

Sürdürülebilir Üstyapılar için Çok Fonksiyonlu Güneş-Asfalt Enerji Üretim ve Kar-Buz Önleme Sisteminin Modellenmesi

Seyfi ŞEVİK

Hitit Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 19169,
Çorum/TÜRKİYE
seyfisevik@hitit.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, sürdürülebilir karayolları üstyapıları için asfaltın tam otomatik sıcaklık ve ıslaklık sensörleri ile takip edildiği çok fonksiyonlu yenilikçi bir güneş-asfalt enerji üretim ve kar-buz önleme sistemi modellenerek teorik enerji analizi yapılmıştır. Bu çalışma ile, hem asfalt yollardan enerji üretimi sağlanmasına yönelik hem de kar-buz önleyici geleneksel uygulamalara alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Bununla birlikte, her iki sistemin ayrı ayrı veya birlikte kullanılabilmesine olanak sağlanmıştır. Sistem, programlanabilir logic kontrol (PLC) ile kontrol edilmekte ve PV paneller, ısı pompası ve yardımcı ısıtıcı gibi ekipmanlarla desteklenmektedir. Asfalt yoldan enerji üretmek ve kar-buz önleyici olmak üzere iki amaca hizmetin bir sonucu olarak, asfalt yolun sıcaklığının düşürülmesiyle asfalt ömrünün artırılması ve de yollarda kar-buz önlenerek bakım giderleri ve enerji giderlerinin azaltılması sağlanabilir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Enerji Üretimi, Kar-buz Önleme, Modelleme, Sürdürülebilir Üstyapı.

Modeling of an Multi-Functional Solar-Asphalt Energy Harvesting and Snow-Ice Prevention System for Sustainable Superstructures

Abstract

In this study, for sustainable highways superstructures, an innovative multi-functional solar-asphalt energy harvesting and snow-ice prevention system which is followed of asphalt by fully automatic temperature and moisture sensors was modelled and energy analysis was conducted. With this study, an alternative method for intended purpose of energy harvesting from asphalt roads and the conventional snow and ice prevention practices have been developed. However, both systems can be used separately or together. The system is controlled by programmable logic control (PLC) and it is supported by PV panels, heat pump and auxiliary heater. As a result of serves two purposes including energy harvesting from asphalt roads and snow-ice prevention, increasing the life of asphalt by reducing the temperature of the asphalt pavement and reducing of maintenance costs and the energy costs by preventing snow and ice on the roads can be provided.

Keywords: Solar Energy, Energy Harvesting, Snow-ice Prevention, Modeling, Sustainable Superstructure.

1. GİRİŞ

Günümüzde, enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için geleneksel enerji kaynakları olan fosil yakıtların yerini temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları almaya başlamıştır. Bunun yanında enerji verimliliği, yeni bir enerji üretim metodu gibi gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Her geçen gün enerjiye olan talep arttığından talebi karşılamak için insanoğlu farklı arayışlar içerisine girmiştir. Bunlardan birisi de, üzerinde seyahat dışında başka bir amaçla kullanılmayan asfalt yolların nesillerin ihtiyaçlarına hizmet verecek şekilde korunması ve daha fazla katma değer sağlaması için farklı yöntemlerle enerji üretiminde kullanılmak istenmesidir. Bu amaçla yeni asfalt yol konseptleri oluşturulmaktadır. Bunlar; sıcak su-hava üreten, elektrik üreten (piezoelektrik jeneratörlerle, PV panellerle, termoelektrik modüllerle, piroelektrik vb ile), enerji depo eden (faz değıştiren madde-FDM,

aküfer ısı enerjisi depolama, akü vb ile) ve kendini ısıtan (don ve buzlanmayı önleme sistemleri ile) yol konseptleri olarak sayılabilir. Asfalt yollardan enerji üretimi ve bunun yanında kar-buz önleme sistemleri yeni yeni uygulama alanları bulabilmektedir.

Şehirlerde bitki örtüsü yoksunluğundan, bina duvarlarından ve bina kaynaklı açığa çıkan ısıya destek olan asfalt kaplama, kentleşmenin en belirgin iklimsel göstergesi olan kentsel ısı adası (KIA) oluşumuna katkı sağlar. KIA oluşumunu engellemek ve asfaltı soğutmak için asfaltın farklı modifikasyonlarından tutun da farklı işleme ve serilme işlemlerine kadar pek çok çalışma yapılmaktadır. Yol kaplamasını soğutmak için; yol kaplaması malzemelerinin termal özelliklerinin modifikasyonu, yol kaplamasından buharlaşmanın iyileştirilmesi, konveksiyonun iyileştirilmesi ve yol kaplaması üzerindeki/içindeki ısı enerjisini azaltma olmak üzere farklı soğutma mekanizmaları ile bazı potansiyel stratejiler uygulanması gerekir [1]. Oysa asfalt yoldan enerji üreten sistemler kullanılması halinde bir yandan enerji üretilirken diğer yandan da asfalt soğutulmaktadır. Dolayısıyla, ayrıca asfaltı soğutmak için çaba harcamaya gerek kalmaz. Asfaltın sıcaklığını düşürmek için literatürde yapılmış farklı çalışmalar mevcuttur. Vind (1967) asfalt karışıma bir ışık yansıtıcı kaplama eklenerek veya karışımda açık renk agrega kullanarak asfalt yüzey sıcaklığının düşürülebileceğini ve bu durumda olası deformasyonların önlenebileceğini belirtmiştir [2]. Ayrıca, Kawakami ve Kubo (2008) ışığı yansıtan özel bir boya uygulanması durumunda asfaltın sıcaklığının düşeceğini belirtmişlerdir [3]. Carrera ve Dawson (2010) ılık (serin) asfalt tekniğinin uygulanması halinde asfalt sıcaklığının normal bir asfaltın sıcaklığından 0.7-2.3 °C daha az olacağını belirtmişlerdir [4]. Iwama ve ark. (2008) ısı kalkanlı asfalt yollar elde etmek (asfaltın termal iletkenliğini azaltmak) için asfalta farklı materyallerin karıştırılabileceğini belirtmişler ve sonrasında böyle bir tasarım yaparak asfalt yüzey sıcaklığında 20 °C'lik bir azalma elde etmişlerdir [5].

Son yıllarda, asfalt yollardan enerji üretimi konusunda çalışmalar hız kazanmıştır. Ulaşım Araştırma Laboratuvarı (TRL) bilim adamları tarafından az kullanılan bir erişim yolda enerji üretimi üzerine iki yıllık deneme planı yapılmıştır. Hatfield'da bir okulun oyun parkında benzer bir sistem denenmiştir. Daha büyük bir versiyonu Rotterdam'da bir otoyol köprüsünde kullanılmakta ve ofis binaları ısıtılmaktadır [6]. Zhou ve ark. (2013) hazırladıkları sistemin uygulandığı asfalt yolun yüzey sıcaklığı sıradan asfalt yolun yüzey sıcaklığından 3-6 °C daha düşük değerlerde ölçmüşlerdir. Ortalama güneş kolektörü verimliliği % 14 ve yol yüzeyinin ortalama güneş absorptivitesi % 36 bulunmuştur [7]. Wang ve ark. (2010) asfaltı bir kolektör olarak kullanmak için güneşten enerji emmesini sağlayan bir ısı iletim cihazı dizayn etmişler ve asfalt kolektördeki kritik parametreleri doğrulamak amacıyla ısı iletim cihazının ısı tepkisini tahmin etmek için sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir [8]. Pascual-Muñoz ve ark. (2013) laboratuvar testlerinde asfalt kolektörün termal verimliliğini gözenekliliğe ve eğime bağlı olarak % 75-95 arasında elde etmişlerdir [9]. Wu ve ark., (2011) asfalt bir kolektörün veriminin % 33.3'ün üzerinde olabileceğini ifade etmişlerdir [10]. Buna karşın, Medas ve ark. (2013) asfalt güneş kolektörünün termodinamik potansiyelini ve performansını daha iyi anlamak amacıyla teorik analizini yapmışlardır. Asfalt güneş kolektörlerin verimliliği % 1-5 aralığında olacağını fakat iletken yayıcılar kullanımı ile % 10'a yükseltilebileceğini belirtmişlerdir [11]. Bu bağlamda, asfalt kolektörün verimliliğini artırmak için grafit tozları, ısı iletken dolgu maddesi olarak kullanılabilir [12]. Mingyu ve ark. (2010) ısı iletken malzeme ve iletken asfalt kolektör güneş enerjisi absorplanabilirlik etkilerini değerlendirmek ve ısı dağılımını tahmin etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Asfalt kolektörün güneş enerjisi potansiyeli üzerinde çevre etkisinin olduğunu ve ısı değiştirici olarak görev yapan boru demetinin optimal derinliğinin 25-50 mm arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir [12]. Mallick ve ark. (2008) enerji üretmek için asfaltın kapasitesini test etmişlerdir. Araştırmacılar, maksimum enerji çıkarılması için bir ısı eşanjörü kullanılmasını, absorpsiyonu artırmak için yansıma azaltıcı renkler ile yüzeyin kaplanabileceğini aynı zamanda asfalta quartz gibi iletken bir malzeme ekleyerek ısı emme kapasitesinin arttırılabileceğini ifade etmişlerdir [13]. Du ve ark. (2014) asfalt döşemenin hem güneş emilimini azaltmak hem de aşağı doğru ısı iletimini hızlandırmak amacıyla çift yönlü ısı kaynaklı yapı dizayn etmişlerdir [14].

Yüksek kaplama yüzey sıcaklıklarının yağmur suyunu da ısıtabileceğini ifade eden çevresel etkiler açısından ele alan çalışmalar da yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, 38 °C'deki zemin sıcaklığı ilk

yağmur suyu sıcaklığını 21 °C'den 35 °C'ye, konvansiyonel geçirmez kaplamaların özellikle yeni siyah geçirimsiz asfalt kaplamaların yüksek yüzey sıcaklıkları sıcak yaz aylarında iklim bölgesine bağlı olarak 65~80 °C'ye kadar yükselebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kentlerdeki 0.5-3.0 °C sıcaklık artışının telafisi, sadece binalar soğutulmak istendiğinde bile kentsel elektrik talebini % 5-10 artırabileceği tahmin edilmektedir [15].

Ayrıca, son yıllarda kar-buz önleme ile ilgili pek çok çalışma yapılmaktadır. Yollarda kar ve buz mücadelesinde kullanılan kimyasalların kar ve buz eriterek yol yüzeyinde bir çözelti oluşturduğu, oluşan çözeltinin kaplamanın geçirgenlik özelliğinden dolayı esnek kaplamalar üzerinde çeşitli etkilere neden olabileceği belirtilmektedir [16]. Altıok ve Avcı (2013) kar ve buz mücadelesinde kullanılan kimyasalların esnek üstyapıya etkilerini araştırmıştır ve % 2.5 tuzlu çözeltiye maruz beton asfalt kaplamaların rijitlik modülünün % 35, yorulma dayanımlarının % 41 düştüğünü tespit etmişlerdir [16]. Balbay ve Esen (2007) yollardaki kar ve buz önleyici sistemleri değerlendirerek önerilerde bulunmuşlardır [17].

Görüldüğü üzere, asfalt yollardan enerji üretimi, asfaltı güneş radyasyonunun etkilerine karşı korumak için asfaltı soğutma ve kar-buz önleme konularında pek çok çalışma mevcuttur. Aynı anda enerji üretimi ve güneş enerjisiyle kar ve buz oluşumunu önlemeye yönelik çalışmalar sınırlıdır. Yapılan çalışmalar, genellikle tek bir amaca hizmet etmek için tasarlanmış olduklarından kullanılabilirliği tartışılabilir. Bu çalışmanın amacı, farklı amaçlara hizmet eden asfaltın tam otomatik sıcaklık ve ıslaklık sensörleri ile takip edildiği çok fonksiyonlu yenilikçi ve sürdürülebilir güneş-asfalt enerji üretim sistem tasarımı modelleri oluşturmak ve bu tasarımları analiz etmektir. Modelleri oluşturulan sistemlerin hem enerji üretmek hem de kar-buz önlemek üzere iki farklı ana hizmet alanı mevcuttur. Asfalt kolektör ile asfalt kaplamadan ısı enerjisi çekerek elde edilen enerjinin faydalı amaçlar doğrultusunda kullanılması ve dolayısıyla asfaltın soğutulması da kendi içerisinde iki farklı hizmetin aynı anda yapılması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla sistemin üç farklı hizmet alanına sahip olduğu söylenebilir. Her iki sistemin de (enerji üreten ve kar-buz önleyen) avantajlarından yararlanarak birlikte kullanılmasıyla sistem performans katsayısının artması nedeniyle bu tür sistemler performans arttırmak amacı ile kullanılabilir fikrinden hareket edilerek ihtiyaçlara tek bir sistem ile cevap verebilecek yeni bir sistem tasarımı yapılmıştır. Ayrıca, sistemin enerji analizi yapılmıştır. Bu çalışma ile, hem asfalt yollardan enerji üretiminin sağlanması hem de kar-buz önleyici geleneksel uygulamalara alternatif bir yöntem geliştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Sistemlerin tasarımı, Proficy HMI/SCADA–Cimplycity yazılımı ile görsel olarak programlanmıştır. Fikirleri etkinleştirme, üretkenliği artırma ve maliyetleri azalma aracı olarak kullanılan kontrol ve görsel kolaylık sağlayan bu yazılım ile tasarımların alt yapısı oluşturulmuştur. Kullanılan yazılım ile prosesin arayüzü oluşturulmuştur. Bu yazılım, bir istemci/sunucu tabanlı görüntüleme ve kontrol çözümü sağlar. Bu sayede, süreç sırasında doğru veriye zamanında erişme ve gerçek zamanlı kararlar alma imkanı verir. Proje ile ilgili tüm dosyalar kontrol altında tutularak projede yapılan tüm revizyonlar kontrol edilebilmekte ve istenildiğinde verilerin trendlere dönüştürülmesi sağlanabilmektedir.

2.1. Çok Fonksiyonlu Güneş-Asfalt Enerji Üretim Sisteminin Tasarımlanması

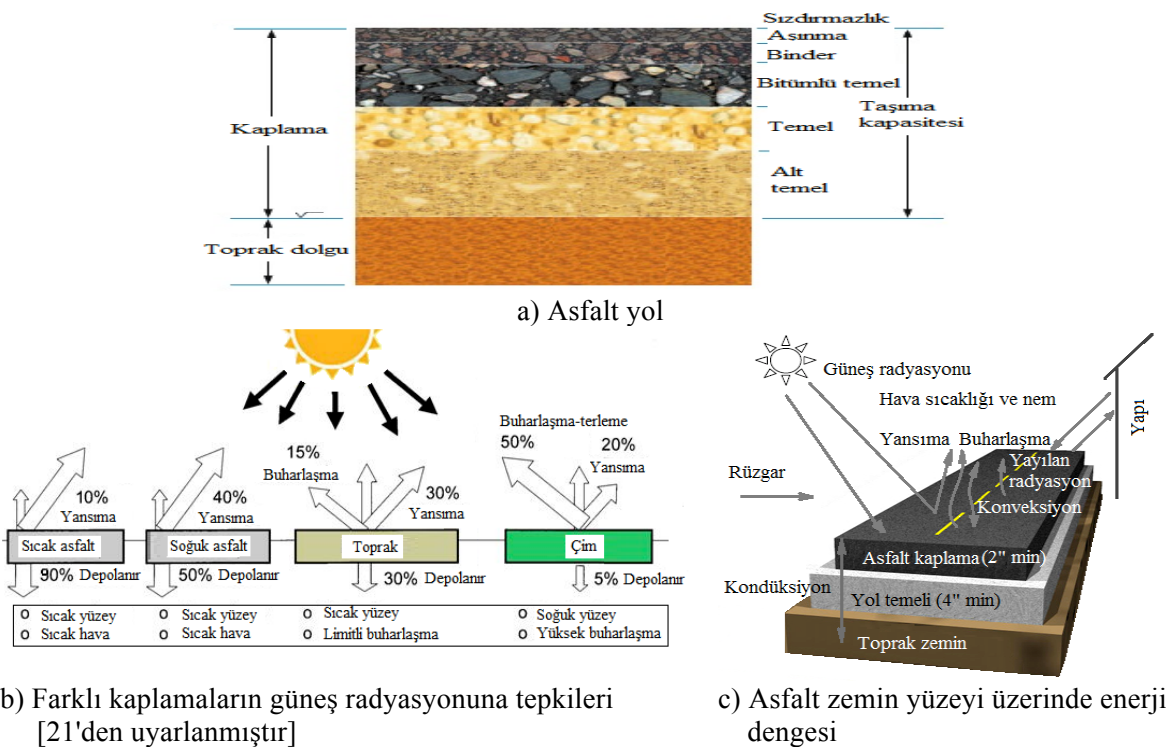
2.1.1. Asfalt kolektörün Tasarımı

Kara yolları genel itibarıyla asfalt, beton ve sathi olarak yapılmaktadır. Asfalt yollar, trafik yüklerini destekleyecek ve iklim şartlarının yıkıcı etkilerine dayanacak şekilde tasarlanmaktadır. Türkiye'de yılda yaklaşık 20 milyon ton asfalt serilmektedir. Eurobitume'e göre "Asfalt, tipik olarak bitümlü mineral agrega (taş), kum ve dolgu maddesi ve bir bitümlü bağlayıcı maddenin bir karışımıdır" [18]. ASTM (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)'ne göre bitüm; "Doğal veya pirojen orijinli hidrokarbonların veya bunların her ikisinin bir araya gelmiş şeklinin, çoğunlukla metal olmayan bileşikleriyle birlikte gaz, sıvı, yarı katı ya da katı halde bulunan ve karbon disülfürde tamamen eriyen hidrokarbon maddedir" şeklinde tanımlanmıştır [19]. Asfalt, % 95 agrega ve % 5 bitüm'den oluşur veya 100kg agrega 4kg bitüm şeklinde ifade edilir. Son yıllarda, geri dönüşüm ile kazanılmış asfalt/bitüm ve agregadan oluşan

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) belirli oranda asfaltın içerisine ilave edilmektedir.

Asfalt, güneş ısısını depolamak için sonsuz geri dönüşümlü harika bir malzemedir. Çok sıcak bir yaz gününde, asfalt bir yolun yüzeyi 60 °C'ye kadar çıkabilir [20]. Kışın ise sert iklim koşullarında çok düşük sıcaklıklara düşebilir. Dolayısıyla, asfalt yollar, hava koşulları ve araçlar gibi etkilere maruz kalarak kimyasal ve fiziksel değişikliklere uğrayabilirler. Şekil 1'de, asfalt bir yolun katmanları (a), farklı kaplama örneklerinin güneş radyasyonuna tepkileri (b) ve asfalt zemin yüzeyi üzerinde enerji dengesi (c) verilmiştir. Asfalt bir yol genel itibariyle 20 cm alt temel, 20 cm temel, 8 cm bitümlü temel, 6 cm binder ve 5 cm aşınma katmanlarından oluşur. Sıcak asfalt kaplama, güneş ışığını % 80-95 absorbe eder. Soğuk asfalt kaplama ise, güneş enerjisinin yaklaşık % 50'sini depolar. Buna karşılık toprak bir alan güneş enerjisinin % 30'unu, çim ise güneş enerjisinin sadece % 5'ini depolar.

Literatür araştırmalarından asfalt ve beton yol kaplamaların termal özelliklerinin (özellikler; c_p , termal iletkenlik; κ , yoğunluk; ρ , ısı yayılımı; α) değerleri elde edilmiş ve Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, asfalt ve diğer ilgili ürünlere ait özellikler Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 1, termal özellikleri birbirinden çok farklı olmadığını göstermektedir. Bu nedenle beton kaplama da bir asfalt kolektör gibi kullanılabilir. Bununla birlikte, kaplama boyunca ısı akışını belirleyen faktör olan ısı yayılımı değeri; beton kaplamada asfaltinkinden % 20 daha yüksektir. Ayrıca, konvektif ve ışınım özellikleri aynı olabilir ancak, kaplamaların aklık derecelerine bağlı olarak yüzeyde emilen enerji farklılık gösterebilir. Ek olarak literatürde, asfalt yüzeylerin tipik termal özelliklerinin (ısı iletkenliği 0.74-2.89 W/m K, özgül ısı değeri 800–1853 J/kg K, termal yayıcılığı $1.2-16.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) değerleri arasında olduğu belirtilmektedir [22].



Şekil 1. Asfalt yol ve enerji dengesi.

Tablo 1. Asfalt ve Portland beton yol kaplamalarının termal özellikleri [23].

Parametreler	Asfalt kaplama	Portland beton kaplama
Özgül ısı (c_p) [J/g K]	0.8	0.8
Isıl iletkenlik (κ) [W/m K]	0.8	1.0

Yoğunluk (ρ) [kg/m^3]	2100	2200
Isıl yayılım (α) [m^2/s]	4.8×10^{-7}	5.7×10^{-7}

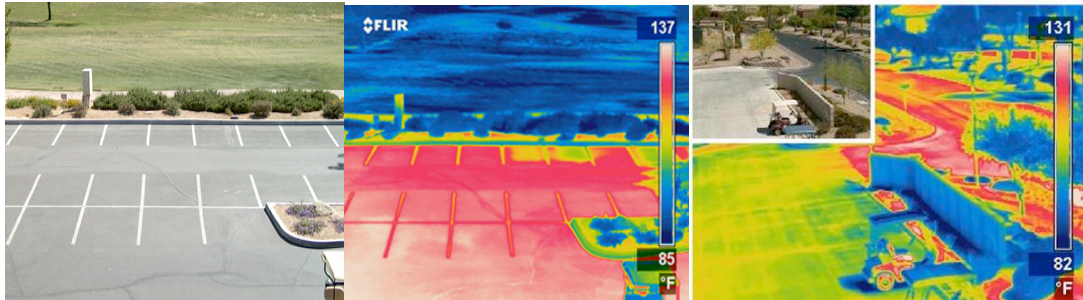
Isı iletkenliği; asfalt veya betonun ısı iletim kabiliyetini anlatan bir özelliktir.

Isı kapasitesi; asfalt veya beton sıcaklığını 1 °C değiştirmek için gerekli olan ısı miktarıdır.

Tablo 2. Asfalt ve diğer ilgili ürünlere ait özellikler [24].

<i>Asfalt</i>		<i>Diğer (κ değerleri)</i>
Güneş ışınımı absorptivitesi	0.9	Bitüm
Taşınım katsayısı (25 °C) Isıl iletkenliği	20 W/m ² K $\kappa = 0.75$ W/m K	Çakıl Beton (hafif) Beton (orta) Beton (serpme) Beton (taş) Kar (< 0°C)

Asfalt kaplamalı bazı yol ve otoparklara ait görünür ve termal görüntüler Şekil 2'de verilmiştir. Şekle göre, kaplama sıcaklıkları 137 °F (58.3 °C) değerine kadar çıkabilmektedir. Şekil 3'de farklı kaplamalara ait veriler, resimler üzerinde gösterilmektedir. Şekle göre asfalt kaplama gibi beton kaplama ve duvarlar da bir kolektör gibi kullanılabilir. Yüksek yansıtıcılık değerlerine sahip kaplamaların daha serin olduğu ve asfalt kaplama ile beton kaplama arasında 15 °C fark olduğu görülmektedir. Kaplamaların aklık derecesine göre bu fark azalabilir veya artabilir. Benzer olarak, Pomerantz ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada da, asfalt kaplamanın Portland betondan en az 10 °C daha sıcak olabileceğini ifade etmişlerdir [23]. Ek olarak, asfalt kaplamanın aklık derecesi 0.05'ten 0.40'a çıktığında asfalt kaplama sıcaklığı 10 °C daha soğuk olduğu görülmüştür.

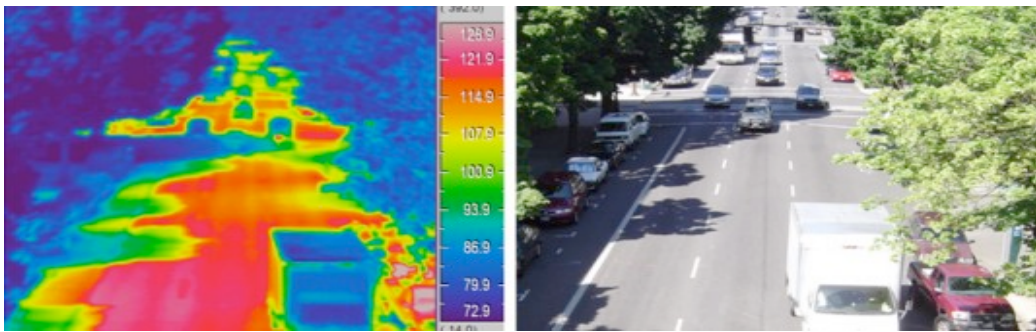
**Şekil 2.** Asfalt kaplamalı bazı yol ve otoparkların görünür ve termal infrared görüntüleri [25].

a) Farklı kaplamaların bazı özelliklerine ait ölçüm verileri [26].

b) Güneş altında asfalt, beton ve duvara ait sıcaklıklar [27].

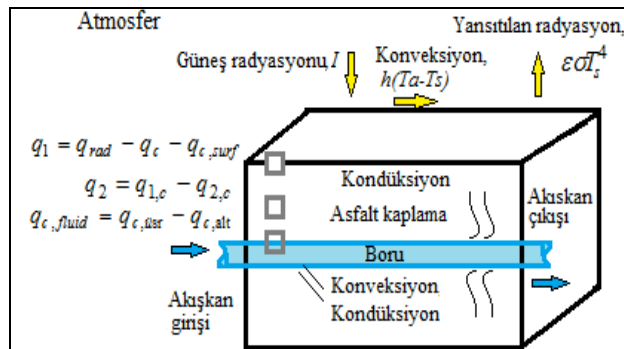
Şekil 3. Farklı kaplamalara ait görüntüler.

Ağaçlar, açık bir yaz gününde güneşin radyasyonunu % 70-90 oranında engelleyebilir. Özenle yerleştirilmiş ağaçlar, % 10-30 oranında ev soğutma maliyetlerini azaltabilir ve asfalt sıcaklığının yükselmesine engel olarak asfaltı koruyabilirler. Bu yüzden, gölgeli sokaklar 10-40 °F daha serindir [21]. Buna karşın gölgeli alanlar asfalt kolektör uygulaması için uygun yerler değildir. Şekil 4'de kısmen gölgeli alanlarda asfalt sıcaklıkları gösterilmektedir. Son yıllarda geliştirilen asfalt güneş kolektörü kavramının en temel avantajı, ısı enerjisi üretmek için yenilenebilir bir enerji kaynağının kullanılıyor olmasıdır. Bu nedenle, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için bir potansiyele sahip olabilir. Asfalt kolektör kullanımının iki önemli çıktısı vardır. Bunlar; yüksek sıcaklıktaki asfalttan enerji üretimi ve asfaltın soğumasıdır.

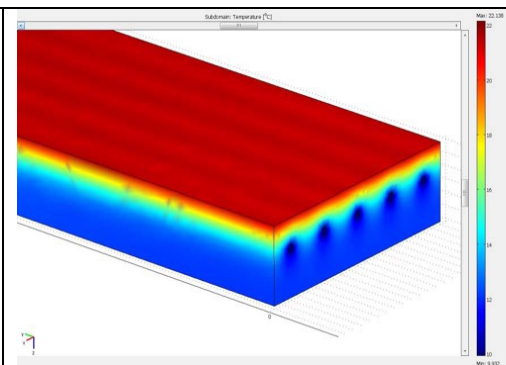


Şekil 4. Kısmen gölgeli alanlarda asfalt sıcaklıkları [28].

Asfalt kolektör, güneş ısıyı depolamak için sonsuz geri dönüşümlü harika bir malzeme olarak kullanılabilir. Asfalt kolektör, güneş enerjisini toplayan güneş battıktan sonra bile uzun süre üzerine aldığı ısıyı koruyabilen büyük bir yüzey alanına sahiptir. Asfalt kolektör, sıcak su üreten geleneksel çatı tipi güneş kolektörü gibi aynı çalışma mantığını kullanmaktadır. Üzerine aldığı enerjiyi bir akışkana aktararak kullanılabilir ısı enerjisine dönüştürür. Şekil 5'te tasarlanan sulu veya soğutucu akışkanlı asfalt kolektörün genel yapısı ve kolektör üzerindeki enerji dengesi görülmektedir. Asfalt kolektör, kanatçıklı bakır borulardan (bakır borunun yoğunluğu 8700 kg/m^3 , ısıl iletkenliği 400 W/m K ve özgül ısı 385 J/kg K) oluşan bir ısı değiştiriciye sahiptir. Tasarlanan asfalt kolektörün sulu kolektör olarak kullanılması halinde literatürdeki asfalt kolektörlere ile benzer sıcaklık dağılımı oluşturacaktır. Şekil 6'da COMSOL Multiphysics ile oluşturulan sulu bir asfalt kolektörün sıcaklık simülasyonu görülmektedir. Sıcak bir yaz gününde asfalt bir yolun yüzeyi $50\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar çıkabilmektedir. Bu potansiyel ısı enerjisi farklı alanlarda farklı formlarda rahatlıkla kullanılabilir. İngiltere karayollarında, Hollanda ve İskoçya'da havaalanı ve karayollarında ve yine Hollanda'da bisiklet yollarında [29] tasarlanan kolektörün benzerleri asfalt kolektör uygulaması başarıyla tatbik edilmiştir. Tasarlanan kolektör literatürdekilerden farklı olarak kanatçıklara sahip olmasının yanında sulu veya soğutucu akışkanlı olarak yaz-kış çalışabilmesi ve heat trace ile donatılmış olması gibi avantajlara sahiptir.



Şekil 5. Su veya soğutucu akışkan kullanılan asfalt kolektör tasarımı.



Şekil 6. Sulu asfalt kolektörün sıcaklık simülasyonu [30].

Asfaltın geri dönüştürülebilir olması, ekonomik olması, çevresel faydaları, enerji tasarrufu ve düşük karbon ayak izi gibi etkileri nedeniyle enerji üretiminde tercih edilebilecek bir üründür. Açık renkli asfalt yollar üretilmediği müddetçe enerji sağlamaya devam edebilir. Görünürlüğünü artırmak için Lüksemburg Markusberg Tünel aydınlatması için açık renkli asfalt uygulanmış ve güç gereksinimi % 40 (yıl bazında yaklaşık 400.000 kWh) azaltılarak tasarruf sağlanmıştır [31]. Dolayısıyla gelecekte, enerji üretmek ve tasarruf sağlamak için asfalt yollardan faydalanılabilir.

Buzlanma, 0 °C altındaki sıcaklıklarda oluşan doğal bir olaydır. Buzlanmanın yollarda oluşması halinde can ve mal kaybı oluşur. Günümüzde kar-buz önleme sistemleri kar ve buz oluşumunu elektrik enerjisiyle önlemektedir. Rampa, karayolu ve yürüyüş yolları gibi farklı mekanlara kar-buz önleme sistemleri uygulanmaktadır. Örneğin; Kuzey Ankara alttan ısıtılmalı protokol yolu uygulaması (7 km) bunlardan biridir. Son zamanlarda, kar ve buz önleme ile ilgili örnek uygulamalarda jeotermal enerjiden de yararlanılmaktadır. Tasarlanan asfalt kolektörün kar ve buz önlemede uygulanması diğer artı bir özelliğidir.

2.1.2. Sistem Tasarımı

Asfalt kolektörler ile ısı enerjisi üretimi (aktif mekanik asfalt soğutma); enerji üretimi, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması ve asfaltı koruma düşüncelerinden ortaya çıkmıştır. Asfalt kolektör teknolojisi güneş kolektör sistemi gibi, kar eritme sistemleri için kullanılan teknoloji ise yerden ısıtma sistemleri ile aynı teknolojiye dayanmaktadır. Bu iki yaklaşım çalışmanın çıkış kaynağını oluşturmuştur. Bu bağlamda, asfalt kolektör ile sıcak hava-su üretimi yapabilen veya asfalt kolektöre ısı enerjisi göndererek kar-buz oluşumunu önleyebilen çok fonksiyonlu bir güneş-asfalt enerji üretim sistem tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda amaç, güneş radyasyonu yeterli olduğunda asfaltı bir güneş kolektörü gibi kullanarak ısı enerjisi üretmek, elde edilen enerjinin depolanmasını, sonrasında ise mahal ısıtması, ürün kurutması ve sera ısıtması gibi farklı alanlarda kullanılmasını sağlamaktır. Bununla birlikte, çetin kış şartlarında asfalt yol üzerinde kar-buz oluşumunu önlemektir.

Trafik akışının aksamaması için rampa, köprü, güneş görmeyen ve kritik noktalarda oluşan kar birikintisi ve buz oluşumunu önlemek veya oluşan koşullarda ise sıkıntıları gidermek için geleneksel olarak tuzlama uygulaması yapılmaktadır. Bu da asfalt yollara zarar vermektedir. Bu nedenle elektrikli ve sıcak sulu eritme sistemleri gibi farklı uygulamalar kullanılmaya başlanmıştır. Sıcak sulu kar eritme sistemleri olarak genellikle ısı borusu, toprak kaynaklı ısı pompası, jeotermal enerji sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise hem asfalt yollardan enerji üretiminin sağlanması hem de kar birikintisi ve buz oluşumunu önlemek veya oluşan kar-buzu eritmek amacıyla geleneksel uygulamalara alternatif bir yöntem geliştirilmiştir.

Tasarlanan sistemler ile;

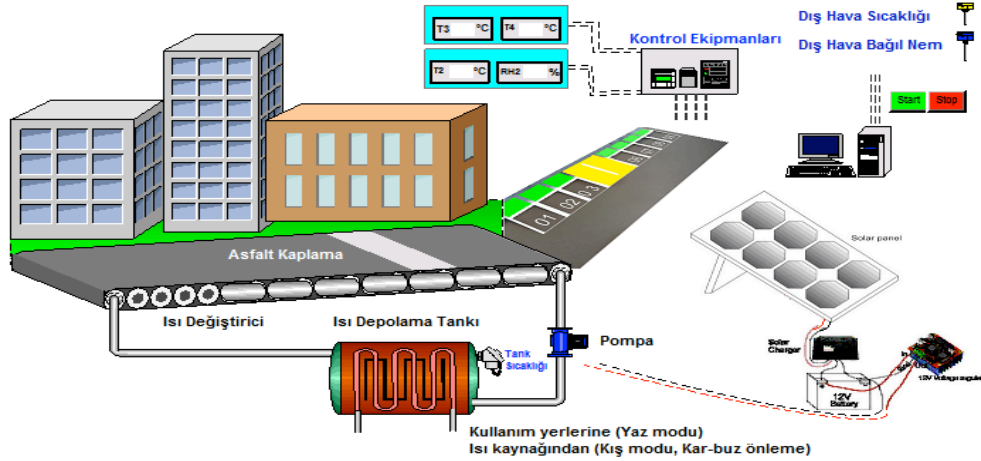
- ✓ Isı enerjisi üretimi,
- ✓ Asfalt soğutma,
- ✓ Elektrik enerjisi üretimi,
- ✓ Kar-buz önleme,

işlevleri gerçekleştirilmektedir.

Asfalt kolektör enerji üretim ve kar-buz önleme sistemi, güneş-asfalt kolektör enerji üretim ve kar-buz önleme sistemi, direkt genişmeli asfalt kolektör destekli ısı pompalı enerji üretim sistemi ve asfalt kolektör destekli ısı pompalı enerji üretim sistemi olmak üzere 4 farklı tasarım modeli oluşturulmuştur.

Farklı fonksiyonlarda çalışabilme yeteneğine sahip tasarım modelleri Şekil 7-10'da verilmiştir.

Şekil 7'deki model, asfalt kaplamanın tıpkı bir güneş kolektörü gibi kullanıldığı bir sistemdir. Şekilde, dolaylı dolaşımli enerji üretimi olarak görülmektedir ancak direkt dolaşımli şeklinde de kolayca tasarlanabilir. Bu model kar-buz önleme özelliğine sahip değildir. Asfalt sıcaklığı, ısı depolama tankı içerisindeki su sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara ulaştığında, asfalt altına döşenen ısı değiştiricide ısınan su polistiren ile izole borular ve bir pompa vasıtasıyla ısı depolama tankına yönlendirilir. Böylece, asfalttan elde edilen ısı çevre binaların sıcak su ihtiyacını karşılamada kullanılabilir.



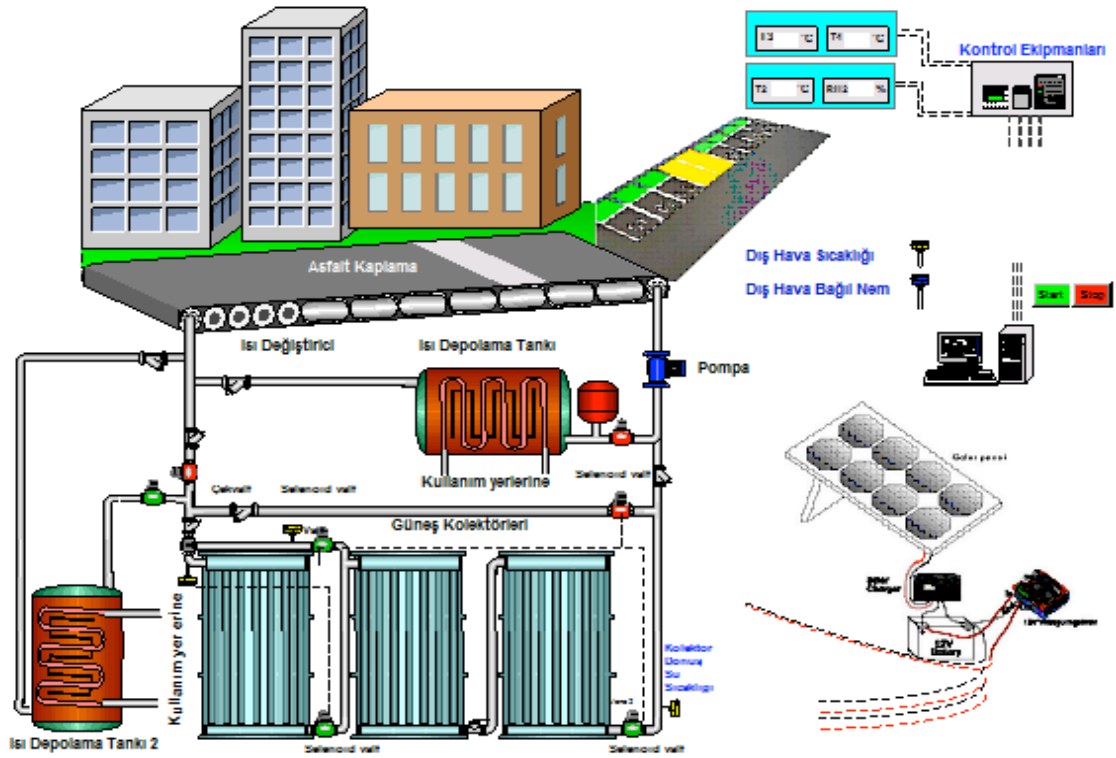
Şekil 7. Asfalt kolektör enerji üretim sistem ve kar-buz önleme tasarım modeli.

Şekil 8'deki model, çok fonksiyonlu güneş-asfalt kolektör enerji üretim ve kar-buz önleme sistemi şeklinde tasarlanmıştır. Sistem, Şekil 7'deki model gibi kullanılabilmesinin yanında sistemde asfalt kolektör ile güneş kolektörlerine destek sağlanmaktadır. Sisteme güneş kolektörü eklenerek kullanım yerlerine hem yüksek ısı gönderme hem de kışın asfaltta oluşacak olan kar-buzu önleme özelliği eklenmiştir. Modelde, iki sistemin ayrı ayrı veya birlikte kullanılabilmesine olanak sağlanmıştır. Şekil 9'daki modellere benzer olarak asfalt kolektörünün ısı pompasının evaporatörü olarak kullanıldığı DGAKDIP (direkt genleşmeli asfalt kolektör destekli ısı pompası) olarak veyahut da asfalt kolektöründe ısıtılan suyun ısı pompasının ısı kaynağı olarak kullanıldığı AKDIP (Asfalt kolektör destekli ısı pompası) gibi de tasarlanabilir. Bu durumda, sistem kışın daha sağlıklı çalışabilir.

Tasarlanan sistem;

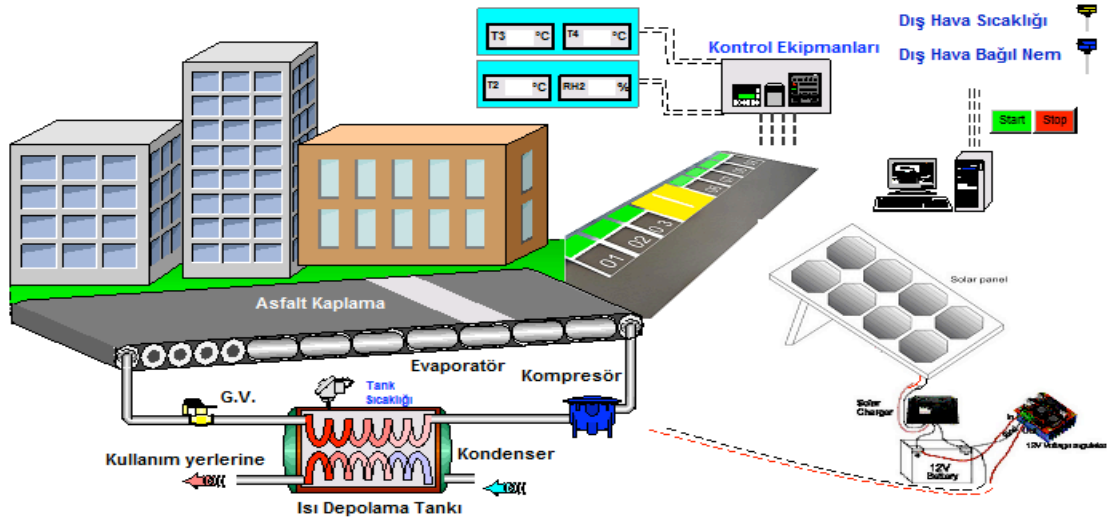
- ✓ Güneş radyasyonunun yeterli olduğu zamanlarda asfalt yoldan kullanım yerlerine gönderilmek üzere ısı enerjisi üretimi ve PV panellerden ise elektrik enerjisi üretimi,
- ✓ Güneş radyasyonunun yetersiz olduğu durumlarda yardımcı ısıtıcının devreye girerek kar-buzu önlemesi

gibi farklı senaryolara cevap verebilecek şekilde çalışabilir.

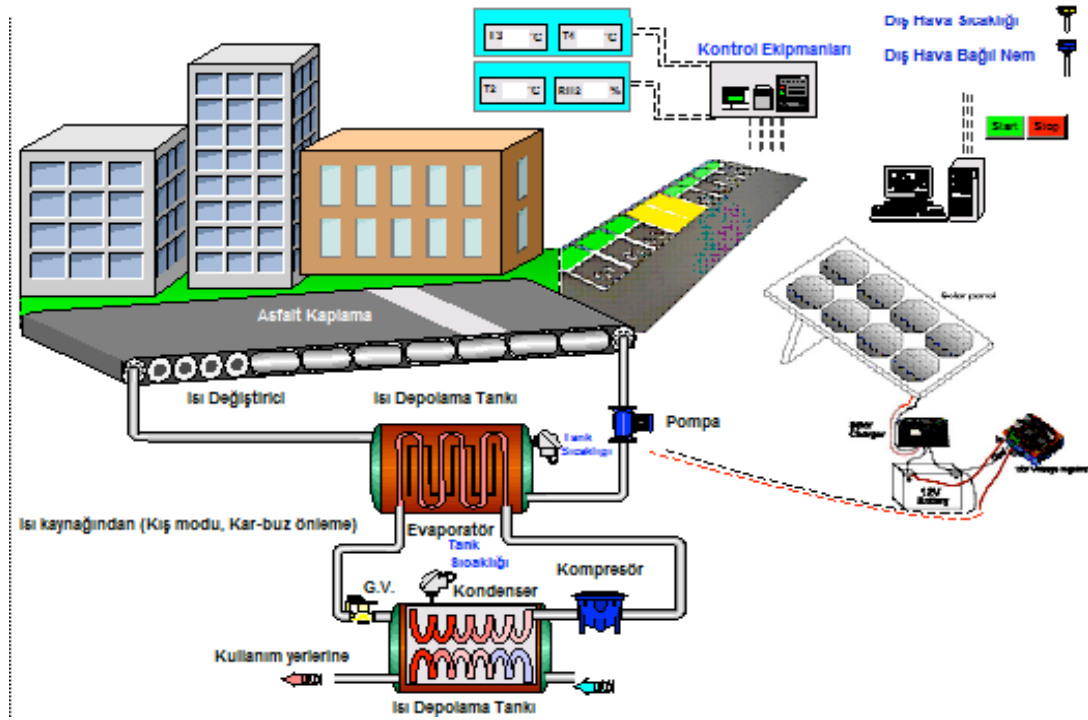


Şekil 8. Güneş-asfalt kolektör enerji üretim ve kar-buz önleme sistem tasarım modeli.

Şekil 9'daki modellerde ise sistemler, DGAKDIP ve AKDIP şeklinde tasarlanmıştır. Asfalt kolektör vasıtasıyla alınan ısı enerjisi ısı depolama tankına yönlendirilmekte ve buradan da kullanım yerlerine gönderilmektedir. Tasarıma destek amacıyla güneş kolektörü de eklenebilir.

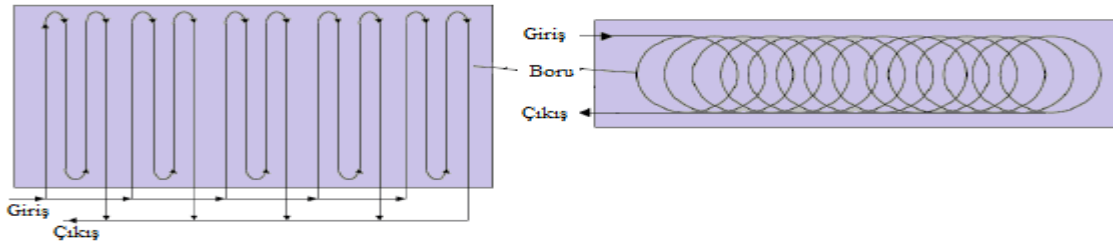


Şekil 9.a. Direkt genleşmeli asfalt kolektör destekli ısı pompalı enerji üretim sistem tasarım modeli (yaz modu).



Şekil 9.b. Asfalt kolektör destekli ısı pompalı enerji üretim sistem tasarım modeli (yaz modu).

Modellerde kullanılan asfalt kolektörlerin oluşturulma şekillerinde farklı modeller kullanılabilir (Şekil 10). Bu asfalt kolektör modellerinde verimlilik farkları oluşabilir o yüzden projelendirme aşamasında karar verilmelidir.



Şekil 10. Modellerde kullanılan asfalt kolektörlerin döşeme şekilleri.

Modellerde ısı enerjisi üretimi; seri veya paralel olarak bağlanan güneş kolektöründen, asfalt kolektörden ve/veya ısı gereksinimine göre hareket edebilen ve devri ayarlanabilen bir kompresöre sahip ısı pompasından sağlanmaktadır. Borulama sisteminde su ve etanol karışımı kullanılmaktadır. Elde edilen ısı enerjisi, invertörlü olan ve sıcaklığa göre hız kontrolü yapılabilen bir pompa yardımıyla ısı depolama tankına gönderilmektedir. Sıcak çalışma akışkanı kullanım yerlerinde kullanılır, ısı ihtiyacı olmadığı durumlarda ise ısı depolama tankına yönlendirilir. Isı depolama tankı içerisinde bulunan serpantinden geçerken enerjisini bırakır. Depodan çıkan düşük enerjili çalışma akışkanı, pompa yardımıyla pompalanarak sistemde dolaşımı sağlar.

Isı depolama; kullanılan toplayıcı miktarına, yani toplam kolektör alanına göre tayin edilen ve toplayıcılardan elde edilen sıcak suyun toplandığı kaptadır. Tank içerisinde ısı depolama akışkanı olarak su kullanılmaktadır. Güneş enerjili sıcak su sistemlerinde, genellikle 1m^2 toplayıcı yüzey alanı için 70-100 litre hacminde bir tank seçilir. Havanın uzun süre kapalı olabileceği veya uzun süre soğuk olabileceği ve gece kullanılabilmesi gibi durumlar gözetilerek depo hacmi daha büyük seçilebilir.

Kar-buz önleme; kışın, sensörler vasıtasıyla 2 °C sıcaklık tespit edildiğinde güneş kolektörleriyle veya ısı pompasıyla elde edilen ılık su, yolun altındaki kolektöre yönlendirilerek buz oluşumu engellenir. Bu işlemlerin yetersiz kalması durumunda yardımcı ısıtıcı devreye girer.

Kontrol işlevi; PLC, devri ayarlanabilen pompa ve kompresör, veri kaydedici, selenoid valfler, invertör, higrostat, sistemin yönlendirilmesinde kullanılan ölçü aletleri ile senkronize çalışan kontrol kartları, yazılım ve benzeri sistem ve sistem elemanlarının birlikte birbiriyle uyumlu kullanıldığı bir dizi elektromekanik kontrol elemanları tarafından yapılmaktadır. Sıcaklık ölçümleri için K tipi termokupullar kullanılmakta ve tüm veriler bir monitörden izlenebilmektedir.

Modellerin sağladığı katkılar;

- ✓ Yaz aylarında enerji üretimi sağlar,
- ✓ Sistemde üretilen enerji farklı formlara dönüştürülebilir,
- ✓ Farklı sistemlere destek olarak kullanılabilir,
- ✓ Enerjinin korunmasına katkı sağlayabilir ve sürdürülebilir sistemlerle entegre olabilir,
- ✓ Kış aylarında güvenli sürüş sağlar,
- ✓ Enerji tasarrufu sağlamaya yardımcı olur,
- ✓ Kentsel ısı adası oluşumunu önler; klima yüklerini azaltır,
- ✓ Kentsel ısı adası oluşumunu önleyerek veya etkilerini azaltarak serin üstyapılar oluşturmaya yardımcı olur,
- ✓ Asfalt yolun sıcaklığının düşürülmesiyle asfalt ömrünün uzamasını sağlar,
- ✓ Tekerlek izi ve yorgunluk etkilerini azaltır,
- ✓ Asfalt bakım giderlerini azaltmaya yardımcı olur,
- ✓ Güneş kolektörleri parklara ve yollara indiğinden çatılardaki çirkinlikleri ortadan kaldırır,
- ✓ Güneş çiftlikleri (PV santralleri) gibi ekstra belirli bir alan ayrılmasına ihtiyaç olmadığından, mevcut otopark ve yollar kullanıldığından ekilebilir arazileri korur,
- ✓ Asfalt yolların karbon ayak izini azaltır dolayısıyla ulaştırma sektörüne ait emisyon oranını azaltır (zamanla etkisi dramatik olarak artabilir),
- ✓ En iyi uygulama tekniklerine yönelik araştırma çalışmalarına katkı sağlar,

Çekinceler; yer altına serilen kolektörün ömrü, yola yapısal yenileme/kazıma işlemleri uygulandığı anda son bulabilir, Türkiye'de dökülen asfaltın sorumluluğunun 1 yıl olması nedeniyle dökülen asfaltın ömrü 1-5 yıldır (Avrupa'da ortalama 3 yılda yenilenen asfalt yolların Türkiye'de ortalama 1.5 yılda yenilenmesi) ve modellerin uzun vadeli performansının doğrulanması gerekliliği olarak sayılabilir.

2.2.3. Sistemin Teorik Analizi

Sistemin enerji analizinde kullanılan bazı genel eşitlikler aşağıda verilmiştir. Açık sistem için Termodinamiğin birinci kanunu'na göre enerjinin korunumu;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{gh} \cdot \left(h_{ch} - h_{gh} + \frac{V_c^2 - V_g^2}{2} \right) \quad (1)$$

Asfalt kaplamanın kazandığı ısı enerjisi;

$$\dot{Q}_{gelen} = \sum A \cdot I \quad (2)$$

Asfalt kolektörün topladığı faydalı enerji:

$$Q_f = A \cdot I \cdot \eta \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Asfalt kolektörden birim zamanda elde edilen enerji;

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

ile ve asfalt kolektörünün verimi ise;

$$\eta_{kol} = \frac{\dot{Q}}{F_K \cdot I_{TOP}} \quad (5)$$

eşitliği ile hesaplanır. Anlık toplayıcı verimi:

$$\eta_t = F_t \cdot \left[(\tau\alpha)_e - K \cdot \frac{T_{tg} - T_{tç}}{I_e} \right] \quad (6)$$

ifadesiyle bulunabilmektedir. Eşitlikte yerine yazılırsa faydalı enerji;

$$Q_f = A_r \cdot [F_t \cdot (\tau\alpha)_e \cdot I_e - F_t \cdot K \cdot (T_{tg} - T_{tç})] \quad (7)$$

ifadesi ile de elde edilir.

Asfalt güneş kolektörlerinin enerji dengesi:

Fourier kanununa göre asfalt güneş kolektörde kaplama yüzeyinden içeri olan ısı transferi [22];

$$q_n = -k_n \nabla T_n \quad (8)$$

Konveksiyon ile ısı akışı [22];

$$q_{cv} = \lambda \cdot A_s \cdot (T_s - T_f) \quad (9)$$

ile hesaplanır. Asfalt güneş kolektörde ısı akışı;

$$q_1 = q_{rad} - q_c - q_{c,surf} \quad (10)$$

$$q_2 = q_{1,c} - q_{2,c} \quad (11)$$

$$q_{c,fluid} = q_{c,işr} - q_{c,alt} \quad (12)$$

ile bulunabilir. Asfalt opak bir gövde ($s=0$) olduğundan tüm radyasyon yansır ve emilir. Asfalt kolektör üzerinde radyasyon (yansıyan; σ , emilen; α , iletilen; s);

$$\sigma + \alpha = 1 \quad (13)$$

olarak ifade edilir. Isı depolama tankındaki suyu ısıtmak için gerekli enerji;

$$Q = m \cdot c_{p,su} \cdot \Delta T \quad (14)$$

ifadesiyle hesaplanır. Sirkülasyon pompasının enerji analizi;

$$W_p = m_p \cdot (h_{ç} - h_g) \quad (15)$$

ile hesaplanır. Isıl yayılım aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$\alpha = k / \rho c_p \quad (16)$$

Isı, sıcak tarafından daha soğuk tarafa yayılan ses dalgalarıdır. Bu nedenle, α değeri, termal ses dalgalarının ortalama serbest yolu (ℓ) ve sesin hızına (v) bağlı olarak aşağıdaki formülden bulunabilir [32].

$$\alpha = v\ell / 3 \quad (17)$$

Sert ve katı cisimlerde tipik bir ses hızı $v \approx 3000$ m/s olduğuna göre asfaltın ℓ değeri $\approx 5 \times 10^{-10}$ m olarak elde edilir.

Asfalt kaplama sıcaklık farkı 25 °C ve $\rho c_p = 3.1 \cdot 10^6$ J/m³ °C (literatürde 1.68×10^6 - 3.89×10^6) olarak kabul edilir ve referans olarak literatürdeki maksimum asfalt kolektör verim değerleri % 5-95 alınır:

Asfalttan elde edilecek maksimum enerji;

$$E_{ee} = \rho c_p \cdot \Delta T \cdot d = 3.1 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 0.2 = 15.5 \text{ MJ} / \text{m}^2 \text{ gün} = 4 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ gün} \quad (18)$$

maksimum enerji yakalama değeri ise;

$$E = E_{ee} \cdot \eta = 0.2 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ gün veya } 3.8 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ gün} \quad (19)$$

elde edilir. 200 litre sıcak su kullanılan bir konutta su sıcaklığı 20 °C'den 50 °C'ye çıkarılırsa;

$$\text{Eşitlik 12'den } Q = m \cdot c_{su} \cdot \Delta T = 200 \text{ kg} \cdot 4.18 \text{ kJ} / \text{kgK} \cdot (1 \text{ kWh} / 3600 \text{ kJ}) \cdot (323 \text{ K} - 293 \text{ K}) \quad (20)$$

$Q = 6.97kWh/gün$ elde edilir. Bu ihtiyacı asfalt kolektörün karşıladığı varsayılırsa gerekli asfalt kolektör alanı;

$gerekli\ m^2 = Q / E = 34.85\ m^2$ veya $1.83\ m^2$ olarak hesaplanır.

Kondenserden aktarılan ısı;

$$Q_{Kond} = Q_{Evap} + Q_{Komp} \quad (21)$$

Isı pompasının performans katsayısı;

$$COP_{IP} = \frac{Q_{Kond}}{W_{Komp}} \quad (22)$$

yardımıyla elde edilir. Isı pompasının COP değeri 2.5 olarak kabul edilirse kompresör gücü rahatlıkla bulunabilir. Tüm sistemin performans katsayısı ise;

$$COP_{sist} = \frac{Q_{sist}}{W_{sist}} = \frac{Q_{Kond}}{W_{Komp} + W_{Fan} + W_{pomp} + \dots} \quad (23)$$

eşitliğinden yararlanılarak elde edilir. Kar-buzda oluşan kütle ve ısı dengeleri [33];

Hem kuru kar hem de sulu kar (χ_{Buz}) olarak buz kristalleri için kütle dengesi;

$$\frac{d\chi_{Buz}}{d\theta} = \dot{\chi}_{KYO} - \dot{\chi}_{KEH} \quad (24)$$

Sulu kar tabakasında ısı dengesi;

$$\dot{\chi}_{Eriyik} [h + c_{p, kar} (t_{kar, alt} - t_{kar, üst})] = \dot{q}''_{c_döseme} + \dot{q}''_{güneş} + \dot{q}''_{yağış} - \dot{q}''_{c_kar} \quad (25)$$

($t_{kar, alt}$ suyun donma noktasında sabittir).

Kuru kar tabakasının üst yüzeyinde ısı dengesi;

$$\dot{q}''_{c_kar} = \dot{q}''_{cv} + \dot{q}''_{rad_LW} + \dot{q}''_{kar\ yağış} \quad (26)$$

Kuru kar tabakasının üst yüzeyinde iletim ısı transfer hızı;

(Yeni yağmış kar yoğunluğu $117\ kg/m^3$, kar ısı iletkenliği $k_{Kar} = 2,22362_{Kar}^{1,885}$)

PV sistemin yatırım maliyet ve kazanç analizi basit olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

Yatırım maliyeti (TL);

$$YM = K \cdot BM \quad (27)$$

PV sistemin bir günlük ortalama enerji üretimi (kWh)

$$E\ddot{U} = K \cdot \eta \cdot t \quad (28)$$

PV sistemin amortisman giderleri dahil toplam bir günlük işletme gideri (TL);

$$\dot{I}G = E\ddot{U} \cdot BIG \quad (29)$$

PV sistemin bir günlük ortalama enerji üretim bedeli (TL);

$$E\ddot{U}B = E\ddot{U} \cdot ST \quad (30)$$

PV sistemin bir günlük ortalama enerji üretim kazancı (TL);

$$E\ddot{U}K = E\ddot{U}B - \dot{I}G \quad (31)$$

PV sistem yıllık enerji üretim kazancı (TL/yıl);

$$E\ddot{U}K_y = E\ddot{U}K \cdot \dot{C}S \quad (32)$$

Sistemin büyüklüğü kabullere bağlı olarak her bir sistem için ayrı olarak hesap edilebilmektedir. Hesaplamalar, sistemin kurulacağı yerin özellikleri, sıcak su ihtiyacı ve ısıtma ihtiyacı, göz önünde bulundurularak yapılmasına imkan sağlar.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çok fonksiyonlu bir güneş-asfalt enerji üretim ve kar-buz önleme sistem tasarım modelleri geliştirilmiş ve teorik olarak analiz edilmiştir. Sistemde elde edilen enerji, bina ve sera ısıtmasında kullanılabileceği gibi kullanım sıcak suyu hazırlama, iklimlendirme sistemlerine entegre ısı kaynağı olarak da uygulanabilir ve uygulanan sistem ile enerji giderleri azaltılabilir. Oluşturulan modellerin, Türkiye şartlarında verimli ve kullanılabilirliğinin başarılı sonuçlarla desteklenmesi sonucunda bu tür çalışmaların sektöre hareketlilik getireceği öngörülmüştür. Böylece, güneş destekli ısı pompası ve hava-

su-toprak kaynaklı ısı pompaları gibi literatüre yeni bir kavram “asfalt kaynaklı ısı pompası” eklenmiş olacaktır.

Bu çalışma ile, asfalt yollardan enerji üretim sistemleri ile sıcak hava, sıcak su hatta elektrik enerjisi üretilebileceği, asfalt yolun sıcaklığının düşürülmesiyle asfalt ömrünün uzatılabileceği, kentsel ısı adası oluşumunu önleyerek veya etkilerini azaltarak serin üstyapılar oluşturmaya yardımcı olunacağı, enerji tasarrufu sağlanacağı ve asfalt yolların karbon ayak izinin azaltılması dolayısıyla ulaştırma sektörü emisyon oranının azaltılmasına katkı sağlanabileceği (zamanla etkisi dramatik olarak artabilir) ön görülmüştür. Bununla beraber, sistem asfalt bakım giderlerini azaltacak ve tekerlek izi ve yorgunluk etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Sistem ile asfalt yol yüzeyindeki kar ve buz arasındaki bağı kopararak kışın asfaltın donmasının önlenmesi neticesinde sağlıklı yürüyüş ve araç sürüşü sağlayacak ve de asfaltın ömrü uzayacaktır. Son olarak, enerjinin korunduğu, yenilikçi ve sürdürülebilir modern yöntemlerle oluşturulan modellerin sadece asfalt yollarda değil beton yollarda da kolaylıkla uygulanabileceği ve açık renkli asfalt yollar üretilmediği müddetçe enerji üretmeye devam edeceği ön görülmüştür. Alternatif enerjilere verilen değerin arttığı günümüzde, yarının yollarının güneş enerjisiyle işbirliği içerisinde çalışarak ekolojik yaşama katkıda bulunabileceği kanısına varılmıştır. Güneş ülkesi olan Türkiye’de güneş enerjisinin her ne şekilde olursa olsun kullanımının artırılması yönünde adımlar atılmalıdır.

SEMBOLLER

A	yüzey alanı (m^2)	Kısaltmalar	
c_p	özgül ısı ($kJ/kg K$)	COP	performans katsayısı
h	entalpisi (kJ/kg)	YM	yatırım maliyeti (TL)
I_e	anlık ışınım gücü (W/m^2)	K	kapasite (kWh)
m	kütle (kg)	BM	birim maliyet (TL/ kWh)
F_t	kolektör ısı kazancı faktörü	t	süre (saat)
k	ısı iletkenliği (W/mK)	BIG	birim işletme gideri (TL/ kWh)
$(\tau\alpha)_e$	efektif yutma katsayısı	$\dot{I}G$	amortisman giderleri dahil toplam bir günlük işletme gideri (TL)
T_{ig}	giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)	$E\dot{U}$	bir günlük ort. enerji üretimi (kWh)
$T_{iç}$	çevre sıcaklığı ($^{\circ}C$)	$E\dot{U}B$	bir günlük ort. enerji üretim bedeli (TL)
T_s	yüzey sıcaklığı (K)	ST	satış tarifesi (TL/ kWh)
T_f	akışkan sıcaklığı (K)	$E\dot{U}K$	bir günlük ort. enerji üretim kazancı (TL)
W_P	pompa gücü (kW)	$E\dot{U}K_y$	yıllık enerji üretim kazancı (TL/yıl)
Q	ısı enerjisi (kW)	$\dot{C}S$	yıllık çalışma süresi (gün/yıl)
q_n	n yönünde ısı transfer hızı (W/m^2)	cv	konveksiyon ısı transferi
∇T_n	n yönünde sıcaklık gradyeni	rad_{LW}	uzun dalga radyasyonu
λ	yüzeyin ortalama taşınım katsayısı (W/m^2K)		
η	verim		
ΔT	sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)		
χ	birim alan başına kütle, (kg/m^2)		
$\dot{\chi}$	birim alan başına kütle akış hızı, (kg/m^2s)		

4. KAYNAKLAR

1. H. Li, “Evaluation of cool pavement strategies for heat island mitigation”, Research Report–UCD-ITS-RR-12-33. Institute of Transportation Studies University of California, December 2012, Davis, 2002, California.
2. H. P. Vind, “Oxidative degradation of asphalt”, Naval Civil Engineering Lab Port Hueneme, CA, <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0823572>, 1967.

3. A. Kawakami, K. Kubo, “Development of a cool pavement for mitigating the urban heat island effect in Japan”, Proc. of the International ISAP Symposium 18-20 August, Zurich, Switzerland. Edit. Partl., 2008.
4. A. Carrera, A. Dawson, “Alternative materials and methods to enhance resistance to climate change”, University of Nottingham, UK, Report Nr 3, January 2010.
5. M. Iwama, T. Yoshinaka, S. Omoto, N. Nemoto, “Fundamental study on the reduction of pavement temperature by use of solar reflective technology”, Proc. of the International ISAP Symposium 18-20 August, Zurich, Switzerland. Edit. Partl., 2008.
6. Under-road radiators may beat the ice, 2008, <http://www.theguardian.com/environment/2008/apr/25/solarpower.energy> [Erişim Aralık 2014].
7. Z. Zhou, S. Hu, X. Zhang, J. Zou, “Characteristics and application of road absorbing solar Energy”, Front. Energy 7(4):525-534, 2013.
8. H. Wang, S. Wu, M. Chen, Y. Zhang, “Numerical simulation on the thermal response of heat-conducting asphalt pavements”, Phys. Scr. 014041, 2010.
9. P. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno, P. Serrano-Bravo, A. Alonso-Estébanez, “Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors”, Applied Energy (111):324–332, 2013.
10. S. P. Wu, M. Y. Chen, J. Zhang, “Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs”, Applied Thermal Engineering, Applied Thermal Engineering (31):1582-1587, 2011.
11. M. Medas, R. Mallick, S. Bhowmick, “Thermodynamic analysis of asphalt solar collector (ASC). Heat Transfer in Energy Systems”, doi:10.1115/HT2013-17323, 2013.
12. C. Mingyu, W. Shaopeng, Z. Yuan, W. Hong, “Effects of conductive fillers on temperature distribution of asphalt pavements”, Physica Scripta (T139):014046, 2010.
13. R. B. Mallick, B. L. Chen, S. Bhowmic, M. S. Hulen, “Capturing solar energy from asphalt pavements”, ISAP 2008.
14. Y. Du, Q. Shi, S. Wang, “Bidirectional heat induced structure of asphalt pavement for reducing pavement temperature”, Applied Thermal Engineering, 2014, 10.1016/j.applthermaleng.10.011., 2014.
15. H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha, “Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas”, Solar Energy 70(3):295-310, 2001.
16. Ş. Altıok, B. E. Avcı, “Kar ve buz mücadelesinde kullanılan kimyasalların esnek üstyapıya etkileri”, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, 27-28 Kasım 2013, 2013, Ankara.
17. **A. Balbay, M. Esen, “Yollardaki kar ve buzu önleyici sistemler”, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 2007.**
18. Eurobitume, <http://www.eurobitume.eu/bitumen/types-bitumen> [Erişim Kasım 2014].
19. ASTM, www.astm.org [Erişim Kasım 2014].
20. M. Z. Chen, W. Wei, S. P. Wu, “On cold materials of pavement and high-temperature performance of asphalt concrete”, Materials Science Forum, 620-622:379-382, 2009.
21. Tree placement: Right plant, right place, Colorado State University Extension, CMG GardenNotes #631. <http://www.ext.colostate.edu/mg/Gardennotes/631.pdf> [Erişim Aralık 2014].
22. V. Bobes-Jesus, P. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno, J. Rodriguez-Hernandez, “Asphalt solar collectors: A literature review”, Applied Energy (102):962–970, 2013.
23. M. Pomerantz, H. Akbari, S. C. Chang, R. Levinson, B. Pon, “Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals”, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2003.
24. Thermal conductivity of some common materials and gases, http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html [Erişim Eylül 2014].
25. How cool pavements work, <http://www.coolcalifornia.org/cool-pave-how> [Erişim Eylül 2014].
26. Cool pavement, <https://1510365blog.wordpress.com/category/latest-1510365-tips/274-cool-pavement/> [Erişim Ağustos 2014].
27. Research findings: Concrete pavements make urban heat islands worse, not better!

- <http://www.apao.org/documents/UrbanHeatIslandInfo.pdf> [Erişim Ekim 2014].
28. Choosing the right tree for shade, December 10, 2012, <http://treelogic.com.au/facts/choosing-the-right-tree/> [Erişim Nisan 2013].
 29. C. Sullivan, A. H. Bondt, R. Jansen, H. Verweijmeren, “Innovation in the production and commercial use of energy extracted from asphalt pavements”, 6th Annual International Conference on Sustainable Aggregates, Asphalt Technology and Pavement Engineering, Liverpool John Moores University, United Kingdom, 21st and 22nd February 2007.
 30. N. Siebert, E. Zacharakis, “Asphalt solar collector and borehole storage, design study for a small residential building area”, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Report No. E2010:11, 2010.
 31. <http://www.shell.com/global/products-services/solutions-for-businesses/bitumen/news/news-pavement-durability-shells-alternative-options-explored.html> [Erişim Kasım 2014].
 32. C. Kittel, “Introduction to solid state physics”, 5 th Ed., New York, Wiley and Sons, 1976,
 33. X. Liu, S. J. Rees, J. D. Spitler, “Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model development”, Applied Thermal Engineering, 27: 1115–24, 2007.