SP, Chen MY, Pan P, Sun CJ. Effect mechanism of mixing on improving conductivity of asphalt solar collector. *Int J Heat Mass Transf* 2014;75. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.014>.
- [59] Hall MR, Dehdezi PK, Dawson AR, Grenfell J, Isola R. Influence of the Thermophysical Properties of Pavement

- Materials on the Evolution of Temperature Depth Profiles in Different Climatic Regions. *J Mater Civ Eng* 2012;24. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000357](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000357).
- [60] Diefenderfer BK, Al-Qadi IL, Diefenderfer SD. Model to predict pavement temperature profile: Development and validation. *J Transp Eng* 2006;132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:2\(162\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:2(162)).
- [61] Bilgen E, Richard MA. Horizontal concrete slabs as passive solar collectors. *Sol Energy* 2002;72. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00014-2).
- [62] Sullivan C, de Bondt A, Jansen R, Verweijmeren H. Innovation in the Production and Commercial Use of Energy Extracted From Asphalt Pavements. 6th Annu Int Conf Sustain Aggregates, Asph Technol Pavement Eng 2007.
- [63] Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D, Serrano-Bravo P, Alonso-Estébanez A. Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors. *Appl Energy* 2013;111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.013>.
- [64] García A, Partl MN. How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. *Appl Energy* 2014;119. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.006>.
- [65] Mallick RB, Chen BL, Bhowmick S. Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect. *Int J Sustain Eng* 2009;2. <https://doi.org/10.1080/19397030903121950>.
- [66] Mallick RB, Chen BL, Bhowmick S. Harvesting heat energy from asphalt pavements: development of and comparison between numerical models and experiment. *Int J Sustain Eng* 2012;5. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.574742>.

- [67] Wang K, Vineyard EA. Adsorption Refrigeration: new opportunities for solar. *Ashrae* 2011;53.
- [68] Larsson O, Thelandersson S. Estimating extreme values of thermal gradients in concrete structures. *Mater Struct Constr* 2011;44. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9714-0>.
- [69] Gao Q, Huang Y, Li M, Liu Y, Yan YY. Experimental study of slab solar collection on the hydronic system of road. *Sol Energy* 2010;84. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.09.008>.
- [70] Zhao J, Wang H, Chen Z, Qu H. Seasonal behavior of pavement in geothermal snow-melting system with solar energy storage. *Trans Tianjin Univ* 2006;12.
- [71] Liu X, Rees SJ, Spitler JD. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model development. *Appl Therm Eng* 2007;27. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.06.017>.
- [72] Tu YP, Jie-Li, Guan CS. Heat transfer analysis of asphalt concrete pavement based on snow melting. *Proc. - Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2010, 2010*. <https://doi.org/10.1109/iCECE.2010.926>.
- [73] Shaopeng W, Mingyu C, Jizhe Z. Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs. *Appl Therm Eng* 2011;31. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.028>.
- [74] Yinfei D, Zheng H, Jiaqi C, Weizheng L. A novel strategy of inducing solar absorption and accelerating heat release for cooling asphalt pavement. *Sol Energy* 2018;159. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.086>.
- [75] Abbas FA, Alhamdo MH. Thermal performance of asphalt solar collector by improving tube and slab characteristics. *Int J Thermofluids* 2023;17. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100293>.

- [76] Wang H, Wu S, Chen M, Zhang Y. Numerical simulation on the thermal response of heat-conducting asphalt pavements. *Phys. Scr. T*, vol. T139, 2010. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2010/T139/014041>.
- [77] Farzan H, Zaim EH. Feasibility study on using asphalt pavements as heat absorbers and sensible heat storage materials in solar air heaters: An experimental study. *J Energy Storage* 2021;44. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103383>.
- [78] Zhou Z, Wang X, Zhang X, Chen G, Zuo J, Pullen S. Effectiveness of pavement-solar energy system - An experimental study. *Appl Energy* 2015;138. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.045>.
- [79] Jiang L, Wang S, Gu X, Dorjee N, Bo W. Inducing directional heat transfer by enhancing directional thermal conductivity of asphalt mixtures for improving asphalt solar collectors. *Constr Build Mater* 2021;267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121731>.
- [80] Zaim EH, Farzan H, Ameri M. Assessment of pipe configurations on heat dynamics and performance of pavement solar collectors: An experimental and numerical study. *Sustain Energy Technol Assessments* 2020;37. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100635>.
- [81] Shamsaei M, Carter A, Vaillancourt M. A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods. *Constr Build Mater* 2022;359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129350>.
- [82] Ayyappan S, Mayilsamy K, Sreenarayanan V V. Performance improvement studies in a solar greenhouse drier using sensible heat storage materials. *Heat Mass Transf Und Stoffuebertragung* 2016;52. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1568-5>.

- [83] Mohan G, Venkataraman M, Gomez-Vidal J, Coventry J. Assessment of a novel ternary eutectic chloride salt for next generation high-temperature sensible heat storage. *Energy Convers Manag* 2018;167. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.100>.
- [84] Yuan J, Wang J, Xiao F, Amirkhanian S, Wang J, Xu Z. Impacts of multiple-polymer components on high temperature performance characteristics of airfield modified binders. *Constr Build Mater* 2017;134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.156>.
- [85] Du Z, Jiang C, Yuan J, Xiao F, Wang J. Low temperature performance characteristics of polyethylene modified asphalts – A review. *Constr Build Mater* 2020;264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120704>.
- [86] Mrawira DM, Luca J. Thermal properties and transient temperature response of full-depth asphalt pavements. *Transp Res Rec* 2002. <https://doi.org/10.3141/1809-18>.
- [87] Teltayev B, Aitbayev K. Modeling of Temperature Field in Flexible Pavement. *Indian Geotech J* 2015;45. <https://doi.org/10.1007/s40098-014-0122-6>.
- [88] Jiang W, Yuan D, Xu S, Hu H, Xiao J, Sha A, et al. Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. *Appl Energy* 2017;205. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.091>.
- [89] Uchida KI, Adachi H, Kikkawa T, Kirihara A, Ishida M, Yorozu S, et al. Thermoelectric Generation Based on Spin Seebeck Effects. *Proc IEEE* 2016;104. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2535167>.
- [90] Hasebe M, Kamikawa Y, Meiarashi S. Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement. *Int. Conf. Thermoelectr. ICT, Proc.*, 2006. <https://doi.org/10.1109/ICT.2006.331237>.

- [91] Tahami SA, Gholikhani M, Nasouri R, Dessouky S, Papagiannakis AT. Developing a new thermoelectric approach for energy harvesting from asphalt pavements. *Appl Energy* 2019;238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.152>.
- [92] Datta U, Dessouky S, Papagiannakis AT. Harvesting thermoelectric energy from asphalt pavements. *Transp Res Rec* 2017;2628. <https://doi.org/10.3141/2628-02>.
- [93] Jiang W, Xiao J, Yuan D, Lu H, Xu S, Huang Y. Design and experiment of thermoelectric asphalt pavements with power-generation and temperature-reduction functions. *Energy Build* 2018;169. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.049>.
- [94] Wu G, Yu X. System design to harvest thermal energy across pavement structure. 2012 IEEE Energytech, *Energytech* 2012, 2012. <https://doi.org/10.1109/EnergyTech.2012.6304703>.
- [95] Fei F, Mai JD, Li WJ. A wind-flutter energy converter for powering wireless sensors. *Sensors Actuators, A Phys* 2012;173. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.06.015>.
- [96] Khamil KN, Mohd Sabri MF, Md Yusop A, Mohd Sa'at FAZ, Isa AN. High cooling performances of H-shape heat sink for thermoelectric energy harvesting system (TEHs) at asphalt pavement. *Int J Energy Res* 2021;45. <https://doi.org/10.1002/er.6021>.
- [97] Zabihi N, Saafi M. Recent developments in the energy harvesting systems from road infrastructures. *Sustain* 2020;12. <https://doi.org/10.3390/SU12176738>.
- [98] Amaro P, Santos F. Specific topologies and circuits: challenges in low power. *Encycl. Electr. Electron. Power Eng.* Vol. 1-3, vol. 3, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00163-X>.

- [99] Rashmi MR, Trilok Sairam K, Suresh A. Energy harvesting through piezoelectric technology. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.252>.
- [100] Li H, Tian C, Deng ZD. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Appl Phys Rev* 2014;1. <https://doi.org/10.1063/1.4900845>.
- [101] Elliott ADT, Miller LM, Halvorsen E, Wright PK, Mitcheson PD. Which is better, electrostatic or piezoelectric energy harvesting systems? *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 660, 2015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/660/1/012128>.
- [102] Møller H, Pedersen CS. Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Heal* 2004;6.
- [103] Tang L, Yang Y, Soh CK. Toward broadband vibration-based energy harvesting. *J Intell Mater Syst Struct* 2010;21. <https://doi.org/10.1177/1045389X10390249>.
- [104] Pepe G, Doria A, Roveri N, Carcaterra A. Vibration energy harvesting for cars: semi-active piezo controllers. *Arch Appl Mech* 2023;93. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02292-1>.
- [105] Crossley S, Whiter RA, Kar-Narayan S. Polymer-based nanopiezoelectric generators for energy harvesting applications. *Energy Mater Mater Sci Eng Energy Syst* 2014;9. <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000605>.
- [106] Kumari N, Rakotondrabe M. Design and development of a lead-free piezoelectric energy harvester for wideband, low frequency, and low amplitude vibrations. *Micromachines* 2021;12. <https://doi.org/10.3390/mi12121537>.
- [107] Lin X, Gu C, Wang J, Cai Y, Zhang G, Zhang T. Experimental study on the road energy harvesting of piezoelectric ceramic in unbound granular materials

- based on a large-scale triaxial apparatus. *Acta Geotech* 2022;17. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01558-w>.
- [108] Hong S Do, Ahn JH, Kim KB, Kim JH, Cho JY, Woo MS, et al. Uniform stress distribution road piezoelectric generator with free-fixed-end type central strike mechanism. *Energy* 2022;239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121812>.
- [109] Liu X, Wang J. Performance Exploration of A Radially Layered Cymbal Piezoelectric Energy Harvester under Road Traffic Induced Low Frequency Vibration. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 542, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/542/1/012075>.
- [110] Cho JY, Kim KB, Hwang WS, Yang CH, Ahn JH, Hong S Do, et al. A multifunctional road-compatible piezoelectric energy harvester for autonomous driver-assist LED indicators with a self-monitoring system. *Appl Energy* 2019;242. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.075>.
- [111] Li C, Liu S, Zhao H, Tian Y. Performance Assessment and Comparison of Two Piezoelectric Energy Harvesters Developed for Pavement Application: Case Study. *Sustain* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/su14020863>.
- [112] Liu Z, Cao Y, Sha A, Wang H, Guo L, Hao Y. Energy harvesting array materials with thin piezoelectric plates for traffic data monitoring. *Constr Build Mater* 2021;302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124147>.
- [113] Huang K, Zhang H, Jiang J, Zhang Y, Zhou Y, Sun L, et al. The optimal design of a piezoelectric energy harvester for smart pavements. *Int J Mech Sci* 2022;232. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107609>.
- [114] Gu H, Song G, Dhonde H, Mo YL, Yan S. Concrete early-age strength monitoring using embedded piezoelectric

- transducers. *Smart Mater Struct* 2006;15. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/6/038>.
- [115] Hou S, Zhang HB, Ou JP. A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring. *Smart Mater Struct* 2012;21. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/10/105035>.
- [116] Dumoulin C, Karaiskos G, Sener JY, Deraemaeker A. Online monitoring of cracking in concrete structures using embedded piezoelectric transducers. *Smart Mater Struct* 2014;23. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/11/115016>.
- [117] Cao Y, Li J, Sha A, Liu Z, Zhang F, Li X. A power-intensive piezoelectric energy harvester with efficient load utilization for road energy collection: Design, testing, and application. *J Clean Prod* 2022;369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133287>.
- [118] Xu X, Cao D, Yang H, He M. Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement. *Int J Pavement Res Technol* 2018;11. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.011>.
- [119] Son H, Kim M, Kim JK. Sustainable process integration of electrification technologies with industrial energy systems. *Energy* 2022;239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122060>.
- [120] Liu K, Xu P, Wang F, Jin C, Huang M, Dai D, et al. Deicing efficiency analysis and economic-environment assessment of a novel induction heating asphalt pavement. *J Clean Prod* 2020;273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123123>.
- [121] Lizasoain-Arteaga E, Indacoechea-Vega I, Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D. Environmental impact assessment of induction-healed asphalt mixtures. *J Clean Prod* 2019;208. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.223>.

- [122] Fu C, Liu K, Liu Q, Xu P, Dai D, Tong J. Exploring directional energy conversion behavior of electromagnetic-based multifunctional asphalt pavement. *Energy* 2023;268. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126573>.
- [123] Liu W, Feng Y, Yang T, Du F, Sun J. Analysis of the induction heating efficiency and thermal energy conversion ability under different electromagnetic stick structures in the RPECT. *Appl Therm Eng* 2018;145. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.043>.
- [124] Liu K, Dai D, Fu C, Li W, Li S. Induction heating of asphalt mixtures with waste steel shavings. *Constr Build Mater* 2020;234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117368>.
- [125] Apostolidis P, Liu X, Scarpas A, Kasbergen C, van de Ven MFC. Advanced evaluation of asphalt mortar for inductionhealingpurposes. *ConstrBuildMater* 2016;126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.011>.
- [126] Apostolidis P, Liu X, Kasbergen C, Scarpas AT, Van De Ven M. Toward the design of an induction heating system for asphalt pavements with the finite element method. *Transp Res Rec* 2017;2633. <https://doi.org/10.3141/2633-16>.
- [127] Gholikhani M, Nasouri R, Tahami SA, Legette S, Dessouky S, Montoya A. Harvesting kinetic energy from roadway pavement through an electromagnetic speed bump. *Appl Energy* 2019;250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.060>.
- [128] Gholikhani M, Amid Tahami S, Dessouky S. Harvesting Energy from Pavement – Electromagnetic Approach. *MATEC Web Conf* 2019;271. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927106001>.

- [129] Duarte; FJA, Ferrira; AJL, Fael; PMO. Device for applying in a pavement for collecting mechanical energy from vehicles passing over for generating electricity. 10,954,926, 2021.
- [130] Kumar M, Kumar K, Rana R, In MDA. Wind Energy Generation from Traffic Movement. vol. 2. 2016.
- [131] Müller G, Jentsch MF, Stoddart E. Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings. *Renew Energy* 2009;34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.008>.
- [132] Aslam Bhutta MM, Hayat N, Farooq AU, Ali Z, Jamil SR, Hussain Z. Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.004>.
- [133] Guo L, Wang H. Non-intrusive movable energy harvesting devices: Materials, designs, and their prospective uses on transportation infrastructures. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112340>.
- [134] Han F, Bandarkar AW, Sozer Y. Energy Harvesting from Moving Vehicles on Highways. 2019 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2019, 2019. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8912688>.
- [135] Liew HF, Baharuddin I, Rosemizi AR, Muzamir I, Hassan SIS. Review of feasibility wind turbine technologies for highways energy harvesting. *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1432, 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1432/1/012059>.
- [136] Reddy VJ, Ghazali MF, Kumarasamy S. Advancements in phase change materials for energy-efficient building construction: A comprehensive review. *J Energy Storage* 2024;81. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110494>.

- [137] Łach M, Pławecka K, Bąk A, Adamczyk M, Bazan P, Kozub B, et al. Review of solutions for the use of phase change materials in geopolymers. *Materials (Basel)* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/ma14206044>.
- [138] Kakar MR, Refaa Z, Bueno M, Worlitschek J, Stamatou A, Partl MN. Investigating bitumen's direct interaction with Tetradecane as potential phase change material for low temperature applications. *Road Mater Pavement Des* 2020;21. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1601127>.
- [139] Fantini P. Phase change memory applications: The history, the present and the future. *J Phys D Appl Phys* 2020;53. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab83ba>.
- [140] Li Y, Nord N, Xiao Q, Tereshchenko T. Building heating applications with phase change material: A comprehensive review. *J Energy Storage* 2020;31. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101634>.
- [141] Bouhal T, El Rhafiki T, Kousksou T, Jamil A, Zeraouli Y. PCM addition inside solar water heaters: Numerical comparative approach. *J Energy Storage* 2018;19. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.005>.
- [142] Bąk A, Pławecka K, Łach M. Comparison of thermal conductivity of foamed geopolymers containing phase change materials. *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2423, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2423/1/012003>.
- [143] Somani P, Gaur A. Evaluation and reduction of temperature stresses in concrete pavement by using phase changing material. *Mater. Today Proc.*, vol. 32, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.214>.
- [144] Partl MN. Quest for improving service life of asphalt roads. *RILEM Tech Lett* 2019;4. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.102>.

- [145] Kheradmand M, Azenha M, de Aguiar JLB, Castro-Gomes J. Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings. *Energy* 2016;94. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.131>.
- [146] Guarino F, Athienitis A, Cellura M, Bastien D. PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates. *Appl Energy* 2017;185. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.046>.
- [147] Mehling H, Brütting M, Haussmann T. PCM products and their fields of application - An overview of the state in 2020/2021. *J Energy Storage* 2022;51. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104354>.
- [148] Li F, Zhou S, Chen S, Yang J, Zhu X, Du Y, et al. Low-temperature organic phase change material microcapsules for asphalt pavement: preparation, characterisation and application. *J Microencapsul* 2018;35. <https://doi.org/10.1080/02652048.2018.1559248>.
- [149] Chen Y, Wang H, You Z, Hossiney N. Application of phase change material in asphalt mixture – A review. *Constr Build Mater* 2020;263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120219>.
- [150] Zhao H, Guo J, Ma S, Zhang H, Su C, Wang X, et al. Effect of Solid-Solid Phase Change Material's Direct Interaction on Physical and Rheological Properties of Asphalt. *Coatings* 2022;12. <https://doi.org/10.3390/coatings12050625>.
- [151] Marani A, Nehdi ML. Integrating phase change materials in construction materials: Critical review. *Constr Build Mater* 2019;217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.064>.
- [152] Cellura M, Ciulla G, Lo Brano V, Marvuglia A, Orioli A. A photovoltaic panel coupled with a Phase Changing

- Material heat storage system in hot climates. PLEA 2008 - Towar. Zero Energy Build. 25th PLEA Int. Conf. Passiv. Low Energy Archit. Conf. Proc., 2008.
- [153] Kenisarin M, Mahkamov K. Solar energy storage using phase change materials. *Renew Sustain Energy Rev* 2007;11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.005>.
- [154] Huang MJ, Eames PC, Norton B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *Int J Heat Mass Transf* 2004;47. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015>.
- [155] Huang MJ, Eames PC, Norton B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Sol Energy* 2006;80. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.006>.
- [156] Melcer A, Klugmann-Radziemska E, Lewandowski W. Phase change materials. Properties, classification, advantages and disadvantages. *Przem Chem* 2012;91.
- [157] Sharma A, Tyagi V V., Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [158] Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Convers Manag* 2004;45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>.
- [159] Barreneche C, Navarro ME, Cabeza LF, Fernández AI. New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications. *J Energy Storage* 2015;3. <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.08.003>.
- [160] Akeiber HJ, Hosseini SE, Hussen HM, Wahid MA, Mohammad AT. Thermal performance and economic evaluation of a newly developed phase change material for effective building encapsulation. *Energy*

- Convers Manag 2017;150. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.043>.
- [161] Mizwar IK, Napiah M, Sutanto MH. Thermal properties of cool asphalt concrete containing phase change material. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 527, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012049>.
- [162] Kravchenko E, Liu J, Li X. Numerical modeling of the thermal performance of soil containing microencapsulated PCM. Constr Build Mater 2021;298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123865>.
- [163] Asadi I, Jacobsen S, Baghban MH, Maghfouri M, Hashemi M. Reviewing the Potential of Phase Change Materials in Concrete Pavements for Anti-Freezing Capabilities and Urban Heat Island Mitigation. Buildings 2023;13. <https://doi.org/10.3390/buildings13123072>.
- [164] Bhamare DK, Rathod MK, Banerjee J, Arıcı M. Investigation of the Effect of Air Layer Thickness on the Thermal Performance of the PCM Integrated Roof. Buildings 2023;13. <https://doi.org/10.3390/buildings13020488>.
- [165] Ma B, Wei K, Huang XF, Shi WS, Chen SS, Hu YP, et al. Preparation and Investigation of NiTi Alloy Phase-Change Heat Storage Asphalt Mixture. J Mater Civ Eng 2020;32. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003338](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003338).
- [166] Dai J, Ma F, Fu Z, Liu J, Li C, Hou Y, et al. Effectiveness of the different eutectic phase-change materials in cooling asphalt pavement. Constr Build Mater 2023;407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133491>.
- [167] Haily E, Ait Ousaleh H, Zari N, Faik A, Bouhfid R, Qaiss A. Use of a form-stable phase change material to improve thermal properties of phosphate sludge-based geopolymer mortar. Constr Build Mater 2023;386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131570>.

- [168] Baskar I, Chellapandian M, Jaswanth SSH. Development of a novel composite phase change material based paints and mortar for energy storage applications in buildings. *J Energy Storage* 2022;55. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105829>.
- [169] Gao Y, Huang L, Zhang H. Study on anti-freezing functional design of phase change and temperature control composite bridge decks. *Constr Build Mater* 2016;122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.065>.
- [170] Anupam BR, Sahoo UC, Rath P, Pattnaik S. Thermal Behavior of Phase Change Materials in Concrete Pavements: A Long-term Thermal Impact Analysis of Two Organic Mixtures. *Int J Pavement Res Technol* 2024;17. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00241-3>.
- [171] Pinheiro C, Landi S, Lima O, Ribas L, Hammes N, Segundo IR, et al. Advancements in Phase Change Materials in Asphalt Pavements for Mitigation of Urban Heat Island Effect: Bibliometric Analysis and Systematic Review. *Sensors* 2023;23. <https://doi.org/10.3390/s23187741>.
- [172] Shim JE, Quan YJ, Wang W, Rodrigue H, Song SH, Ahn SH. A smart soft actuator using a single shape memory alloy for twisting actuation. *Smart Mater Struct* 2015;24. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/12/125033>.
- [173] Silva GC, Silvestre FJ, Donadon M V. A nonlinear aerothermoelastic model for slender composite beam-like wings with embedded shape memory alloys. *Compos Struct* 2022;287. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115367>.
- [174] Nguyen QH, Hoai Ta QT, Tran N. Review on the transformation of biomechanical energy to green energy using triboelectric and piezoelectric based smart materials. *J Clean Prod* 2022;371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133702>.

- [175] Ferreira ADBL, Nóvoa PRO, Marques AT. Multifunctional Material Systems: A state-of-the-art review. *Compos Struct* 2016;151. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.028>.
- [176] Sezer N, Koç M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy* 2021;80. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>.
- [177] Chen N, Jung HJ, Jabbar H, Sung TH, Wei T. A piezoelectric impact-induced vibration cantilever energy harvester from speed bump with a low-power power management circuit. *Sensors Actuators, A Phys* 2017;254. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.12.006>.
- [178] Ye J, Ding G, Wu X, Zhou M, Wang J, Chen Y, et al. Development and performance research of PSN-PZT piezoelectric ceramics based on road vibration energy harvesting technology. *Mater Today Commun* 2023;34. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105135>.
- [179] Jung I, Shin YH, Kim S, Choi J young, Kang CY. Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications. *Appl Energy* 2017;197. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.020>.
- [180] Lafarge B, Grondel S, Delebarre C, Cattan E. A validated simulation of energy harvesting with piezoelectric cantilever beams on a vehicle suspension using Bond Graph approach. *Mechatronics* 2018;53. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.06.004>.
- [181] Liu J, Liu W, Allechy FB, Zheng Z, Liu R, Kouadio KL. Machine learning-based techniques for land subsidence simulation in an urban area. *J Environ Manage* 2024;352. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120078>.
- [182] Serrano M, Larkin K, Tretiak S, Abdelkefi A. Performance of multifunctional piezoelectric energy harvesting microgyroscopes with material degradation.

- Eur J Mech A/Solids 2023;99. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104902>.
- [183] Salazar R, Serrano M, Abdelkefi A. Fatigue in piezoelectric ceramic vibrational energy harvesting: A review. *Appl Energy* 2020;270. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115161>.
- [184] Wang J, Moumni Z, Zhang W. A thermomechanically coupled finite-strain constitutive model for cyclic pseudoelasticity of polycrystalline shape memory alloys. *Int J Plast* 2017;97. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.06.003>.
- [185] Soother DK, Daudpoto J, Chowdhry BS. Challenges for practical applications of shape memory alloy actuators. *Mater Res Express* 2020;7. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba403>.
- [186] Riad A, Ben Zohra M, Alhamany A, Mansouri M. Bio-sun tracker engineering self-driven by thermo-mechanical actuator for photovoltaic solar systems. *Case Stud Therm Eng* 2020;21. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100709>.
- [187] Saputo S, Sellitto A, Battaglia M, Sebastiano V, Riccio A. Numerical simulation of the mechanical behaviour of shape memory alloys based actuators. *Mater. Today Proc.*, vol. 34, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.185>.
- [188] Liu W, Sun G, Chen L, Kong J. Experimental investigation into NiTi shape memory alloy panels under cyclic shear loading. *Eng Struct* 2021;245. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112958>.
- [189] Guo L, Lu Q. Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.090>.

- [190] Adeodato A, Duarte BT, Monteiro LLS, Pacheco PMCL, Savi MA. Synergistic use of piezoelectric and shape memory alloy elements for vibration-based energy harvesting. *Int J Mech Sci* 2021;194. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106206>.
- [191] Liu M, Xu J, Li Q. Design and experiment of piezoelectric-shape memory alloy composite shock absorber. *Mater Lett* 2021;304. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130538>.
- [192] Gusarov B, Gusarova E, Viala B, Gimeno L, Boisseau S, Cugat O, et al. Thermal energy harvesting by piezoelectric PVDF polymer coupled with shape memory alloy. *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 243, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.03.026>.
- [193] Wang C, Zhao J, Li Q, Li Y. Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement. *Appl Energy* 2018;229. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.036>.
- [194] Dehdezi PK. Enhancing Pavements for Thermal Applications. 2012.
- [195] Chiarelli A, Dawson AR, García A. Field evaluation of the effects of air convection in energy harvesting asphalt pavements. *Sustain Energy Technol Assessments* 2017;21. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.04.001>.