

**KARAYOLU ÜSTYAPILARINDA JEOTERMAL ENERJİ İLE BUZLANMA
ÖNLEYİCİ SİSTEMLERİN MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Lale ATILGAN GEVREK

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İNŞAAT MÜHENDSİLİĞİ ANABİLİM DALI
Mayıs 2021

Bu tez çalışması 18 FENBİL 41 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

KARAYOLU ÜSTYAPILARINDA JEOTERMAL ENERJİ İLE
BUZLANMA ÖNLEYİCİ SİSTEMLERİN MODELLENMESİ

Lale ATILGAN GEVREK

Danışman
Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Lale ATILGAN GEVREK tarafından hazırlanan “Karayolu Üstyapılarında Jeotermal Enerji İle Buzlanma Önleyici Sistemlerin Modellenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 25/05/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

Başkan : Prof. Dr. Serdal TERZİ
Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Cahit GÜRER
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Mehmet SALTAN
Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

imza



Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/05/2021



Lale ATILGAN GEVREK

ÖZET
Doktora Tezi

**KARAYOLU ÜSTYAPILARINDA JEOTERMAL ENERJİ İLE BUZLANMA
ÖNLEYİCİ SİSTEMLERİN MODELLENMESİ**

Lale GEVREK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

Dünya sağlık örgütünün verilerine göre, karayollarında meydana gelen kazaların sonucunda ölüm ve yaralanmalar ciddi bir halk sağlığı sorunu olarak ortaya çıkmakta ve ciddi ekonomik ve sosyal maliyetler, her ülke için çözülmesi gereken en önemli sorunlardan biri haline gelmektedir. Kış aylarında hava koşulları ve buzlanmaya bağlı olarak, soğuk iklime sahip bölgelerde maddi ve manevi kayıplı trafik kazaları meydana gelmektedir. Buzlanma sebebiyle sadece trafik kazaları değil, dolaylı ciddi ekonomik maliyetler de ortaya çıkmaktadır. Buzlanma ile mücadele için harcadığımız zaman ve işçilik giderleri oldukça külfetli olmakta ve ayrıca kar ve buz mücadelesi sürecinde yol sathına ve elemanlarına verilen zarar, bakım-onarım çalışmaları kapsamında değerlendirilmemekte ve bu kar ve buz mücadelesi maliyetlerine dâhil edilmemektedir. Dolayısıyla kar ve buz mücadelesinin ekonomik maliyeti oldukça fazla olmaktadır.

Enerjide dışa bağımlılığımızı azaltmaya çalıştığımız bu günlerde, var olan kaynaklarımızı daha verimli bir şekilde değerlendirmek kaçınılmaz olmaktadır. Türkiye dünyada jeotermal enerji potansiyeline sahip en zengin yedinci ülke olmasına rağmen bu kaynaklarımızı kullanabileceğimiz alanlar sınırlı kalmaktadır. Yüksek enerji üreten jeotermal kaynaklardan öncelikle elektrik üretimi için faydalanılmakta buradan dönen jeotermal kaynak enerjisi konut veya sera ısıtmasında kullanılabilir. Yine bu jeotermal konut ısıtması sonucu çıkan enerji yok edilememektedir, sadece daha düşük kullanılabilirliği olan enerji şekline dönüştürülmektedir. Bu çalışma kapsamında niteliği düşen enerji israf edilmeden karayollarımızda kış aylarında meydana gelen olumsuzlukların giderilmesi kapsamında kar buz önleme sistemleri için yeniden

kullanılacak olup, jeotermal enerjiyi etkin bir şekilde kullanmış ve jeotermal kaynaktan üçüncü kez fayda sağlanmış olunacaktır.

Yapılan çalışmada, jeotermal kaynak sularını asfalt kaplama tabakası altına yerleştirilmiş pe-x borulardan sirküle ederek, buz ve kar oluşumunun önüne geçilebileceği gösterilmiştir. 4 eş asfalt numunesi üzerinde gerçek hava koşullarında yapılan deneyler sonrasında veriler değerlendirilmiştir. Jeotermal kaynak benzetimi bir elektrikli kombi kullanılarak sağlanmıştır. Veri kayıtları için bir veri kaydedici ile 8 adet sıcaklık ölçen termokapıl kullanılmıştır. Çalışma sonucunda jeotermal kaynaklar kullanılarak tünel giriş çıkışları, rampalar, yatay ve düşey kurplar ve köprü kesimlerinde çevre dostu, sürdürülebilir ve kendi öz kaynaklarımızın kullanımı ile beraber buzlanmanın daha oluşmadan önlenebileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmayla karayolu üstyapılarında soğuk kış aylarında sorun teşkil eden buzlanma ve kar ile mücadele için bir sistem çözümü önerilmiştir. Hem yenilenebilir hem de öz kaynaklarımız olan jeotermal kaynakları, kar ve buz ile mücadelede kullanılabilirliği, karayolu güvenliği ve kullanılan tuz ve kimyasalların çevreye ve yol kaplamalarına verdiği zararın önlenmesi ile üstyapı performansına ciddi katkı sağlayacağı ortaya konmuştur.

2021, xiii + 84 sayfa

Anahtar Kelimeler: Hidronik ısıtma sistemleri, buzlanma önleyici sistemler, jeotermal kaynaklar, jeotermal karayolu ısıtması

ABSTRACT
Ph.D. Thesis

**MODELING OF ANTI-ICING SYSTEMS WITH GEOTHERMAL ENERGY IN
HIGHWAY PAVEMENTS**

Lale GEVREK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Hüseyin AKBULUT

According to the World Health Organization data, deaths and injuries as a result of accidents on highways emerge as a serious public health problem and economic and social costs become one of the most important problem to be solved for every country. Due to weather conditions and icing in winter, serious numbers of traffic accidents occur which leads a considerable economic and social losses in the cold climates regions. The time and labor expenses spend in anti icing are quite burdensome, and also the damage to the road surface and elements during the snow and ice struggle is considered within the scope of maintenance and repair works and it is not included in this snow and ice fighting costs. Therefore, the economic cost of snow and ice fight is quite high.

In these days, in a struggle of reduction of our dependence on foreign energy consumption, it is inevitable to use our existing resources more efficient way. Although, Turkey, that is the seventh richest country in the world, has the huge potential of geothermal energy is limited in areas where can use our resources. High energy generating geothermal resources are primarily used for electricity generation, and the geothermal source energy returning from here can be used in residential or greenhouse heating. Again, the energy resulting from this geothermal home heating cannot be wasted, it is only converted into energy with lower availability. Within the scope of this study, the quality of the energy will be reused for the snow and ice prevention systems within the scope of eliminating the negativities that occur in our highways during the winter months without wasting, and the geothermal energy will be used effectively and will be benefited for the third time.

In the study, it has been shown that the formation of ice and snow can be prevented by circulating geothermal spring waters through pe-x pipes placed underneath of the asphalt pavement layer. After the experiments on 4 identical asphalt samples under real weather conditions, the data were collected and evaluated. Geothermal resource simulation has been achieved by using an electric boiler. A data logger and 8 temperature measuring thermocouples were used for data recording. As a result of the study, it has been shown that by using geothermal resources, icing on highways can be prevented before it occurs with the use of our own resources in tunnel entrances, ramps, horizontal and vertical curves and bridge sections.

The study suggests that, a system solution that has been proposed to anti icing and snow which is a huge problem in the cold winter months on highways. It has been demonstrated that geothermal resources, which are both renewable and local resources that can be used in fighting snow and ice for road safety and the prevention of the damage caused by the salt and chemicals used on highway pavements and the environmental distruction, therefore, a significant contribution to the highway safety and performance.

2021, xiii + 84 pages

Keywords: Hydronic heating systems, anti-icing systems, geothermal sources, geothermal highway heating

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tez danışmanım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT'a, doktora süresince yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Doç Dr. Cahit GÜRER'e, sistemin ANSYS bilgisayar yazılımında modellenmesi aşamasındaki önemli katkılarında dolay Makine Mühendisi Ufuk TİFTİK'e, verilerin istatistiki açıdan değerlendirilmesi aşamasındaki yardımlarında dolay Dr. Öğretim yesi Murat AY'a, asfalt numunelerin hazırlanmasında verdikleri katkıdan dolay zdemir İnaaat Turizm Enerji Sanayi ve Ticaret A.ř. 'ye doktoram boyunca beni destekleyen canım arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Zuhul AKGÜN'e, teşekkür ederim.

Bu alışmayı 18. FENBİL. 41 nolu proje ile destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine,

Her zaman yanımda olan biricik aileme sonsuz teşekkür ederim.

Sadece doktora boyunca değil hayat boyu, her daim ve her konuda bana değer katan ve destekleyen can yoldaşım Ferdi GEVREK'e ve çalışmam boyunca gösterdikleri sabır ve olgunluktan ötürü oğullarım Yiğit Eymen'e ve Yavuz Selim'e çok teşekkür ederim.

Lale ATILGAN GEVREK
AFYONKARAHİSAR, 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	6
2.1 Karayolu Üstyapısı ve Ulaştırma	6
2.2 Karayollarındaki Buzlanma Koşulları.....	8
2.3 Kar ve Buzlanma ile Mücadele Yöntemleri.....	11
2.3.1 Pasif Yöntemler	11
2.3.1.1 Fiziksel Yöntemler	12
2.3.1.2 Kimyasal Yöntemler.....	13
2.3.2 Aktif Yöntemler.....	14
2.3.2.1 Otomatik Solüsyon Püskürtme Sistemleri.....	15
2.3.2.2 İletken Asfalt Betonu.....	16
2.3.2.3 Elektrik Kabloları Kullanılarak Alttan Isıtma	17
2.3.2.4 Hidronik Isıtma Sistemleri	17
Isı Borulu Sistemler.....	18
Jeotermal Sulu Sistemler.....	19
Yeraltı Termal Enerji Depolama Sistemleri (Jeotermal Enerji Depolama Sistemleri).....	20
2.4 Jeotermal Enerji.....	20
2.5 Konu İle İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar.....	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM	28
3.1 Laboratuvar Ortamında Hazırlanan Numuneler ve Verilerin Alınması	30
3.2 Hidronik Isıtma Sisteminin ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Yapılan Termal Analizi.....	36

3.3 Hidronik Isıtma Sistemine Sahip Asfalt Kaplamanın ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Trafik Yüğü Altındaki Yapısal Analizi.....	36
3.4 Laboratuvar Deneylerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi.....	39
4. BULGULAR	41
4.1 Hidronik Isıtma Sistemine Sahip Asfalt Kaplamanın ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Yapılan Termal Analiz Sonuçları.....	41
4.2 Hidronik Isıtma Sistemine Sahip Asfalt Kaplamanın ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Yapılan Yapısal Analiz Sonuçları.....	45
4.3 MATLAB Yazılımı Kullanılarak Yapılan İstatistik Analizi Sonuçları.....	51
4.4 Hidronik Isıtma Sistemi Maliyet Analizi.....	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
6. KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	83

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CaCl ₂	Kalsiyum Klorür
CMA	Kalsiyum Magnezyum Asetat
MgCl ₂	Kalsiyum Magnezyum Asetat
NaCl	Sodyum Klorür
KCO ₂ H	Potasyum Asetat
°C	Santigrad Derece
%	Yüzde
\$	Amerikan Doları
Km/h	Kilometre/Saat
m/s	Metre/saniye
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
cm	Santimetre
m	Metre
R ²	Determinasyon katsayısı
r	Korelasyon Katsayısı
c	Özgül Isı Kapasitesi
λ	Termal İletkenlik
ρ	Yoğunluk
K	Kelvin
Mpa	Mega Pascal
W	Watt
MWt	Mega Watt
Tj	Tera Joule
Dk	Dakika

Kısaltmalar

ASHRAE	Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)
ANSYS	Analiz Sistemi (Analysis System)
ÇLR	Çoklu Lineer Regresyon
DOT	Ulaştırma Departmanı (Department of Transportation)
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
MATLAB	Matematik Laboratuvarı (Matrix laboratory)
OKHK	Ortalama Karesel Hatanın Karekökü
OMH	Ortalama Mutlak Hata
SEM	Sonlu Elemanlar Methodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1	2018 yılı KGM bölge müdürlükleri kar mücadelesi birim maliyetleri (KGM 2020).	2
Şekil 1.2	Buzla mücadelede kullanılan tuzların kimyasal içerik ve maliyetleri (Houssain 2014).	4
Şekil 2.1	Tipik bir esnek yol enkesiti	6
Şekil 2.2	Üstyapı tabaka çeşitleri	7
Şekil 2.3	Ulaştırma türlerine göre yolcu (a) ve yük (b) taşımacılığı oranları (İnt. Kyn. 1).	8
Şekil 2.4	Kar ve buzla mücadele yöntemleri	11
Şekil 2.5	Buzlanma önleyici otomatik püskürtme sistem şeması (Kılıç 2015).	15
Şekil 2.6	Tipik bir hidronik ısıtma sistemi yapısı a) Plan b) Kesit (Spitler ve Ramamoorthy 2000).	18
Şekil 2.7	Isı borulu ısıtma sistemi (Akbulut vd. 2015)	19
Şekil 2.8	Direkt jeotermal sulu sistemler	19
Şekil 2.9	Kar eritme sistemi çalışma modları (Morita ve Tago 2005).	20
Şekil 2.10	Jeotermal enerjiden yararlanma işlemleri ve sıcaklık değerleri (Yaşar 2010).	23
Şekil 3.1	Tez yöntem akış şeması	33
Şekil 3.2	Asfalt yol kaplaması 2 ve 3 boyutlu görünüşleri	34
Şekil 3.3	Yozgat 2020 yılı hava sıcaklığı ve rüzgâr verileri (İnt. Kyn. 5).	36
Şekil 3.4	Üstyapı modeli	37
Şekil 4.1	150 mm boru aralığında aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında yer alan sistemin farklı hava ve giriş suyu sıcaklıklarına göre asfalt yüzey ortalama sıcaklıkları	41
Şekil 4.2	Binder tabakasında yer alan, farklı boru aralıklarında, farklı hava sıcaklıkları ve farklı giriş suyu sıcaklıklarına göre asfalt yüzey ortalama sıcaklıkları	42
Şekil 4.3	30 °C su girişine sahip farklı boru aralıklarındaki sistemin asfalt yüzey sıcaklıkları	43
Şekil 4.4	40 °C su girişine sahip farklı boru aralıklarındaki sistemin asfalt yüzey sıcaklıkları	43
Şekil 4.5	50 °C su girişine sahip farklı boru aralıklarındaki sistemin asfalt yüzey sıcaklıkları	44
Şekil 4.6	25 mm derinlik 150mm aralıkta, giriş suyu sıcaklığı 50°C hava sıcaklığı 0°C olduğu durumdaki asfalt yüzey ortalama sıcaklık dağılımı	44

Şekil 4.7 30 °C Giriş suyunda boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri	45
Şekil 4.8 40 °C Giriş suyunda boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri	46
Şekil 4.9 50 °C Giriş suyunda boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri	47
Şekil 4.10 0 °C hava sıcaklığında boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri	48
Şekil 4.11 Boruların farklı tabalarda yer aldığı sistemlerde 0 °C hava sıcaklığında farklı giriş suyuna sahip hidronik ısıtma sistemli üstyapının yükleme durumunda pe-x boruda meydana getirdiği gerilmeler	49
Şekil 4.12 0°C hava sıcaklığında boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde farklı giriş sularında meydana gelen teker çökme miktarları.....	50
Şekil 4.13 Numune 1 ÇLR 4.1'in test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği.....	54
Şekil 4.14 Numune 1 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.15 Numune 2 için ÇLR 4.1 'de test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği	57
Şekil 4.16 Numune 2 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.17 Numune 3 için ÇLR 4.1 'in test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği	60
Şekil 4.18 Numune 3 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.19 Numune 4 için ÇLR 4.1 'in test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği	63
Şekil 4.20 Numune 4 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.21 Hidronik ısıtma sistemi için kullanılan malzemeler.....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Çeşitli ısıtma sistemleri için maliyet tahminleri (Pan vd. 2015, Zhang 2009, Spitler ve Ramamoorthy 2000).....	5
Çizelge 2.1 Kar ve buzlanma önleyici kimyasalların bazı özellikleri ve çevre üzerindeki korozif etkileri (Özcan vd. 2010).	14
Çizelge 2.2 Jeotermal enerjinin doğrudan kullanımında lider ülkeler (Lund ve Toth 2021).	21
Çizelge 2.3 2020-2015-2010 dönemine ait dünya çapında çeşitli doğrudan kullanım kategorileri (Lund ve Toth 2021).	22
Çizelge 3.1 Termal ve yapısal analiz için kullanılan değişkenler	34
Çizelge 3.2 Asfalt ve pe-x boru ile ilgili termal özellikler (Górszczyk ve Grzybowska 2011, Blomqvist vd. 2019).	35
Çizelge 3.3 Yapısal analizde kullanılan parametreler	37
Çizelge 3.4 Tabakalara ait katman kalınlıkları ve fiziksel özellikler (Liu vd. 2017). ...	38
Çizelge 3.5 Zamana bağlı yükleme miktarları ve süreleri.....	39
Çizelge 4.1 Korelasyonlar matrisi	52
Çizelge 4.2 Numune 1 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	53
Çizelge 4.3 Numune 1 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	53
Çizelge 4.4 Numune 1 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri	54
Çizelge 4.5 Numune 2 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	56
Çizelge 4.6 Numune 2 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	56
Çizelge 4.7 Numune 2 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri	57
Çizelge 4.8 Numune 3 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	59
Çizelge 4.9 Numune 3 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	59
Çizelge 4.10 Numune 3 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri	60
Çizelge 4.11 Numune 4 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	62
Çizelge 4.12 Numune 4 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	62
Çizelge 4.13 Numune 4 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri	63

Çizelge 4.14 4 Numune için en iyi çoklu lineer regresyon modellerinin eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri.....	65
Çizelge 4.15 4 Numune verileri ile ayrı ayrı oluşan en iyi lineer modellerin denklemleri	62
Çizelge 4.16 Geleneksel yöntemler ile hidronik ısıtma sistemlerinin fayda/maliyet kategorileri.....	66
Çizelge 4.17 Hidronik ısıtma sistem maliyeti	67

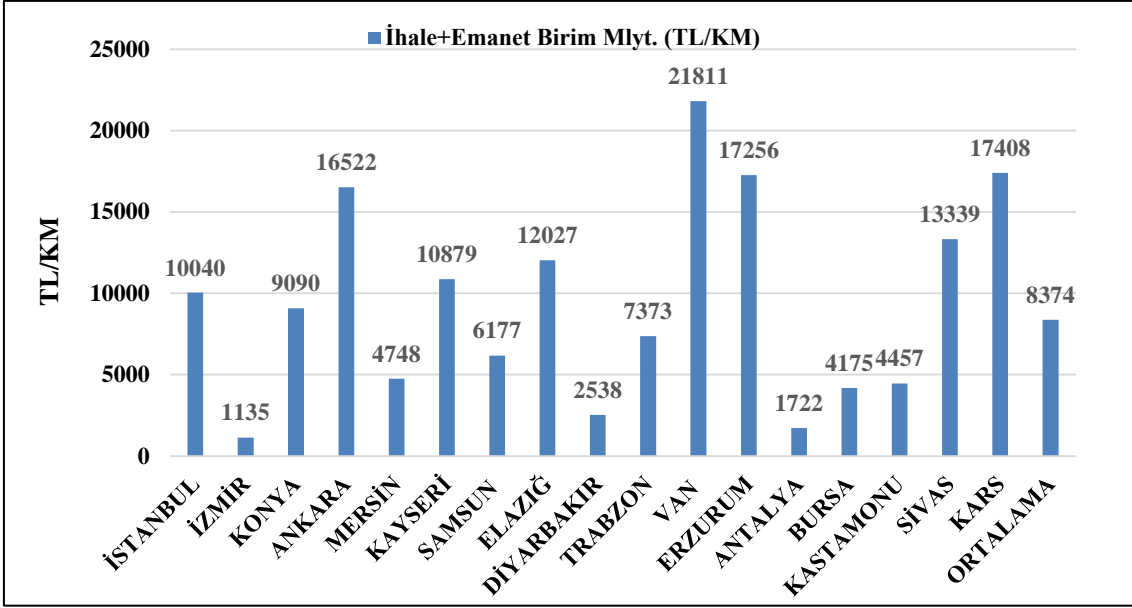
RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 1.1 Tuzun kestane ağacı yapraklarında oluşturduğu hasar (Eugster 2007).	2
Resim 2.1 Buzlanmanın neden olduğu trafik kazaları	9
Resim 2.2 Türkiye ilkbahar en geç don tarihleri (-1 °C) (İnt. Kyn. 9).....	10
Resim 2.3 Türkiye sonbahar en erken don tarihleri (-1 °C) (İnt. Kyn. 10).	10
Resim 2.4 Kar ve buz mücadelesinde kullanılan araçlar (a. V bıçağı b. Rötetatif c. Düz Bıçak).....	12
Resim 2.5 Snowfree® sistemi enkesiti ve uygulama sonrası yüzeydeki karın erimesi (Derwin vd. 2003).....	16
Resim 2.6 Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası (İnt. Kyn. 11). 23	23
Resim 3.1 Deney düzeneği planı.....	29
Resim 3.2 Asfalt numunelerin hazırlanması	30
Resim 3.3 Isıtma kaynağı olarak kullanılan kombi.....	30
Resim 3.4 Pe-x boru.....	31
Resim 3.5 Laboratuvar ortamında hazırlanmış olan deney düzeneği	31
Resim 3.6 Veri kaydedici ve termocupllar.....	32
Resim 3.7 Termocupl ile asfalt yüzey sıcaklıklarının alınması	32
Resim 3.8 Analizde kullanılan teker konfigürasyonu	38

1. GİRİŞ

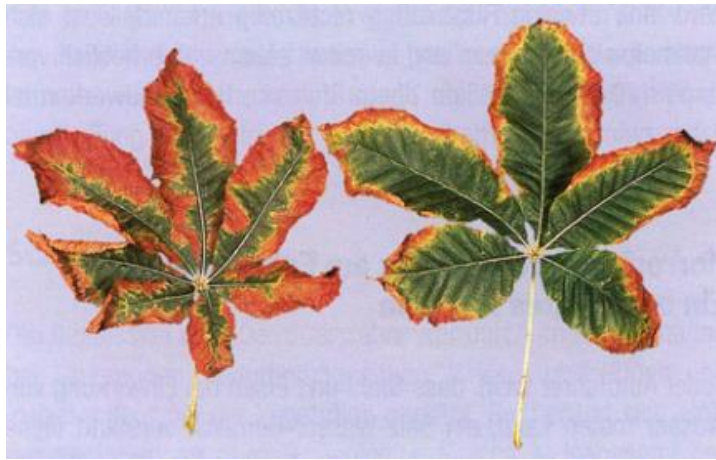
Karasal iklimin hüküm sürdüğü bölgelerdeki yollarda, köprülerde ve hava alanlarında kış aylarında meydana gelen buzlanmayı önlemek ve trafik güvenliğini sağlamak çözülmesi gereken sorunların başında gelmektedir. Özellikle köprü, rampa ve tünel gibi kritik yol kesimlerinde meydana gelen bu sorunlar zamanında çözülemediği takdirde maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır (Akbulut vd. 2018, Hossain 2014). Meydana gelen bu kayıplar bir çok ülkede sosyal ve ekonomik yük haline gelmiştir (Akbulut ve Woodside 2019). Ülkemizin coğrafi konumu itibari ile sahip olduğu yüzölçümünün büyük bir kısmında karasal iklimin hüküm sürdüğü söylenebilir. Dolayısıyla karasal iklimin beraberinde getirdiği hava koşulları, kış aylarında karayollarımızda kar ve buzlanmanın oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, yollardan beklenen hizmet düzeyinin sağlanması için meydana gelen bu olumsuzlukların en kısa zamanda çözülmesi ve güvenli bir trafik akışının sağlanması için gerekli kar ve buz kontrol çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

Ülkemizde kar ve buzla mücadelede halen geleneksel yöntemler kullanılmaktadır ve bu yöntemlerin beraberinde getirmiş olduğu bir çok problem bulunmaktadır. Geleneksel yöntemler olarak karayollarında kış aylarında kar ve buz mücadelesinde küreme, tuzlama ve kimyasal madde uygulanması yapılmaktadır. Bu yöntemlerde araç ve personel gereksinimine ihtiyaç duyulmakta ve bununla beraber malzeme, yakıt, işçi ve zaman kayıpları meydana gelmektedir. Küreme sonrasında meydana gelen yol yüzey bozulmaları, tuzlamanın araç, köprü donatıları ve işaret bilgi sistemlerinde yaratmış olduğu paslanmalar maddi açıdan külfet oluşturmaktadır. Karayolu kış bakım işlemleri için kimyasalların ve aşındırıcıların kullanımı oldukça yüksek bir hizmet seviyesi sağlamak için temel bir stratejidir; ancak bu tür malzemelerin performanslarının motorlu taşıtlar, ulaşım altyapısı ve doğal çevre üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri oldukça fazladır. Ayrıca tüm bu kar ve buz mücadelesi yöntemlerinin doğurduğu maddi külfet oldukça fazladır. 2018 yılı kar ve buzla mücadelesi için Karayolu Genel Müdürlüğü bölge şubelerindeki toplam maliyetler Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Bu verilere göre ülkemizde kar ve buz mücadelesi için yıllık kilometre başına ortalama 9393 TL'lik bir harcama yapılmaktadır.



Şekil 1.1 2018 yılı KGM bölge müdürlükleri kar mücadelesi birim maliyetleri (KGM 2020).






Kış aylarında karla mücadelede yaygın olarak tuz kullanılmaktadır. Fakat kullanılan tuzlar yol kenarındaki topraklara karışarak yol boyunca toprağa ve içme sularına sızmaktadır. Yollardaki aşırı tuz kullanımı içme sularındaki sodyum miktarını artırarak sağlık riskini yükseltebilmektedir. Ayrıca yapılan araştırmalar tuzların bitki örtüsüne zarar verdiğini ve bitki topluluklarının bileşenini değiştirdiğini göstermektedir. Dahası, klorür tuzlarının kullanımı, iyon değişim süreçleri yoluyla cıva ve diğer ağır metalleri göl çökeltilerinden veya topraktan serbest bırakabilir (Fay ve Shi 2012). Resim 1.1’de tuz kullanımı ile birlikte olumsuz etkilenen bir kestane ağacı yaprağı gösterilmiştir.



Resim 1.1 Tuzun kestane ağacı yapraklarında oluşturduğu hasar (Eugster 2007).

Amerika Birleşik Devletlerin’de buzlanmayı önlemek için yılda ortalama 15 milyon ton tuz kullanıldığı bilinmektedir (Wegner ve Yaggi 2001, İnt. Kyn. 6). Amerika Birleşik Devletlerin’de yapılan bir araştırmaya sonucuna göre, bir ton tuz kullanımı ile tuzun çevreye verdiği zararı gidermenin bedeli 800\$ olmaktadır. Tuz yerine alternatif yöntemlerle çevreye zarar vermeyen malzeme kullanımının, Amerika Birleşik Devletleri ekonomisine yılda yaklaşık 100 milyon dolar katkı sağlayacağı hesaplanmaktadır (Seferoğlu vd. 2015). Kanada çevre bakanlığının raporuna göre, Kanada kurumlarının çeşitli ulaşım tesislerinde kar ve buzu temizlemek için yılda 1 milyar doların üzerinde para harcadığı bildirilmiştir. Bu buz çözme ve buzlanmayı önleme işlemleri 5 milyon tondan fazla tuz kullanımını içermektedir (Houssain 2014). Almanya’da ise tuz kullanımından kaynaklanan yıllık yük ve zararların yaklaşık olarak 450 milyon Euro olduğu tahmin edilmektedir (Eugster 2007). Tuz aynı zamanda köprülerin ve araçların korozyona uğramasına sebep olan ve bakım maliyetlerini milyarlarca dolar artıran önemli bir faktördür (Houssain 2014, Fay vd. 2008) Şekil 1.2’de buzlanma ile mücadelede kullanılan farklı tuzlara ait içerikler ve maliyetler gösterilmiştir.

Maliyetler ve diğer olumsuzluklar da göz önüne alındığı zaman kar ve buzla mücadelede geleneksel yöntemlerin yerine modern yöntemlerin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Modern kar ve buz ile mücadele yöntemleri otomatik solüsyon püskürtme, iletken asfalt betonu ve elektrik kabloları kullanılarak alttan ısıtma, hidronik ısıtma sistemleri olarak dört başlıkta incelenmektedir. Hidronik ısıtma sistemleri, kaplama tabakasına gömülü borulardan oluşur ve bu borulardan ısıtılmış sıvının sirküle edilmesi prensibi ile çalışır. Bu sistem için kullanılacak sıvının ısıtılması için kazanlar, elektrikli ısıtıcı, yeraltı suyu ve toprak kaynaklı ısı pompası gibi bir takım ısı kaynakları kullanılabilir (Liu ve Spitler 2003). Sistem içerisinde dolaşan sıvı tuz ve sudan oluşan bir çözelti, yağ veya glikol suyu gibi bir sıvıdır (ASHRAE 2003). Hidronik ısıtma sistemleri aynı zamanda jeotermal ısıtma sistemleri olarak da anılmaktadır. Bu sistemlerin içerisinde ısı borulu sistemler, direkt jeotermal sulu sistemler ya da yeraltı termal enerji depolama sistemleri kullanılarak kar ve buzlanmanın önlenmesi sağlanabilmektedir.

Tuz Adı	Bileşimi	Maliyet (TL/ton)	Fiziksel Görünüm
Kaya Tuzu (Tuz/Yol Tuzu)	NaCl	696	
Mavi Tuz	NaCl (MgCl ile işleme tabi tutulmuş -oran bilinmiyor-)	870	
Dilimleyici	78% NaCl 9.4% MgCl ₂ 2-3% özel malzemeler (proprietary ingredients)	3114	
Yeşil Tuz	GEN3 buz çözme sıvısı ile işlenmiş (Oran bilinmiyor)	8264	
Jet Mavisi	NaCl Özel Poliöl ile işlenmiş (oran bilinmiyor)	4306	

Şekil 1.2 Buzla mücadelede kullanılan tuzların kimyasal içerik ve maliyetleri (Houssain 2014).

Ülkemiz jeotermal kaynaklar bakımından oldukça zengin bir ülke olmasına rağmen, bu kaynaklardan malesef ki karayollarımız istifade edememektedir. Bu kapsamda jeotermal kaynaklar kullanılarak kritik yol kesimleri, rampa iniş ve çıkışları, tünel giriş ve çıkışları gibi önemli karayolu kesimlerinde hidronik ısıtma sistemleri kullanılarak hem ekonomik hemde çevreci bir yöntemle kar ve buz mücadelesi sağlanabilir. Modern kar ve buz mücadelesinde kullanılan çeşitli yöntemlerin maliyetlerinin karşılaştırılması Çizelge 1.1’de görülmektedir.

Çizelge 1.1 Çeşitli ısıtma sistemleri için maliyet tahminleri (Pan vd. 2015, Zhang 2009, Spitler ve Ramamoorthy 2000).

Isıtma Türü	Yaklaşık Maliyet	Güç Tüketimi	İşletme Maliyeti
Kızılötesi Isıtma Lambaları	835 TL/m ²	75W/m ²	-
Elektrikli Isıtma Kabloları	470 TL/m ²	323-430W/m ²	42 TL/m ²
Sıcak Su	1400 TL/m ²	473W/m ²	2175 TL/Fırtına
Sıcak Gaz	3288 TL/m ²	-	18 TL/m ²
İletken Beton Kaplama	418 TL/m ²	516W/m ²	47 TL/m ²

Kar ve buzlanma ile mücadelede kullanılan geleneksel yöntemlere alternatif olan modern yöntemlerin kurulum maliyeti ve işletme maliyetlerinin yüksek olduğu söylenebilmektedir. Modern yöntemlerden olan hidronik ısıtma sistemlerinin de yüksek maliyetli olduğu bilinmektedir. Fakat hidronik ısıtma sistemlerinde, maliyetlerin önemli bir kısmını, ısıtma kaynağının sağlanması için yapılan harcamalar oluşturmaktadır. Dolayısıyla ısıtma kaynağının var olan kaynaklar kullanılarak temin edilmesi, yapılacak harcamaların önemli miktarda azalmasını sağlayabilir. Aynı zamanda var olan enerjinin kullanılması ile birlikte, sistemin çalıştırılması için gerekli ek bir güç tüketimine ihtiyaç kalmadan kar ve buzlanma ile mücadele edilebilecektir. Böylelikle var olan kaynakların verimli bir şekilde kullanımı sağlanarak, ülke ekonomilerine ciddi katkılar sağlanabilir. Ülkemiz için de jeotermal kaynakların zenginliği bilinmekte ve bu kaynakların birçok farklı yönlerde kullanımı bulunmaktadır. Fakat henüz ülkemiz için kar ve buzlanma mücadelesinde kullanılabilirliği bulunmamaktadır. Kullanılmış atık jeotermal kaynakların tekrar kullanılabilirdiği durumlar söz konusudur. Dolayısıyla atık olan jeotermal kaynakların kar ve buzlanma ile mücadelede kullanımının, maliyetlerin düşürülmesi bakımından ciddi bir katkı sağlayacağı düşünülmekle beraber ülke ekonomisi adına olumlu bir etkisinin olacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Karayolu Üstyapısı ve Ulaştırma

Bir yol üstyapısı esnek ve rijit kaplamalı üstyapılar olmak üzere iki farklı tür altında incelenir. Esnek üstyapılar olarak adlandırılan yol üstyapılarında kullanılan bağlayıcı malzeme bitüm iken, rijit üstyapılarda kullanılan bağlayıcı malzeme çimento olmaktadır. Esnek yol üstyapısı alt temel, temel ve kaplama tabakasından oluşan tabakalı bir yapıdır. Şekil 2.1’de tipik bir esnek yol üst yapısı gösterilmiştir.



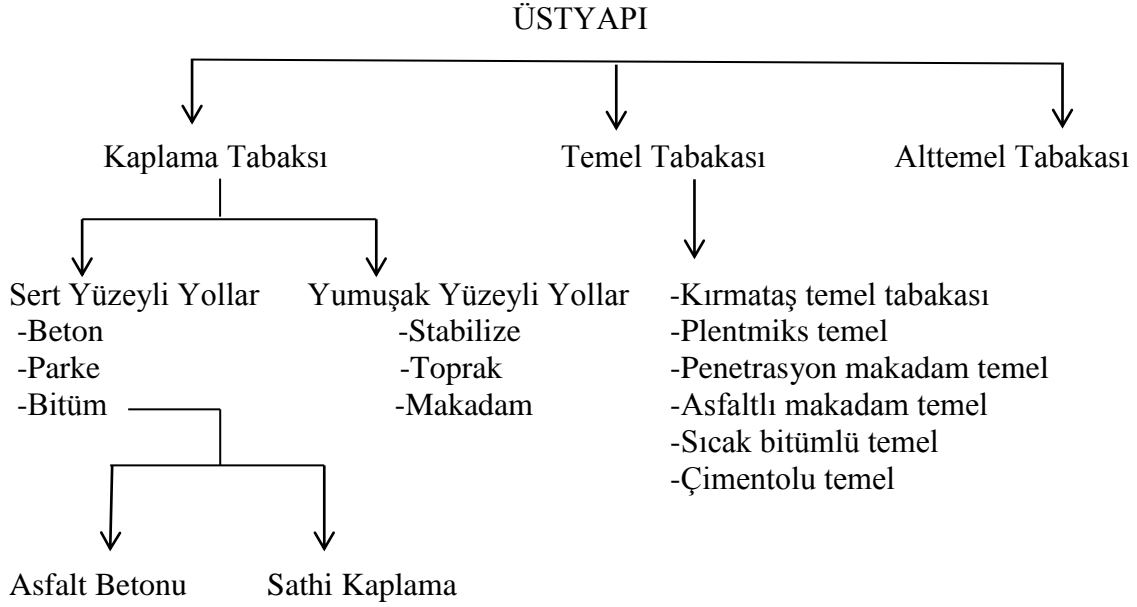
Şekil 2.1 Tipik bir esnek yol enkesiti.

Karayolu üstyapısı, hem yapısal hemde fonksiyonel talepleri karşılamak, konforlu ve güvenli bir seyahat için, altyapı ile araç tekerlerinin yüzeye değdiği alan arasında düzgün bir yüzey oluşturmak üzere inşa edilir. Üstyapının görevleri şunlardır (Orhan 2006, Yıldız 2003, Şiş 2000):

- Trafik yüklerinden meydana gelen gerilmeleri alt tabakalara aktarmak ve taban zeminine fazla yük gelmesini engellemek
- Düzgün ve konforlu bir sürüş yüzeyi oluşturmak
- Yol gövdesini çevrenin olumsuz etkilerine karşı korumak

Yol üstyapısını oluşturan tabakalar ve bu tabakaların çeşitleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir

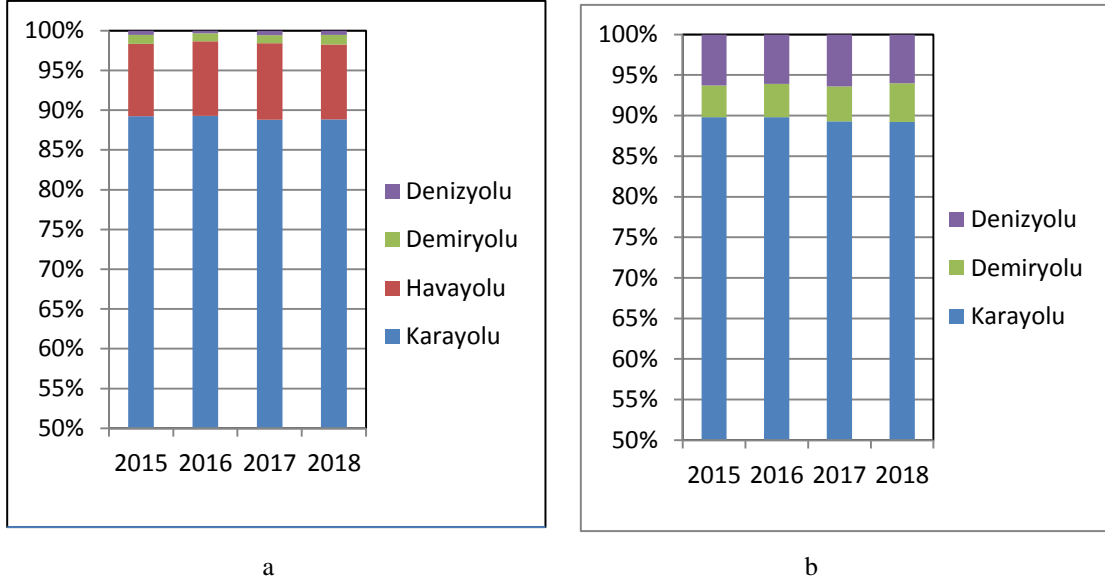
(Croney ve Croney 1991). Üstyapıyı oluşturan tabakalar farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerden yapılır. Genellikle temel tabakaları için granüler malzemeler, kaplama tabakaları için ise asfalt bağlayıcılı malzemeler tercih edilir.



Şekil 2.2 Üstyapı tabaka çeşitleri.

İnsanların ve eşyaların belirli bir amaca yönelik faydalı sayılan yer değiştirmelerine ulaşım ve bu yer değiştirmenin sağlanmasına da ulaştırma denilmektedir (Yayla 2002). Ulaştırma; kara, su, hava ve boru ulaştırması olarak 4 ana başlıkta incelenmektedir. Ülkemizde ulaştırma sistemlerinden en çok kara ulaştırması içerisindeki, karayolları kullanılmakta olup Türkiye İstatistik Kurumundan alınan bilgiye göre ulaştırma sistemlerinin yolcu ve yük taşımacılığındaki oranları Şekil 2.3’de verilmektedir (İnt. Kyn. 1).

Karayolu taşımacılığı hem yük hem yolcu taşıma oranları üzerinden bakıldığında diğer taşıma türlerine oranla açık ara önde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu denli yüksek oranlarda kullanılan karayollarımızda birçok problemle karşılaşmaktadır. Bu problemlerin en önemlilerinden biri de kar ve buz mücadelesidir. Ülkemizin büyük bir kısmında karasal iklimin görüldüğü söylenebilir, bu durumda kış aylarında karayollarında, kar ve buz mücadelesi büyük bir sorun teşkil etmekte ve belediyeler, karayolları bölge müdürlükleri kış bakımı için yüksek külfetlerle karşılaşmaktadırlar.



Şekil 2.3 Ulaştırma türlerine göre yolcu (a) ve yük (b) taşımacılığı oranları (İnt. Kyn. 1).

2.2 Karayollarındaki Buzlanma Koşulları

Karayolu platformu üzerinde buzlanmanın oluşması için kaplama yüzeyinin donma sıcaklığı olan 0 °C'nin altına düşmesi ve bununla birlikte yüzeyde nem olması gerekmektedir. Don, soğuk bir yol yüzeyinden geçen sis, yeraltı suyu sızıntısının veya erimiş karın donması ve yağışla birlikte ayaz olması sonucu buzlanma olayı meydana gelmektedir (Gustafson 1983, İnt. Kyn. 4). Ayrıca kar yüksekliği 5 cm'ye ulaştığında, kar kontrol çalışmasıyla karın yol yüzeyinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Eğer gereken kar kontrolü sağlanamazsa birikmiş kar, trafik yükleri altında sıkışarak buz tabakası haline dönüşebilir ve bunun sonucu olarak ciddi trafik kazalarına sebebiyet verebilir.

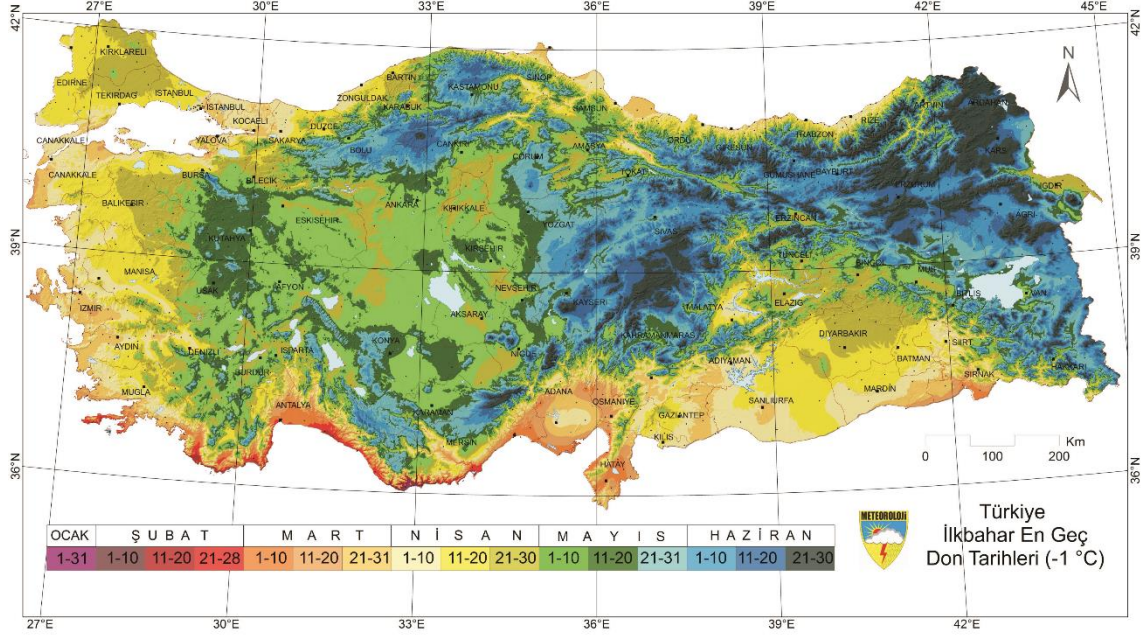
Ek olarak köprüler ve viyadükler konumları gereği yerküreden bağımsız şekilde inşaa edilmelerinden ötürü, maruz kaldıkları atmosfer koşullarına bağlı olarak diğer karayolu elemanlarına göre çok daha hızlı bir buzlanma etkisinde kalmaktadırlar. Bu nedenle hızlı bir şekilde buzlanmaya maruz kalan köprü ve viyadükler normal yollarda kaplama yüzeyi henüz buzlanmadan, kar ve buzun etkisinde kalabilir ve bu farklı yol koşulları çok kritiktir ve maddi, mavevi kayıplara neden olabilecek ağır trafik kazalarını meydana getirebilir (Eugster 2007).

Karayollarında oluşan buzlanma araç tekerleri ile yol yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısını düşürerek trafik kazalarının meydana gelmesine neden olmaktadır. Resim 2.1’de buzlanma sonucu meydana gelen trafik kazaları gösterilmiştir. Buzlanmaya maruz kalan yol yüzeyinde kayma-sürtünme katsayıları önemli miktarlarda azalarak trafik güvenliğini olumsuz yönde tehdit etmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda sürtünme direncindeki azalma, trafik kaza miktarını artırmaktadır (TNZ 2005). Kaplama yüzeyinin kayma direnci değeri %35’ten %48’e çıktığında, trafik kaza oranlarında %60 bir azalma meydana gelmektedir (Xiao vd. 2000).

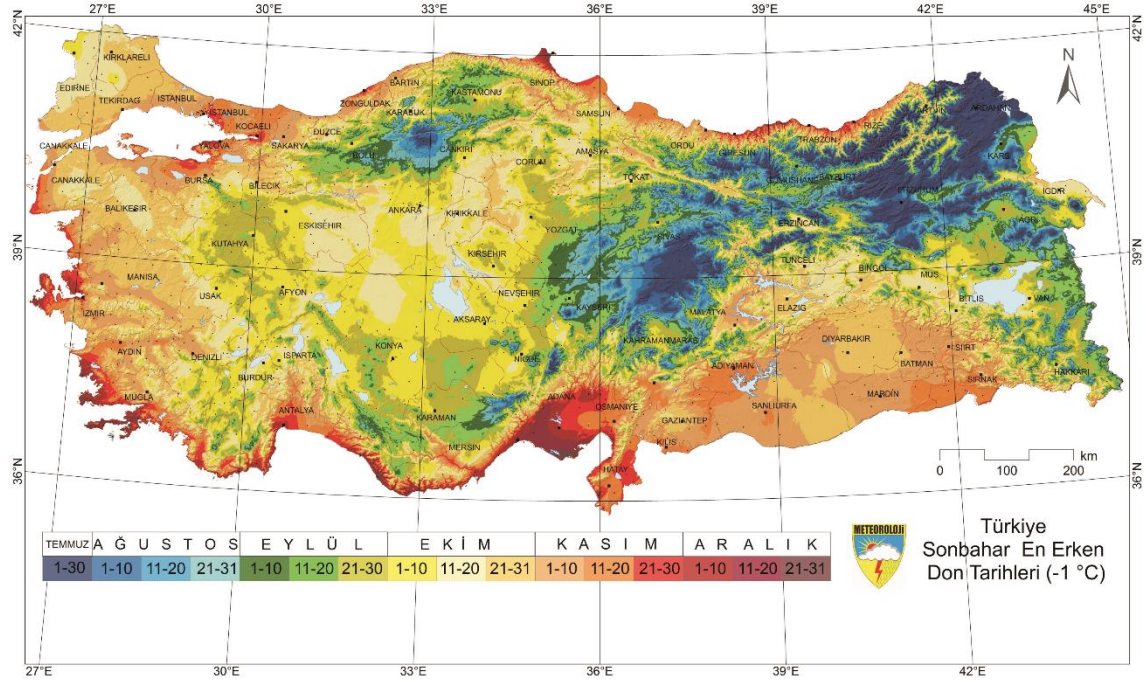


Resim 2.1 Buzlanmanın neden olduğu trafik kazaları (İnt. Kyn. 12, İnt. Kyn. 13).

Meteorolojiden alınan Türkiye don takvimine bakıldığında bölgelerimizin büyük bir kısmında ilkbahar aylarında bile hava sıcaklığının 0 °C’nin altına düştüğü görülmektedir. Resim 2.2’de Türkiye ilkbahar en geç don tarihleri haritası gösterilmektedir. İlkbahar en geç don tarihlerine bakıldığında ülkemizin büyük bir çoğunluğunda hava sıcaklıklarının 0 °C’nin altına düştüğü görülmektedir. Resim 2.3’de ise Türkiye sonbahar en erken don tarihleri gösterilmektedir. Sonbahar en erken don tarihlerine bakıldığında ise, bölgelerin önemli bir kısmında sonbahar aylarında hava sıcaklıklarının 0 °C’nin altına düştüğü görülmektedir. Türkiye don haritaları incelendiğinde ilkbahar ve sonbahar aylarında bile hava sıcaklıklarının 0 °C’nin altına düştüğü bölgeler bulunmaktadır. Dolayısıyla kış aylarında ülkemizin büyük bir çoğunluğunda hava sıcaklıklarının 0 °C’nin altına düştüğü söylenebilmektedir. Bu sebeple ülkemizin büyük bir çoğunluğunda kış aylarında kar ve buzlanma ile mücadele büyük önem arz etmektedir.



Resim 2.2 Türkiye ilkbahar en geç don tarihleri (-1 °C) (İnt. Kyn. 9).



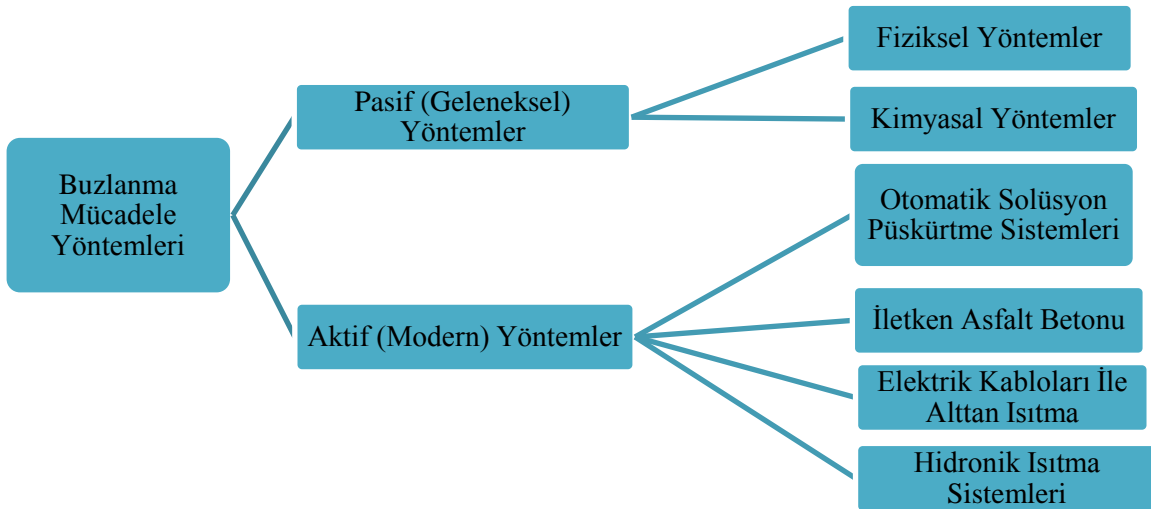
Resim 2.3 Türkiye sonbahar en erken don tarihleri (-1 °C) (İnt. Kyn. 10).

Tüm bunlar gözönüne alındığında hava sıcaklığının 0 °C'nin altına düştüğü kış aylarında buzlanma oluşan kesimlerin daha dikkatli bir şekilde kontrolünün sağlanması ve gerekli tedbirlerin alınması trafik seyir güvenliği bakımından büyük önem arz

etmektedir. Buzlanma ile mücadelede öncelikli olarak rampalar, keskin kurplar, kavşaklar, köprü, viyadük ve demiryolu geçitleri gibi kritik yol kesimlerinde planlanmalıdır. Devamında trafik yoğunluğu fazla olan kesimler dikkate alınarak bu hizmet trafik güvenliğinin sağlanması gereken tüm yollara götürülmeye çalışılmalıdır (Anonim 1998).

2.3 Kar ve Buzlanma ile Mücadele Yöntemleri

Kar ve buz mücadelesinde kullanılan yöntemler iki başlık altında incelenmektedir. Bunlar aktif ve pasif yöntemlerdir. Pasif yöntemler kar ve buzlanma oluşuktan sonra, kar ve buzun kaldırılması prensibine dayanmaktadır. Bir diğer adıyla buna de-icing denilmektedir. Aktif yöntemler ise kar-buz oluşumuna mahal vermeden uygulanan sistemlerdir. Bunların diğer adı ise anti-icing olarak anılmaktadır (Yu vd. 2014). Şekil 2.4’de buzlanma ile mücadele yöntemleri gösterilmiştir.



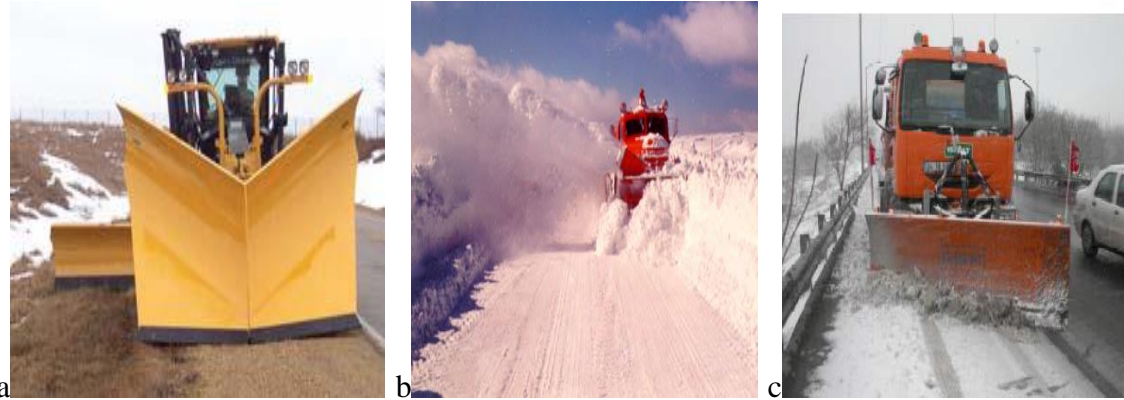
Şekil 2.4 Kar ve buzla mücadele yöntemleri.

2.3.1 Pasif Yöntemler

Pasif yöntemler fiziksel ve kimyasal yöntemler olarak iki başlık altında incelenmektedir. Fiziksel yöntemler daha çok makine, teçhizat ve iş gücü kullanılarak uygulanan yöntemlerdendir, kimyasal yöntemler ise kar ve buz mücadelesinde yollara kimyasal maddeler uygulanarak kullanılan sistemlerdendir.

2.3.1.1 Fiziksel Yöntemler

Kar kontrolünün sağlanmasında makine, ekipman ve iş gücü kullanılmaktadır. Bunlar kar yağışı yoğunluğuna göre kullanım gerektirmektedir. Kar kalınlığının 5 cm'yi geçtiği durumlarda, düz kar bıçağı takılmış kamyonlar 50km/h hız yaparak karın asfalt yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlarlar. Bu makinalarla ancak 20 cm kar kalınlığına kadar işlem yapılabilir. 20 cm ile 50 cm'yi bulan kar kalınlıklarında ilk olarak V bıçaklar ile kapalı kesimler açılır daha sonra düz bıçaklar ile son temizlik işlemi tamamlanır. Kar kalınlığının 1 m'ye ulaştığı yerlerde ise daha güçlü kamyonlara takılan V bıçaklar ile kar yarılar aynı zamanda kamyonunda bulunan yan bıçaklar yarılan kısımları genişleterek sonrasında ince kar temizliği düz bıçaklarla tamamlanır. Kar kalınlığının 50 cm'i aştığı durumlarda ise yolun rotatifler aracılığı ile açılması gerekmektedir (Ağar ve Kutluhan 2005). Resim 2.4'de buzlanma ile mücadelede kullanılan araçlara ait resimler gösterilmektedir.



Resim 2.4 Kar ve buz mücadelesinde kullanılan araçlar (a. V bıçağı b. Rötetatif c. Düz Bıçak).

Kar yağışı ve sonrasında oluşan kar ve buz birikintilerinin temizlenmesi prensibine dayanan bu yöntemde greyder, skreyper, ekskavatör gibi iş makineleri kullanılmaktadır. Yol üstyapısından kar temizlendikten sonra kar birikintilerinin yükleme boşaltma gibi işlemleri için yoğun olarak yakıt, personel ve ekipman giderleri oluşmaktadır. Fiziksel yöntemler için kullanılan ekipmanlar fiziksel olarak yol üstyapısında hasarlar meydana getirmektedir. Sathi kaplamalı yol üstyapılarında agrega kayıpları meydana gelmekte, aynı zamanda agrega kayıplarına bağlı yüzey deformasyonları oluşmaktadır. Diğer üstyapı türlerinde de benzer şekilde yüzey bütünlüğünün bozulması sonucu buna bağlı farklı deformasyonlar oluşmaktadır. Kar küreme işlemleri sırasında işaret bilgi levhaları, kaldırımlar vb. içinde hasarlar meydana gelmektedir (Gürer vd. 2015).

2.3.1.2 Kimyasal Yöntemler

Yoğun kış şartlarında yol üstyapısında meydana gelen kar ve buzlanmanın önlenmesi yada ortadan kaldırılması için Dünya’da ve ülkemizde en yaygın kullanılan yöntem bilindiği üzere kaplama üzerine kimyasal madde uygulanmasıdır (Allison ve Bernard 2004, Kuloğlu ve Kök 2005). Buzlanmanın Bu kimyasallar buz çözücü (de-icing), buzlanmayı önleyici (anti-icing) ve aşındırıcılar olmak üzere üç grupta incelenebilir (Fay ve Shi 2012, Varış 2007). Buz çözücüler; yol yüzeyinde 2,5 cm ve daha fazla kar ve buz birikintisinden sonra uygulanır. Fakat bu şekilde kar buz oluşumundan sonra müdahale edildiği için daha fazla kimyasal madde uygulanmasını gerektirmekte ve buzlanma önleyicilere göre daha az güven vermektedir. Buzlanma önleyiciler; kar yağışının başlamasından önce yol yüzeyine tatbik edilmeleri gerekir. Bu kimyasallar suyun donma derecesini $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar düşürebilmektedir. Ve bu sayede kullanılan kimyasallar donma noktasını düşürerek kaplama ile kar ve buz arasında bağ oluşunu engeller (Özdemir 2011). Fakat yağış devam ederken uygulanmaya devam edilmesi etkinliğin devamı için gereklidir. Aşındırıcılar; kaplama yüzeyi buzlandığı anda yüzey pürüzlülüğünü sağlayarak tekerlek ile yüzey arasındaki sürtünme direncini artırmaktadır. Aşındırıcılar buzlu aşındırarak kimyasal maddenin nüfuz etmesini kolaylaştırır (Varış 2007, Açar ve Kutluhan 2005).

Kullanılan kimyasal maddelerin kar ve buz mücadelesinde kullanımı yetersiz kalmakla beraber birçok olumsuzluğu da beraberinde getirmektedir. Buzlanma önleyici tuzların trafik işaret ve bilgi sistemlerinde korozyon hasarları meydana getirdiği ve bazı durumlarda tuzlarla birlikte aşındırıcı kumların da kullanılmasıyla beraber drenaj sistemlerine zarar vermektedir (Gürer ve Düşmez 2015). Tuz, kaplamada (inşaat demiri, beton, asfalt) güçlü korozif etkilere neden olabilir ve genellikle 10-15 yılda köprü yapılarına zarar verir ve bu da yollarda ve köprülerde güvenlik tehdidi meydana getirir (Yu vd. 2014). Yine kullanılan bu malzemelerin sonrasında yol yüzeyinden temizlenememeleri de ayrıca bir sorun oluşturmaktadır. Kar ve buz mücadelesinde kullanılan bazı kimyasal maddelerin özellikleri, etken olduğu sıcaklıklar ve çevreye verdikleri zararlar Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 Kar ve buzlanma önleyici kimyasalların bazı özellikleri ve çevre üzerindeki korozif etkileri (Özcan vd. 2010).

Kimyasal Madde	Özellikleri	Etken Olduğu Yaklaşık Sıcaklık (°C)	Çevreye Olan Korozif Etkileri
Sodyum Klorür (NaCl)	Kaya, göl ve deniz tuzu olarak yaygın olarak bulunması kolaydır. Diğer tuzlara göre maliyet olarak daha uygundur. Diğer kimyasal maddelere göre eridiği zaman çevreye zarar verdiği için, en düşük sıcaklıklarda buz çözmede en iyi çalışan maddelerden biridir. Soda sanayinde yan ürün olarak elde edilir.	-8	Ekolojik çevreyi etkiler. Toprağa ve suya geçerek alkaliliğini artırır. Klorür içerdiği için, korozyon açısından metal yüzeylere ve betona zarar verir.
Kalsiyum Klorür, (CaCl ₂)	Kimyasal bir madde olan magnezyum klorürün buz çözme özelliği vardır.	-20	Ekolojik çevreyi etkiler. Klorür içerdiği için korozyon açısından, metal yüzeylere ve betona zarar verir. Uygulandıktan sonra yol yüzeyinde temizlenmesi zor ve kaygan bir kalıntı bırakırlar.
Magnezyum Klorür (MgCl ₂)	Kimyasal bir madde olan potasyum klorürün buz çözme özelliği vardır.	-15	Ekolojik çevreyi etkiler. Klorür içerdiği için korozyon açısından, metal yüzeylere ve betona zarar verir. Uygulandıktan sonra yol yüzeyinde temizlenmesi zor ve kaygan bir kalıntı bırakırlar.
Potasyum Klorür (KCl)	Gübre olarak kullanılan ürenin buz çözme özelliği vardır.	-7	Ekolojik çevreyi etkiler. Toprağa ve suya geçerek alkaliliğini artırır. Klorür içerdiği için, korozyon açısından metal yüzeylere ve betona zarar verir.
Üre CO (NH ₂) ₂	Düşük sıcaklıklarda buz çözme özelliği, metal, betona ve çevreye, düşük korozif etkisi sebebiyle son zamanlarda kullanılan kimyasal bir maddedir.	-7	Düşük sıcaklıklarda iyi sonuç vermez. Klorür içeren diğer yol tuzlarına göre, metallere ve betona korozif etkisi yoktur. Bu nedenle köprüler, viyadük ve havaalanlarında kullanılır. Fakat çevre açısından yol kenarındaki bitkilerin aşırı büyümesine neden olur ve canlılar için zararlı olan NH ⁺ ₄ iyonunu oluşturur.
Kalsiyum Magnezyum Asetat (CMA)	Düşük sıcaklıklarda buz çözme özelliği, metal, betona ve çevreye, düşük korozif etkisi sebebiyle son zamanlarda kullanılan kimyasal bir maddedir.	-20	Klorür içermediği için diğer tuzlara göre metallere, betona ve ekolojik çevreye zararlı bir korozif etkisi etkisi yoktur. Diğer tuzlara göre maliyeti yüksektir.
Potasyum Asetat (KCO ₂ H)	Düşük sıcaklıklarda buz çözme özelliği, metal, betona ve çevreye, düşük korozif etkisi sebebiyle son zamanlarda kullanılan kimyasal bir maddedir.	-20	Klorür içermediği için diğer tuzlara göre metallere, betona ve ekolojik çevreye zararlı bir korozif etkisi etkisi yoktur.

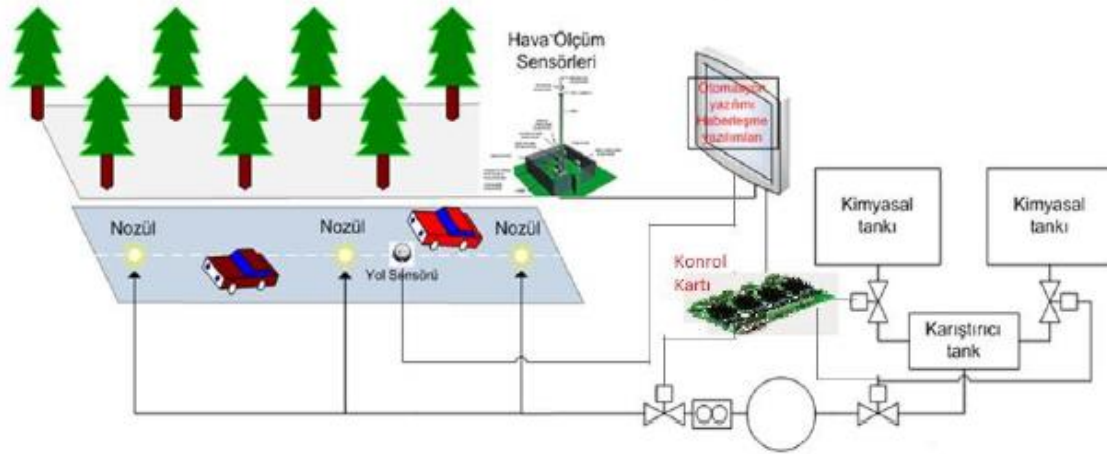
2.3.2. Aktif Yöntemler

Aktif yöntemler kar ve buz oluşumuna mahal vermeden kurulan sistemelerdir. Bu

sistemler için farklı kaynaklar kullanılmaktadır. Aktif yöntemler dört ayrı başlıkta anlatılabilir.

2.3.2.1 Otomatik Solüsyon Püskürtme Sistemleri

Otomatik solüsyon püskürtme sistemlerinin temel prensibi, yol üzerine yerleştirilmiş sprej ağızlıklar sayesinde, yol ve hava verilerinin sensörler aracılığı ile alınıp, yola kimyasal malzemenin püskürtülmesiyle beraber buz ile yol yüzeyi arasında bir tabaka oluşturarak buzun yola yapışmasını engellemektir (İnt. Kyn. 2, Kılıç 2015). Şekil 2.5’de buzlanma önleyici otomatik püskürtme sistemine ait şema gösterilmektedir.



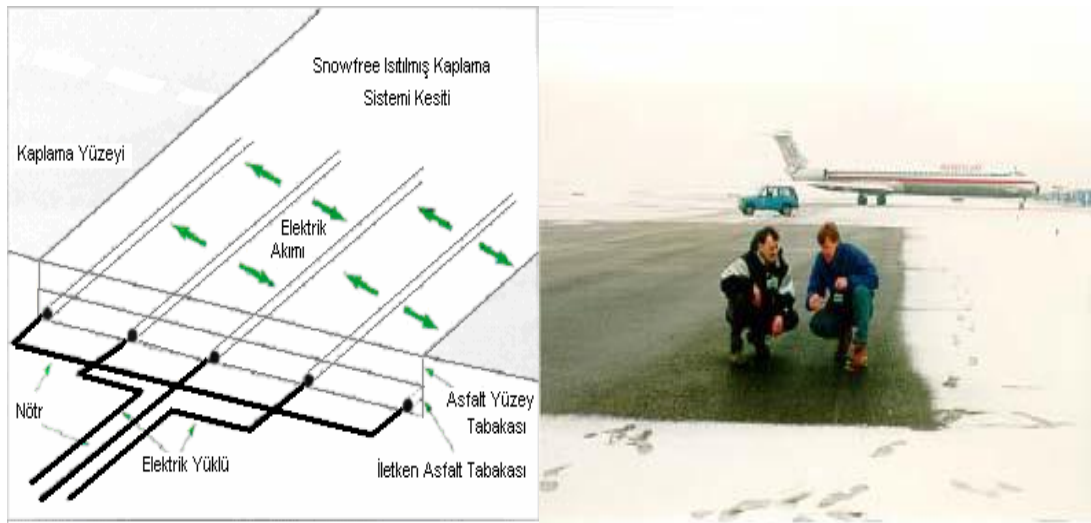
Şekil 2.5 Buzlanma önleyici otomatik püskürtme sistem şeması (Kılıç 2015).

Buzlanma önleyici otomatik püskürtme sistemleri; depolama tankı, elektrikli pompalama sistemi, yol ve hava verilerini alabilen sensörler, sürücü uyarı işaretleri ve bir kontrol bilgisayarından oluşmaktadır (İnt. Kyn. 2, İnt. Kyn. 3, Gürer vd 2015). Minnesota Ulaştırma Departmanı tarafından 1999 yılında Minneapolis şehir merkezi civarındaki Interstate 35 yolu üzerindeki 594 metre uzunluğunda ve 8 şeritli köprü üzerine otomatik bir buzlanmayı engelleyici sistem kullanılmıştır. Buzlanma önleyici otomatik püskürtme sisteminin uygulanmasından bir yıl sonra kış mevsiminde meydana gelen kazalar %68 oranında azalmıştır. Fayda/maliyet oranı 3,40 olarak belirlenmiştir (İnt. Kyn. 3). Ülkemizde de Bolu Dağı Tüneli'nin giriş ve çıkışları ile 2. 3. ve 4. viyadükler üzerinde buzlanmayı önleyici solüsyon püskürtme sistemleri kullanılarak güzergâh ta kar ve buzlanma nedeniyle meydana gelebilecek trafik kazalarının önlenmesi sağlanmaktadır (İnt. Kyn. 7).

2.3.2.2 İletken Asfalt Betonu

İletken asfalt betonunun temel prensibi; asfalt karışımına elektrik iletkenliğini artıracak malzemeler ilave edilerek, sağlanan elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesi ve bu ısı sayesinde kaplama yüzeyindeki kar ve buzun eritilmesidir (Derwin vd. 2003). İletken asfalt betonu için asfalt içersine karıştırılan iletken malzemeler ile asfaltı meydana getiren malzemelerin benzerlik göstermeleri ve üstyapı performansına sınırlı etkilerinden kaynaklı bu sistem buzlanma ile mücadelede kullanılacak yöntemlerdendir (Minsk ve Hanover 1971, Gürer ve Düşmez 2015). İletken asfalt betonu sisteminin kullanılabilmesi için bir güç kaynağı, hava şartlarını ölçebilen sensörler, iletken kablolar ve kontrol izleme ünitesi gerekmektedir (Minks 1968). İletken asfalt betonu, asfaltın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden kar ve buz oluşumunu engelleyebilmektedir (Gürer ve Düşmez 2019).

Superior Graphite Şirketi ile Amerikan Federal Havacılık İdaresi (FAA), Flood Test Laboratuvarları'yla ortak bir çalışmayla Resim 2.5'de gösterilen Snowfree® Sistemi'ni geliştirmişlerdir. Grafit, asfalt ve elektrik kullanılan Snowfree® (elektrik iletkenli asfalt kaplama sistemi) özgün bir kaplama sistemi olup Snowfree® Sistemi, karlı ve buzlu pistlerin aşırı derecede probleme neden olduğu Amerika'daki O'Hare Uluslararası Havaalanında bir taksiyoluna uygulanarak FAA tarafından test edilmiştir (Derwin vd 2003).



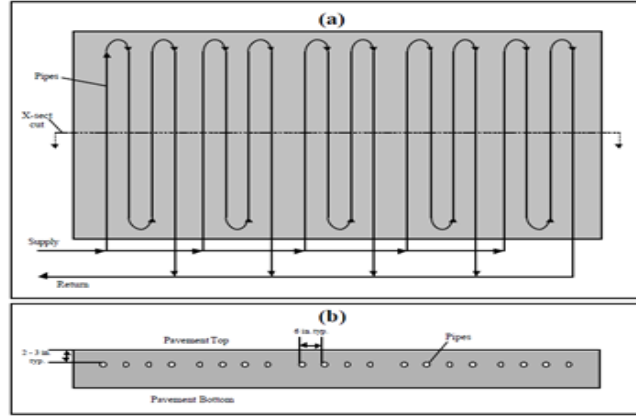
Resim 2.5 Snowfree® sistemi enkesiti ve uygulama sonrası yüzeydeki karın erimesi (Derwin vd. 2003).

2.3.2.3. Elektrik Kabloları Kullanılarak Alttan Isıtma

Elektrik kablolarının üstyapı altına yerleştirilmesi ile kar ve buz oluşumunun engellenmesi sağlanabilir (Sugawara 1998). Bu sistemin patenti 1996 yılında Japon Kunio Tanaka tarafından bileşik devletler patent enstitüsü aracılığıyla tescillenmiştir. Kaplama tabakası altına yerleştirilen elektrik kabloları sayesinde kaplama yüzeyini ısıtılması ile buzlanmanın önlenmesi sağlanabilir. Isıtma kabloları genellikle tekerlek izi hattı boyunca birkaç tane paralel şekilde döşenmektedir. Bu sistemlerde de sensörlerden faydalanılarak kaplama yüzeyi ısıtılmaktadır. Oregon ulaştırma departmanı tarafından yönetilen Ladd Canyon ısıtma projesinde bu sistem kurulmuştur ve yaklaşık 1,6 km bir yolda test edilmektedir (Zhang ve Das 2009).

2.3.2.4. Hidronik Isıtma Sistemleri

Jeotermal kaynaklar kullanılarak kar ve buz eritme sistemleri hidronik buz eritme sistemleri içerisinde yer almaktadır. Hidronik ısıtma sistemleri, kaplama tabakasında biriken kar ve buz eritmek için kaplama tabakası altına yerleştirilen bir boru şebekesinden ısıtılmış bir sıvıyı sirküle eder ve bu sıvı tuz ve sudan oluşan bir çözelti veya yağ ve glikol suyu gibi sıvıdır (ASHRAE 2003). Boru şebekesi genellikle kıvrımlı bir konfigürasyonda döşenen sistemlerden oluşur. Boru malzemesi genellikle çapraz bağlı veya yüksek yoğunluklu polietilendir. Tipik boru aralığı 150 ila 300 mm arasında, derinliği ise 50 ila 75 mm arasında değişir. Nominal boru çapları genellikle 18 ila 25 mm arasındadır. Hidronik ısıtma sistemlerinde ısı taşıyıcı akışkanlar olarak tuzlu su, yağlar ve glikol suyu gibi çeşitli sıvılar uygundur. Donma koruması çok önemlidir, çünkü çoğu sistem donma sıcaklığındaki hava şartlarında aralıklı olarak çalıştırılacaktır. Hidronik ısıtma sistemleri için kullanılacak ısı kaynağı önemli bir seçimdir (Ho vd. 2019). Bu tür sistemler için kazanlar, elektrikli ısıtıcı, yeraltı suyu ve toprak kaynaklı ısı pompası gibi bir takım ısı kaynakları kullanılabilir (Liu ve Spitler 2003, Anand vd. 2017). Sıcak suyu iletmek için kullanılan boru malzemeleri metal veya plastiktir. Çelik, demir ve bakır borular geçmişte yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak kolayca paslanmaya uğradığı kanıtlanmıştır ve bu nedenle plastik borular artık daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür plastik boruların ömrü 50 yıldan fazladır (Lund 2000). Şekil 2.6'da tipik bir hidronik ısıtma sistem yapısı gösterilmektedir.

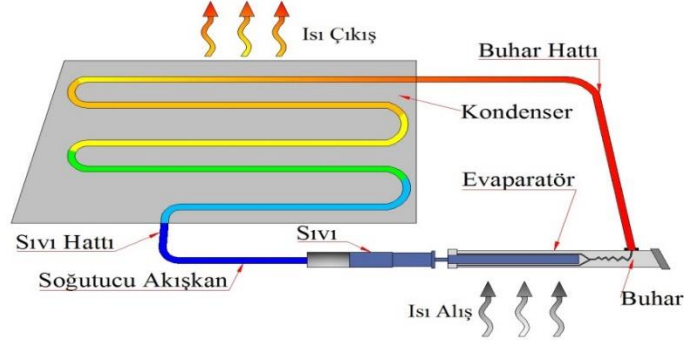


Şekil 2.6 Tipik bir hidronik ısıtma sistemi yapısı a) Plan b) Kesit (Spitler ve Ramamoorthy 2000).

Prensip olarak, yol, köprü veya benzeri bir dış yüzey ısıtma sistemi bina ısıtması ile aynı temel unsurlardan meydana gelmektedir. Bunlar; ısı kaynağı, üstyapıya gömülü ısı dolaşım boruları, hava parametrelerini ölçen sensörler ve sistem kontrolüdür (Eugster 2007). Jeotermal enerji ile buzlanma önleyici sistemler üç farklı yöntemden biri kullanılarak sağlanabilir. Bunlar; ısı boruları kullanılarak, direkt olarak jeotermal sıcak suyun kullanılması ve bir diğeri de yer ısısını depolama alanı olarak kullanan sistemlerdir.

Isı Borulu Sistemler

Isı borulu sistemler, pasif jeotermal bir köprü ısıtma sistemi olarak da bilinir. Bu tür sistemler pompa, kontrol sistemi gibi herhangi bir dış güce ya da bir insan müdahalesine gerek duymadan çalışabilirler. Isı borulu sistemlerin kurulum aşamasında, sistemin içerisine amonyak sıvısı ya da freon gazı doldurularak toprağın içerisine yerleştirilir. Toprağın ısısı vasıtasıyla akışkan ısı borusunun dibinde (evaporatör kısmında) ısınır. Isınan akışkan, ısıtılacak bölümde yer alan serili boruların olduğu kondenser bölümüne doğru hareket eder. Yoğuşarak ısısını bırakır ve yoğuşmuş akışkan yerçekiminin etkisiyle çevrimini tamamlayarak evaporatöre geri döner (Lund 2000, Liu 1998). Isı boruları çok geniş sıcaklık aralığında, değişik ebatlarda, sabit veya esnek şekillerde silindirik, düzlemsel, dönelebilir veya kullanma yerine ve amacına uygun olarak imal edilirler (Özsoy ve Acar 2005).

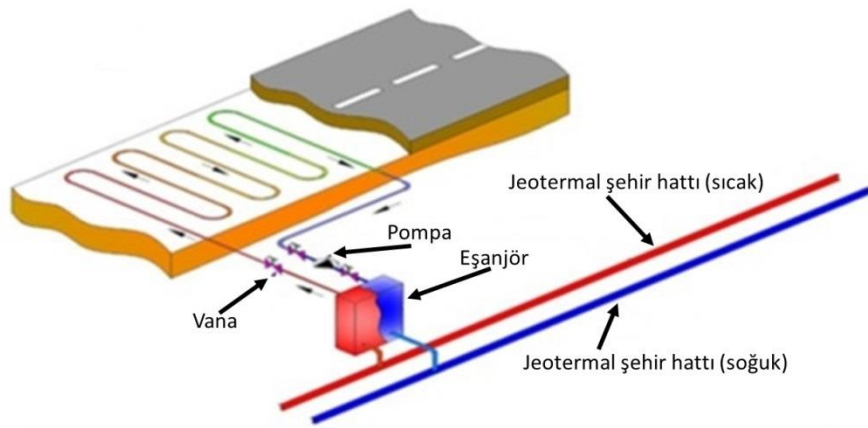


Şekil 2.7 Isı borulu ısıtma sistemi (Akbulut vd. 2015).

Jeotermal Sulu sistemler

Jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı, jeotermal enerjinin en eski ve en yaygın biçimlerinden biridir (Dickson ve Fanelli 2003). Bölgesel ısıtma sistemlerinde, ısı merkezinden sağlanan ısı, boru şebekesi ile birinci devre akışkanı tarafından ısıtılacak bölgeye taşınır ve her bölgeye ait ısı eşanjöründe ikinci devrede dolaşan ısıtıcı akışkan ısıtılır. Birinci devrede sıcak su, kızgın su veya buhar, ikinci devrede de sıcak su dolaşır (Kula 2008).

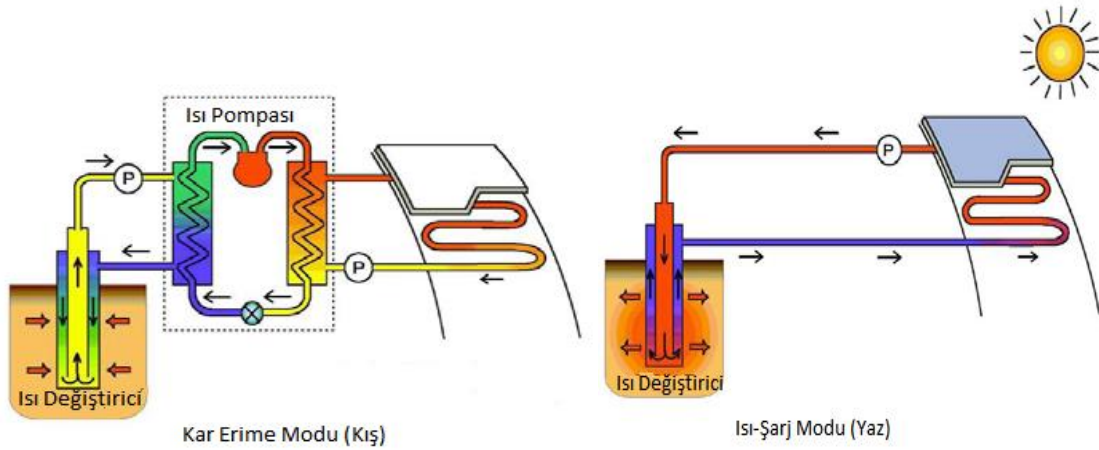
Direkt jeotermal su kullanılan sistemlerde, bir sirkülasyon pompası yardımıyla akışkan, asfaltın altına serili borulardan dolaştırılır. Isı, boru içerisinde dolaşan akışkan sayesinde yüzeye transfer edilir. İletim yoluyla yüzey ısıtılır. Akışkan olarak su+antifriz karışımı (etilen veya propilen glikol ve su) kullanılır (Lund 2000, ASHRAE 1999).



Şekil 2.8 Direkt jeotermal sulu sistemler.

Yeraltı Termal Enerji Depolama Sistemleri (Jeotermal Enerji Depolama Sistemleri)

Bu kar eritme sistemi, kuyu altı ısı eşanjörleri, bir ısı pompası ve yolun altına gömülü ısıtma borularından oluşur. Bu sistemin ana ısı kaynağı, sıg toprakta bulunan jeotermal ısı ve yaz aylarında depolanan güneş enerjisi yardımcı bir kaynaktır. Topraktaki ısı enerjisi kullanarak kışın yollarda meydana gelen karı/buzu eritmek için kullanılan bu sistemde toprağın altında bulunan ısı enerjisini yüzeye çıkarmak için kuyular kazılır. Topraktaki ısıl enerji, borulardan antifriz+su karışımı bir sirkülasyon pompası yardımıyla dolaştırılarak yüzeye çıkartılır. Kurulan sistem ile yaz aylarında kuyularda ısı enerjisi depolanabilmekte, kış aylarında ise depolanan bu enerji sirkülasyon pompaları ile yüzeye çıkarılabilmektedir (Iwamoto vd. 1998, Morita ve Tago 2005, Mirzananadi vd 2018).



Şekil 2.9 Kar eritme sistemi çalışma modları (Morita ve Tago 2005).

2.4 Jeotermal Enerji

Jeotermal kaynak, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş olan ısının meydana getirdiği, kimyasallar içeren su, buhar ve gazlardır. Jeotermal enerji ise, yerin derinliklerinde var olan kayaların içerisinde birikmiş olan ısının akışkanlarca taşınıp, rezervuarlarda depolanmasından oluşan sıcak su, buhar ve kuru buhar ile kızgın kuru kayalardan yapay yollarla elde edilen ısı enerjisidir. Jeotermal enerjiden, düşük sıcaklıklı (20- 70 °C) sahalar başta ısıtma ve endüstride ise kimyasal madde üretiminde kullanılmaktadır. Orta sıcaklıklı (70-150 °C) ve yüksek sıcaklıklı (150 °C'den yüksek)

sahalar ise elektrik üretimi ile beraber reenjeksiyon koşullarına bağlı olarak entegre şekilde ısıtma uygulamalarında da kullanılabilir. Reenjeksiyon; elde edilen jeotermal akışkanların kullanıldıktan sonra tamamı ya da kalan bölümünün yer altı jeolojik yapı ve oluşumlarına geri gönderilmesi olarak tamamlanır (Kılıç ve Kılıç 2013). Fosil enerji kaynaklarının yetersizliği ve verdiği zararlardan ötürü sürdürülebilir ve çevre açısından temiz enerji kaynaklarının kullanımı acil bir ihtiyaçtır. Jeotermal enerji de yenilenebilir enerji kaynaklarının içerisinde en temiz ve en ucuz yenilenebilir ve sürdürülebilir bir kaynaktır. Ülkemiz Dünya’da jeotermal enerjinin doğrudan kullanımında ilk 5 ülke arasında yer almaktadır. Çizelge 2.2’de Dünya’da jeotermal enerjinin doğrudan kullanımında lider ülkelerin sıralaması verilmektedir.

Çizelge 2.2 Jeotermal enerjinin doğrudan kullanımında lider ülkeler (Lund ve Toth 2021).

MWt	Tj/yıl
Çin (40610)	Çin (443492)
USA (20713)	USA (152810)
İsveç (6680)	İsveç (62400)
Almanya (4806)	Türkiye (54584)
Türkiye (3488)	Japonya (30273)

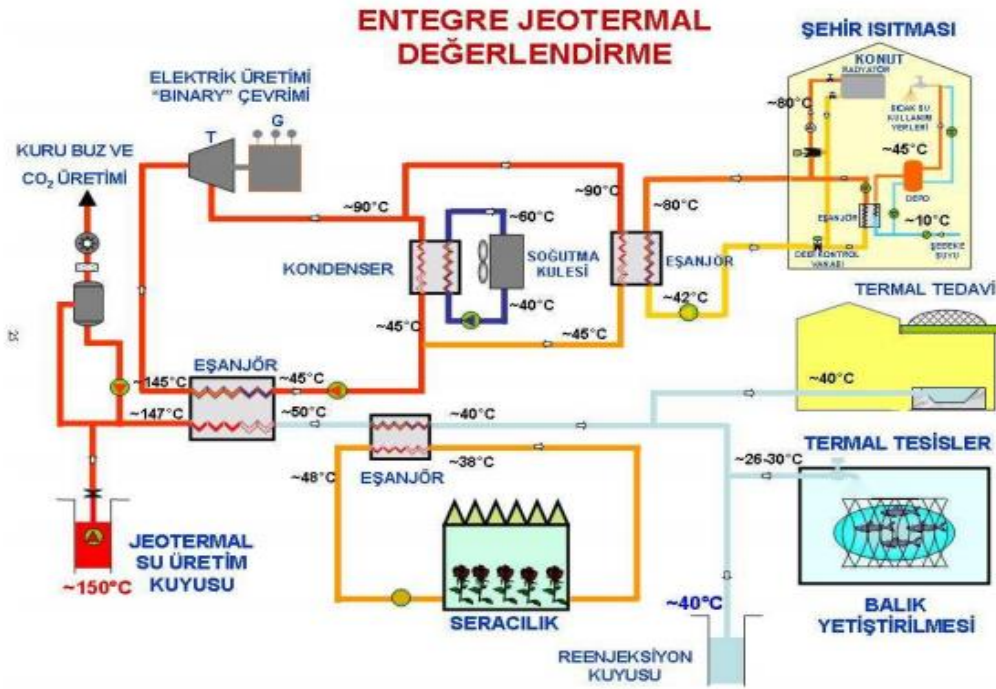
Jeotermal enerji dünyada çeşitli kategorilerde kullanılmaktadır. Çizelge 2.3’te Dünya çapında jeotermal enerjinin çeşitli kullanım kategorileri kapasite, kullanım ve kapasite faktörü değerleri ile gösterilmiştir. Listede jeotermal enerjinin soğutma/kar eritme kategorisinde kullanıldığı görülmektedir. Dünya’da kar eritme kategorisinde İzlanda, Japonya, Arjantin, Amerika Birleşik Devletleri, Slovenya ve sınırlı ölçüde Polonya ve Norveç’te bu sistemler kullanılmaktadır. Çoğunluğu İzlanda’da (%74) olmak üzere dünya çapında tahmini olarak 2,5 milyon m²’lik bir alan hidronik ısıtma sistemleri kullanılarak ısıtılmaktadır. Arjantin’de bulunan And Dağları’ndaki bir tatil beldesini kış aylarında açık tutabilmek üzere karayolunda oluşabilecek karların eritilmesi için jeotermal buhar kullanılmaktadır. ABD’de ise çoğunlu Oregon teknoloji Enstitüsü kampüsünde ve Kalmath Falls şehrinde olmak üzere karayolu ve köprüler için hidronik ısıtma sistemleri kullanılmaktadır (Lund ve Toth 2021). Fakat jeotermal enerji bakımından zengin olan ülkemizde, kullanım alanları bakımından incelendiğinde ülkemizde kar ve buz ile mücadelede henüz jeotermal kaynakların kullanımı mevcut değildir.

Çizelge 2.3 2020-2015-2010 dönemine ait dünya çapında çeşitli doğrudan kullanım kategorileri (Lund ve Toth 2021).

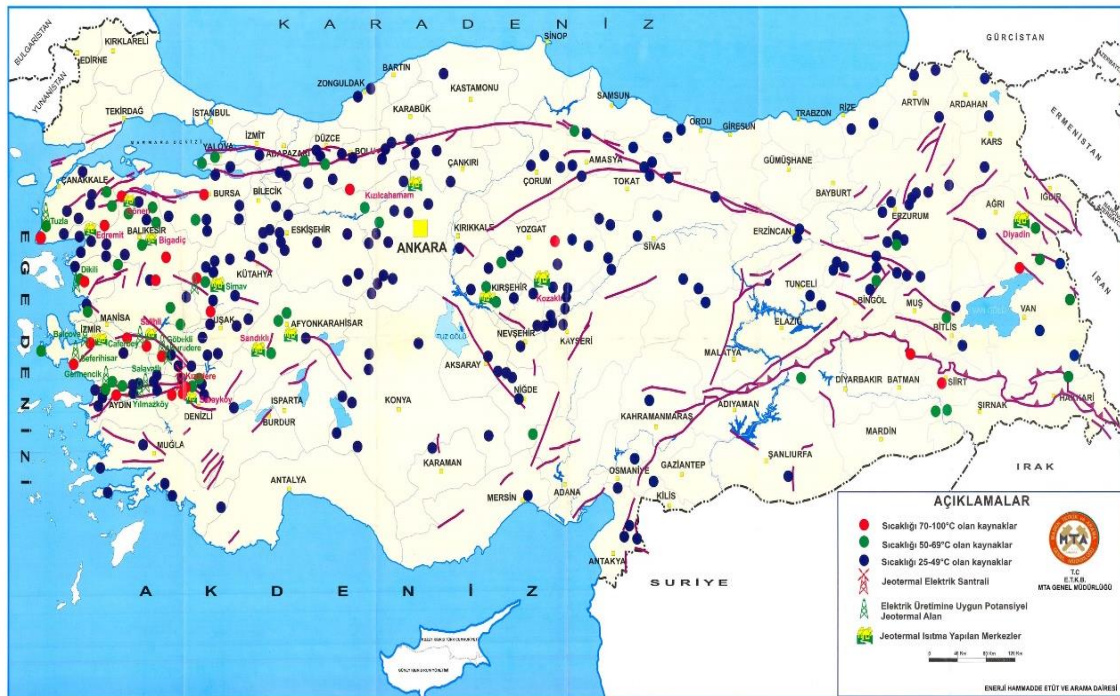
	Kapasite (MWt)			Kullanım (Tj/Year)			Kapasite Faktörü		
	2020	2015	2010	2020	2015	2010	2020	2015	2010
Jeotermal Isı	77547	50258	33134	599981	326848	200149	0,245	0,206	0,192
Pompaları									
Alan Isıtma	12768	7602	5394	162979	88668	63025	0,405	0,370	0,371
Sera Isıtması	2459	1972	1544	35826	29038	23264	0,462	0,467	0,478
Su Ürünleri	950	696	653	13573	11953	11521	0,463	0,545	0,559
Havuzu Isıtması									
Tarımsal	257	161	125	3529	2030	1635	0,435	0,400	0,415
Kurutma									
Endüstriyel	852	614	533	16390	10454	11745	0,610	0,540	0,699
Kullanımlar									
Yüzme ve banyo	12253	9143	6700	184070	119611	109410	0,473	0,415	0,518
Soğutma/Kar	435	360	368	2589	2596	2126	0,189	0,229	0,183
Eritme									
Diğerleri	106	79	42	1950	1440	955	0,584	0,578	0,721
Toplam	107727	70885	48493	1020887	592638	423830	-	-	-
Ortalama	-	-	-	-	-	-	0,300	0,265	0,277

Jeotermal enerjinin buz ve kar önleme amaçlı kullanılabilmesi için 40 °C suyun yeterli olabileceği yapılmış bir çalışmada gösterilmiştir (Wang vd. 2008). Şekil 2.10'da görüldüğü üzere jeotermal enerjiden yararlanma işlemleri ve sıcaklık değerlerinin yol kaplama ısıtması için yeterli olabileceği ve aynı zamanda jeotermal enerjinin farklı kullanımlarından sonra reenjeksiyona verilen su ile bile yol kaplamalarının ısıtılabilmesi anlaşılmaktadır. Dolayısıyla var olan jeotermal kaynakların tekraren kullanımı sağlanabilmektedir.

Ülkemiz jeotermal kaynakların dağılımı ve uygulama haritası Resim 2.6'da gösterilmektedir. Haritaya göre, ülkemizin büyük çoğunluğunda 25-49 °C sıcaklığa sahip jeotermal kaynakların varlığı görülmektedir. Bu sıcaklıklarında kar ve buz önleme amaçlı olarak hidronik ısıtma sistemleri için kullanılabilirliği mümkün olabilmektedir.



Şekil 2.10 Jeotermal enerjiden yararlanma işlemleri ve sıcaklık değerleri (Yaşar 2010).



Resim 2.6 Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası (İnt. Kyn. 11).

2.5 Konu ile İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

Ho vd. (2019), yaptıkları çalışmada, jeotermal sıcak su ile hidronik ısıtma kullanılan bir beton kaplamanın, sonlu elemanlar tekniği kullanılarak kaplama ısıtmasının sayısal modellemesi yapılmıştır. Hesaplamaları gerçekleştirmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanan COMSOL Multiphysics yazılımını kullanılmışlardır. Beton panelin ölçüleri 7,3m x 7,2m x 0,3 m olarak sabitlenmiştir. Gömülü boruların beton yüzeyden uzaklığı 3 inç olarak seçilmiştir. Modelde kullanılan giriş suyu sıcaklıkları analiz için seçilen 4 farklı bölgedeki jeotermal kaynak sularının sıcaklıkları baz alınarak 30 °C ile 60 °C arasında seçilmiştir. Bu çalışma için, incelenen konular batı Kuzey Dakota'da olduğundan, batı Kuzey Dakota'nın iklim koşulları, ısı ihtiyacı tahminleri için kullanılmıştır. Yapılan analizde giriş suyu sıcaklığı, hacimsel akış hızı ve hava sıcaklığı dahil olmak üzere birçok etkili faktör incelenmiştir. Zamana bağlı ısıtma süreci, bu faktörlerle önemli ölçüde ilişkilidir. Kaplama sıcaklıklarının sistemin çalıştırılmasından 10 saat sonra kararlı ve nihai bir değer ulaştığı sonucuna varmışlardır. Çoğu hava koşullarında 300 W/m² lik bir ısı ihtiyacı göz önüne alındığında 60 °C'deki suyun kaplama yüzeyini ısıtabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca -5 °C ile -25 °C arasında değişen hava sıcaklıklarına bağlı olarak, 60 °C ve 50 °C'deki giriş suyunun, hidronik kar eritme sistemi için kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir.

Johnsson ve Adl-Zarrabi (2019), düşük sıcaklıklı (4–8 °C) hidronik ısıtmalı kaplamaların tasarlanması için sayısal bir model hazırlamışlardır. Model uygulanmış bir deneysel düzeneğe göre doğrulanmıştır. Geliştirilen modelin hidronik ısıtma sistemi davranışında yüzey sıcaklıkları için <1,4 °C dönüş suyu sıcaklığı için <0,4 °C ortalama karekök hatası ile tahmin edilebileceğini göstermiştir. Modelde iki farklı kontrol stratejisi kullanılmıştır. Birincisi hava sıcaklığına göre kontrol edilen sistem, diğeri ise çığ noktası sıcaklığına bağlı bir kontrol sistemidir. Çığ noktası düzenlemesi ile enerji tüketimi %62 oranında azaltılabildiğini ortaya koymuşlardır. Hidronik ısıtma sisteminin, serbestçe bulunabilen atık enerji veya jeotermal enerji gibi düşük sıcaklık kaynaklarından faydalanılarak kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır.

Ali Nahvi vd. (2019), ticari havaalanlarının apron alanlarında hidronik olarak ısıtılan

kaplama sistemlerinin ekonomik fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Kar ve buzun kaldırılması için hidronik ısıtma sisteminin kullanımı ile ilgili stokastik bir ekonomik analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada hidronik ısıtma sisteminin ekonomik olarak uygulanabilirliğini etkileyen değişkenleri belirlemek için bir analiz yapılmıştır. Bulgular, yüksek sermaye maliyetlerine rağmen, havalimanlarında hidronik ısıtma sistemlerinin kullanımının ekonomik olarak uygun olabileceğini göstermektedir.

Blomqvist vd. (2019), bölgesel bir ısıtma ve soğutma sisteminden gelen ısıyı kullanan 35.000 m²'lik hidronik ısıtmalı kaplama için farklı kontrol stratejilerinin performansını analiz etmişlerdir. Bölgesel ısıtma için evsel atık, biyokütle, kömür ve petrol kullanan bir merkezden elektrik üretimi ve konut ısıtması yapılmaktadır. Konut ısıtmasından çıkan atık enerjinin yol kaplamalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Sistem ile ilgili 3 farklı strateji analiz edilmiştir. Bunlar ilk olarak kaplama ısıtmasının kullanılmadığı sistem, ikincisi, -5 °C'nin altındaki sıcaklıklarda kapatıldığı, üçüncüsü -10 °C'nin altındaki sıcaklıklarda kapatıldığı sistemlerdir. Çalışma sonucu bölgesel ısıtma merkezinden gelen dönüş sıcaklıklarının kullanıma uygun olduğunu ortaya koymuşlardır.

Mirzanamadi vd. (2018), farklı tasarım seçeneklerinin hidronik ısıtma kaplaması sistemlerinin verimliliğini nasıl etkilediğini araştırmak için iki boyutlu bir sayısal model geliştirilmişlerdir. İklim verileri olarak İsveç'in Östersund bölgesindeki veriler kullanılmıştır. Buzlanmanın azaltılmasında borular arasındaki mesafenin önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Borular arası mesafenin 400 mm'den 50 mm'ye düşürülmesi sonucu yol yüzeyindeki buzlanmanın 4 kat daha kısa zamanda çözülebildiğini söylemişlerdir. Boruların yerleşimlerinin daha sık noktalara yerleştirilmesi sistemin verimini artırmakla beraber boru arası mesafesinden daha önemli bir etkiye sahip olmadığını bulmuşlardır. Aşınma tabakasının yüksek ısı iletken asfalt tabakasıyla değiştirilmesi, yol yüzeyindeki buzlanmanın yaklaşık % 10 daha kısa zamanda çözülebildiğini belirtmişlerdir. Yol yüzeyinin güneş emiciliğindeki artışın, yüzeyde daha fazla güneş enerjisi soğurması meydana getirmesi ile daha sıcak yol yüzeylerini oluşturarak, daha kısa sürede buzlanmanın çözülebildiğini söylemişlerdir. Yol yüzeyinin soğuruculuğunun 0,6'dan 0,96'ya yükseltilmesi ile yol

yüzeyindeki buzlu koşulların yaklaşık %10 daha az sürmesine neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Borularda dolaşan sıvının sıcaklığının artması ile yol yüzeyine daha fazla enerji sağlanarak, yol yüzeyinde daha az süren buzlu koşullar doğuracağını ve sıvı sıcaklığının 4 °C'den 20 °C'ye yükseltilmesi sonucu yol yüzeyindeki buzlanma süresinin yaklaşık % 35 daha kısa sürdüğünü belirtmişlerdir.

Adl-Zarrabi vd. (2016), yaptıkları çalışmada bir asfalt numunesinin termal özellikleri, kaplamadaki gömülü boru konumları ve mevsimsel enerji depolama parametrelerini incelemişlerdir. Hidronik ısıtmalı yol sisteminin performansının, boruların konumu, kaplama yapısının ısıl özellikleri ve ısı depolama sisteminin sıcaklık seviyesi gibi parametrelere bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Asfalt kaplamanın termal özelliklerinin ölçümünde geçici düzlem kaynak metodunu kullanmışlardır. Ölçümlerin sonuçları, bir asfalt kaplamanın farklı derinliklerinde termal özelliklerin % 6-14 civarında değiştiğini göstermiştir. Geometrik tasarım için bir simülasyon kullanılarak, hidronik kaplama içerisinde dolaşan boru aralıklarının sistem performansı üzerinde, borunun gömüldüğü derinliğe göre daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Son olarak mevsimsel enerji depolamasının enerji kayıplarını ve boyutunu azaltmak için güneş panelleri eklenmiş ve sistem performansı değerlendirilmiştir. Güneş panelleri eklenmiş sistem ile ilgili sayısal simülasyonların sonuçları, ek sistem karmaşıklığı ve maliyetleri nedeniyle güneş panelleri eklemenin mantıklı olmadığını göstermektedir. Malzemenin termal özelliklerinin ve boruların aralıklarının sistemin performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve boruların gömülü derinliğinin daha az önemli olduğu sonucuna varmışlardır.

Xu ve Tan (2015), düşük sıcaklıkta ısıtma sıvıları kullanan kaplama karı eritme sistemleri için ısı ve kütle bağlantılı bir model geliştirmişlerdir. Bu modeli, HVACSIM Plus programı kullanılarak hidronik olarak ısıtılan kaplamanın performansını simüle etmek için kullanmışlardır. Model, Harbin Teknoloji Enstitüsü'nde gerçekleştirilen orta ölçekli kar eritme deneylerinden elde edilen test verileriyle doğrulanmıştır. Belirli bir ısıtma kapasitesi ve hava koşulları ile üç alt aşamada (boşta çalışma, kar eritme ve eritme sonrası) geliştirilen modelin gerçek kar eritme performansını araştırmaktır. Yapılan analiz sonuçlarında kar eritme aşamasında ortam hava sıcaklığına nazaran giriş

ısı akısının kar eritme performansında daha önemli etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Giriş ısı akısı ve ortam hava sıcaklığına bağlı olarak, eritme sonrası aşamadaki hidronik kar eritme sisteminin farklı kurallar altında çalıştırılması gerektiğini söylemişlerdir.

Hachiya vd. (2008), yaptıkları çalışmada, bir havaalanı asfalt kaplaması için iki farklı ısıtma sistemini incelemişlerdir: sıcak su kullanılarak çalışan ısıtma boru sistemi ve elektrik telleri kullanılarak ısıtma sistemi. Sistemin asfalt yüzey üzerindeki kar erimesindeki etkinliği ve tekrarlanan uçak yüklemesi altındaki dayanıklılığını açıklığa kavuşturmak için bir dizi laboratuvar ve gerçek testler yapmışlardır. Daha sonra kaplama yüzeyi sıcaklığını 1 °C'ye yükseltmek için gerekli olan ısıtma ünitesi sıcaklığı, çeşitli ortam sıcaklığı koşulları altında ölçülmüştür. Saha çalışmasında, çeşitli derinliklerde iki tip kar eritme ekipmanı ile deneysel asfalt kaplamalar inşa edilmiştir. Kar eritme ekipmanının kaplama yüzeyi özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek ve kar eritme ekipmanının tekrarlı yükleme altında dayanıklılığını sağlamak için B747 uçağıninkine benzer bir tekerlek konfigürasyonuna sahip bir yükleme düzeneği ile 10.000 tekrarlı yük uygulanmıştır. Yapılan çalışmada, kar eritme ekipmanlarının havaalanı asfalt kaplamalarında başarıyla kurulabileceği sonucuna varılmıştır.

Wang vd. (2008), küçük ölçekli bir kar ve buz eritme sistemi oluşturmuşlardır. Beton kaplama üzerinde kırılmış buz, katı buz, yapay kar ve doğal karın dinamik eritme işlemlerinin deneylerini yapmışlardır. Sonuçlar, buz ve karın erime sürecinin üç aşamadan oluştuğunu göstermişlerdir: bir başlangıç dönemi, bir doğrusal dönem ve hızlandırılmış bir dönem olmak üzere. Ortam koşullarıyla bağlantılı buz ve karın fiziksel özellikleri eritme süreci üzerinde bariz bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Rölanti sürecinin kar eritme performansı iyileştirmek için etkili bir yol olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca 40 °C'lik jeotermal suyun kullanılması mümkündür ve pratik tasarım ve uygulamalar sırasında akışkan sıcaklıklarının çok yüksek tutulmasının gereksiz olduğunu belirtmişlerdir.

Liu vd. (2006) yaptıkları çalışmada, kar eritmek için kurulmuş bir deney düzeneğinde sayısal model için deneysel bir doğrulama araştırması yapmışlardır. Oklahoma Eyalet

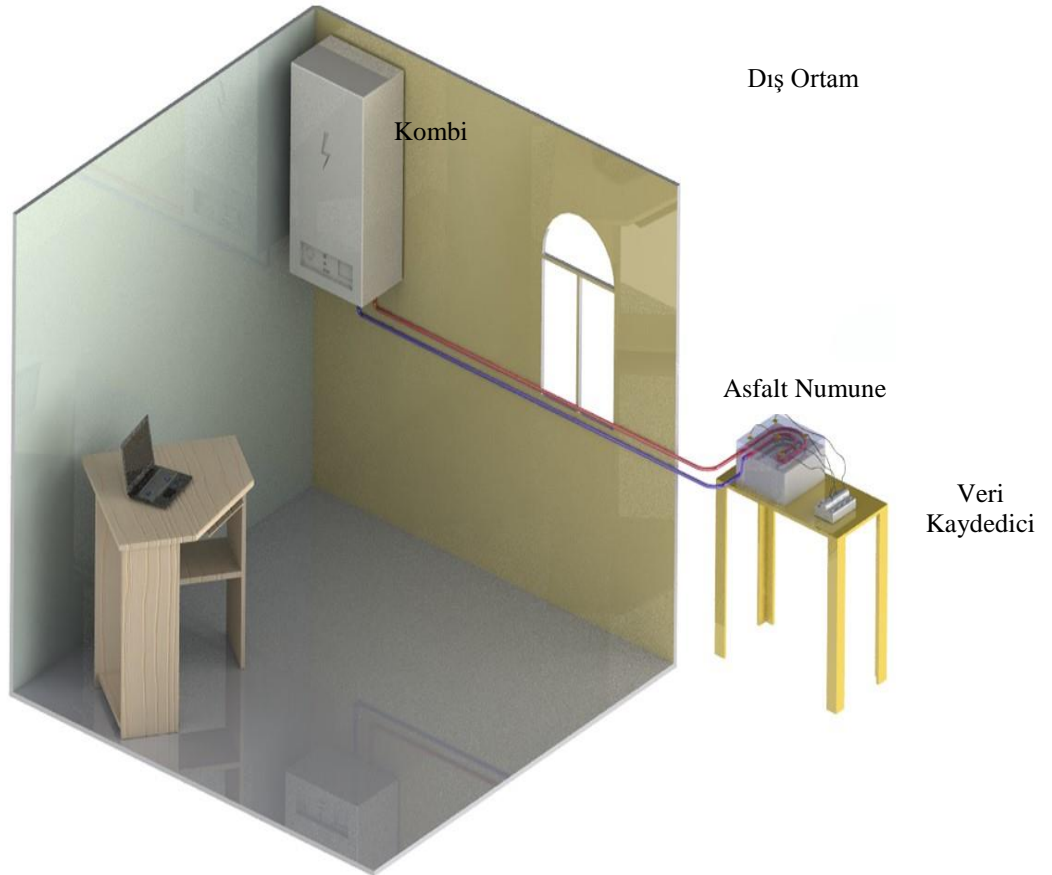
Üniversitesi'nde deneysel bir hidronik köprü kar eritme sistemi inşa edilmiştir. Deneysel köprü tabliyesi 18,3 m uzunluk ve 6,1 m genişliğindedir (2 şerit genişliğinde). Gömülü hidronik boru derinliği 89 mm olarak seçilmiş ve 19 mm çapında çapraz bağlı polietilen boru kullanılmıştır. Alınan ölçümlerde, akışkanın sisteme giriş sıcaklığı 54 °C civarında ve ortalama köprü yüzey sıcaklığı karlanma ve buzlanmanın olduğu zamanlarda 4,4 °C olduğu ölçülmüştür. Ayrıca sayısal olarak ortaya konulan modelin kullanılabilir olduğunu da göstermişlerdir.

Spitler ve Ramamoorthy (2000), Oklahoma Eyalet Üniversitesi'ndeki araştırma projesi olarak, ısıtma sağlamak için toprak kaynaklı bir ısı pompası sistemi kullanan köprü buz çözme sistemlerini araştırmışlardır. Oklahoma, Weatherford yakınlarındaki bir köprüde kurulması planlanan bir sistemin tasarımı ve önerilen köprü tabliyesinin sistem simülasyonlarından elde edilen sonuçlar verilmiştir. 213 m uzunluğunda ve 12 m genişliğinde bir köprü için tasarım yapılmıştır. Açılacak sondaj sayısı ile ısıtma yükünü sağlamak için gerekli ısı pompası sayısı arasında bir denge olduğunu belirtmişlerdir. Kendi sistemleri için 250 sondaj çukurunda bulunan ve 76 m derinlikte planlanan 30 ton kapasiteli 16 adet ısı pompasına sahip bir sistemi tasarlamışlardır.

Yapılan literatür taramasında da görüleceği üzere, konu ile ilgili son yıllarda önemli araştırmalar yapılmakla beraber ülkemizde hezün kullanımı bulunmayan bu sistemlerin ülkemiz adına kullanılabilir olduğu ortaya konulmuş ve ilk kez bu çalışma ile kalitesi düşen jeotermal enerjinin israf edilmeden karayollarımızda kış aylarında meydana gelen olumsuzlukların giderilmesi kapsamında kar ve buzlanma önleme sistemleri için yeniden kullanılabilirliği ortaya konulmuştur. Genel olarak hidronik ısıtma sistemine ait mevcut araştırmalar kar eritme performansına odaklanmıştır. Yapılan yapısal analizler sonucunda hidronik ısıtma sisteminin karayollarında asfalt kaplama tabakalarında meydana getirdiği gerilmelerin etkileri incelenmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

Yapılan çalışmada asfalt kaplamalı yolların jeotermal kaynaklar kullanılarak buzlanmasının önlenebilirliği, gerçek hava ortamında yapılan testler neticesinde araştırılmıştır. Buna bağlı olarak gerçekleştirilen ölçümler sonucunda alınan verilerin MATLAB bilgisayar yazılımı kullanılarak istatistik açıdan değerlendirilmesi yapılmıştır. Aynı zamanda üstyapı örnekleri ANSYS bilgisayar yazılımında modellenerek termal ve yapısal analizler kullanılarak değerlendirilmiştir. Son olarak da sistemin maliyeti ile ilgili bir hesaplama yapılmıştır. Deney düzeneği planı Resim 3.1’de verilmiştir. Asfalt numunelerin içerisine yerleştirilen borularda dolaştırılan sıcak su, elektrikli kombi kullanılarak sağlanmıştır. Asfalt yüzeylerin üzerinde beş farklı noktada sıcaklık ölçümleri termacuplar ile yapılmıştır. Aynı zamanda ölçüm yapılan esnada hava sıcaklığı ölçümleride alınmıştır.



Resim 3.1 Deney düzeneği planı.

3.1 Laboratuvar Ortamında Hazırlanan Numuneler ve Verilerin Alınması

Hidronik buz önleme sisteminin modellenmesinde kullanılacak olan asfalt örnekleri, standart asfalt numune örneklerinden farklı boyutlarda yapılmıştır. Bunun için öncesinde 40x40x20 cm şeklinde asfalt numunelerin döküleceği kalıplar hazırlanmıştır. Özdemir İnşaat Turizm San. Tic. A.Ş. tarafından Delice Ayr.-Yerköy Yolu Km:0+000+59+000 arası ve Yerköy-Ayr.-Yozgat-Sorgun Yolu Km: 59+000+120+000 arası üst yapı inşaatı sırasında aşınma tabakası, binder tabakası ve bitümlü temel tabakası için gerekli olan bitümlü sıcak karışım malzemeleri temin edilmiştir. Numunelere ait resimler Resim 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2 Asfalt numunelerin hazırlanması.

Numuneler hazırlandıktan sonra laboratuvara getirilmiştir. Sistem içerisinde dolaşacak olan su için, ısı kaynağı olarak elektrikli bir kombi kullanılmıştır. Laboratuvar içerisinde yerleştirilen kombi jeotermal benzetimi için kullanılmış olup, kullanılan kombi 24 Kw’lık elektrikli bir kombidir. Resim 3.3’de kullanılan kombiye ait görsel verilmiştir.



Resim 3.3 Isıtma kaynağı olarak kullanılan kombi.

Hidronik ısıtma sistemi için 18 mm çaplı pe-x borular kullanılmıştır. Pe-x borular kimyasal olarak polietilenden üretilmektedir ve 50 yıllık bir ömrü vardır. Boru aralıkları 15 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Boruların laboratuvar dışında kalan kısımları yalıtım malzemesi ile sarılmıştır. Kullanılan boruya ait görseller Resim 3.4'te verilmiştir.



Resim 3.4 Pe-x boru.

Aynı şekilde asfalt numunelerin içerisinde yer alan hidronik sistemde sıcak suyun dolaştırıldığı anlarda asfalt numune örneklerinin dört bir yanı ve alt kısmı yalıtım malzemeleri ile sarılmıştır. Resim 3.5'te laboratuvarında hazırlanmış olan deney düzeneği görülmektedir.



Resim 3.5 Laboratuvar ortamında hazırlanmış olan deney düzeneği.

Veri alım sürecinde asfalt yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve giriş-çıkış suyu sıcaklıklarının ölçümleri için 1 adet veri kaydedici ve 8 adet sıcaklık ölçen termocupl

kullanılmıştır. Veri kaydedici ve termocupl olarak Resim 3.6’da gösterilen bir veri kaydedici ile YB-ST-K tipi 8 adet sıcaklık ölçen termocupl kullanılarak veriler alınmıştır.



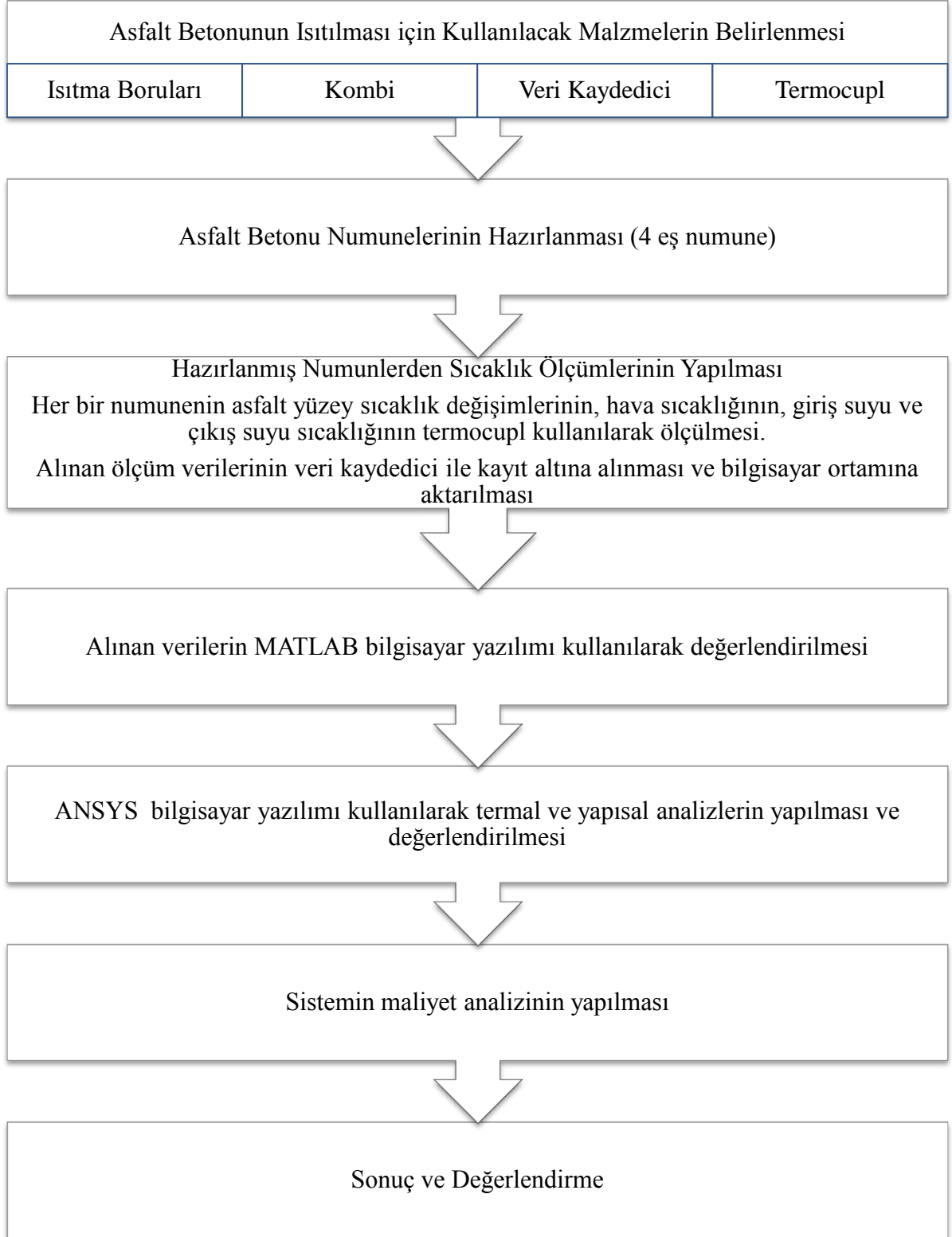
Resim 3.6 Veri kaydedici ve termocupllar.

Kurulumu tamamlanan düzenden hava sıcaklığının 0’ın altına düştüğü zamanlarda Asfalt yüzey üzerinde 5 farklı noktadan, giriş suyu bölümü, çıkış suyu bölümü ve hava sıcaklıklarının da aynı anda sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Veriler bilgisayar ortamında depolanmıştır. Resim 3.7’de verilerin alındığı zamana ait görsel verilmiştir.



Resim 3.7 Termocupl ile asfalt yüzey sıcaklıklarının alınması.

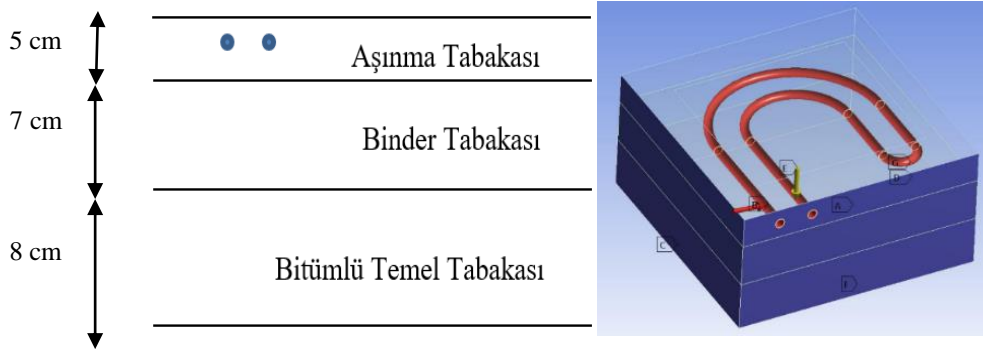
Tez çalışmasının özet yöntem akış şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Tez yöntem akış şeması.

3.2 Hidronik Isıtma Sisteminin ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Yapılan Termal Analizi

Bu aşamada sonlu elemanlar programı olan ANSYS bilgisayar yazılımı kullanılarak laboratuvar ortamında yapılmış olan testlerin ANSYS yazılımında modellenerek asfalt kaplamalı bir yol kesitinin termal analizleri yapılmıştır. Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarına döşenmiş ısıtma borularının beş farklı dış ortam ve üç farklı giriş suyu sıcaklıklarında oluşturdukları asfalt yüzey sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Çalışmada 40x40x20 cm boyutlu asfalt kaplamalı yol kesit örnekleri kullanılmıştır. 8 cm bitümlü temel, 7 cm binder ve 5 cm aşınma tabakalarından oluşan bir üstyapı kesiti seçilmiştir. Şekil 3.2’de örnek modelin 2 ve 3 boyutlu görselleri verilmiştir.



Şekil 3.2 Asfalt yol kaplaması 2 ve 3 boyutlu görünüşleri.

Termal analiz ile asfalt yüzey üzerinde meydana gelen sıcaklık değişimlerinin incelenmesi için farklı giriş suyu sıcaklığı, hava sıcaklığı, boru aralık ve derinliklerinde analizler yapılmıştır. Bu analize ait değişkenler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Değişken parametler öncelikle farklı derinliklerde yer alan sistem için incelenmiş. Sonrasında boruların bitümlü temel tabakasında sabit tutulduğu farklı boru aralıklarında analizler yapılmıştır. 30 °C, 40 °C ve 50 °C giriş suyu sıcaklıkları kullanılarak beş farklı hava sıcaklığında analizler yapılmıştır.

Çizelge 3.1 Termal analiz için kullanılan değişkenler.

Boru Derinlik (mm)	Boru Aralık (mm)	Su Giriş Sıcaklığı (°C)	Hava Sıcaklığı (°C)
25,85,160	150	30,40,50	0,(-2,5),(-5), (-7,5),(-10)
85	150,190,230	30,40,50	0,(-2,5),(-5), (-7,5),(-10)

Aşınma yüzeyi haricinde kalan bölümler adyabatic (ısı ve kütle geçişi yok) olarak tanımlanmıştır. Sistem içerisinde dolaşan suyun hızı 5 m/s olarak seçilmiştir. Termal analiz için gerekli olan asfalt ve pe-x boru ile ilgili termal özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Asfalt ve pe-x boru ile ilgili termal özellikler (Górszczyk ve Grzybowska 2011, Blomqvist vd. 2019).

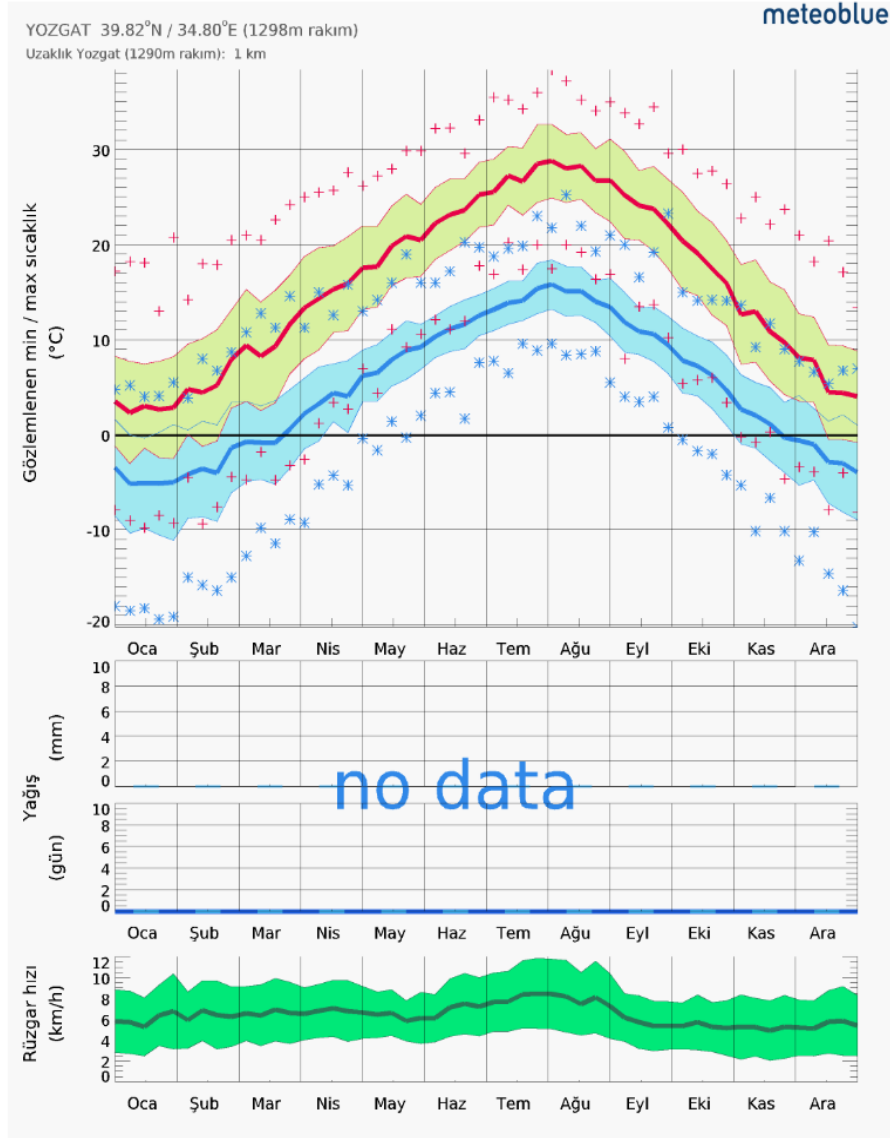
Üst Yapı Katmanları	Termal İletkenlik (W/m°C)	Özgül Isı Kapasitesi (j/kg.K)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı Transfer Katsayısı (W/m ² .K)
Aşınma Tabakası	0,75	860	2352	14
Binder Tabakası	0,95	860	2376	
Bitümlü Temel Tabakası	0,95	860	2331	
Pe-x Boru	0,42	1465	930	

Aşınma tabakası atmosfer koşullarına doğrudan maruz kaldığından dolayı burada kullanılacak ısı transfer katsayısı değeri hesaplanırken rüzgâr verilerinin dikkate alınması gerekmektedir. Ölçümlerin yapıldığı Yozgat iline ait alınan veriler Şekil 3.3’deki rüzgâr verileri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Formüle göre verilerin alınmış olduğu şubat ayı için rüzgâr hızı olarak 7 Km/h alınmış olup 2 m/s olarak hesaplarda kullanılmıştır.

Isı Transfer katsayısı hesabında kullanılan Formül (3.2) ve (3.3) verilmiştir (Mirzanamadi 2017).

$$h_c = 6 + 4 \cdot v \quad (v \leq 5 \text{ m/s}) \quad (3.1)$$

$$h_c = 7,41 \cdot v^{0,78} \quad (v > 5 \text{ m/s}) \quad (3.2)$$

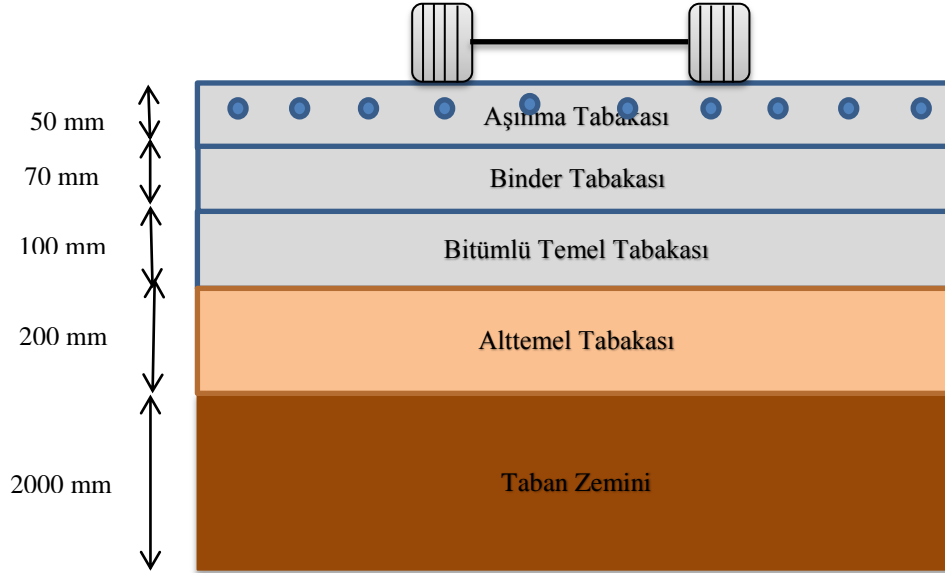


Şekil 3.3 Yozgat 2020 yılı hava sıcaklığı ve rüzgâr verileri (İnt. Kyn. 5).

3.3 Hidronik Isıtma Sistemine Sahip Asfalt Kaplamanın ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Trafik Yükü Altındaki Yapısal Analizi

Bu aşamada ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak beş tabakalı bir üstyapı modellenmiş ve zamana bağlı yüklemeler uygulanarak statik analiz yapılmıştır. Hidronik ısıtma sistemine sahip bir üstyapının trafik yükü altında tabakalarda meydana getirdiği gerilmeler, pe-x boruda meydana gelen gerilmeler ve tekerlek temas yüzeylerinde meydana gelen çökme değerleri incelenmiştir. Analizde aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel tabakası, alttemel tabakası ve taban zemini olmak üzere

beş katmanlı bir üstyapı modellenmiştir. Şekil 3.4’de üstyapıya ait model gösterilmiştir. Aşınma tabakası 50 mm, binder tabakası 70 mm, bitümlü temel tabakası 100 mm, alttemel tabakası 200 mm ve taban zemini 2000 mm olarak teşkil edilmiştir.



Şekil 3.4 Üstyapı Modeli.

Yapısal analiz için boruların aşınma, binder, bitümlü temel ve alttemel tabakalarının ortasında yer aldığı sistemlerde, üç farklı giriş suyu sıcaklığı ve beş farklı hava sıcaklığı kullanılarak analizler yapılmıştır. Analize ait değişkenler Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Yapısal analizde kullanılan parametreler.

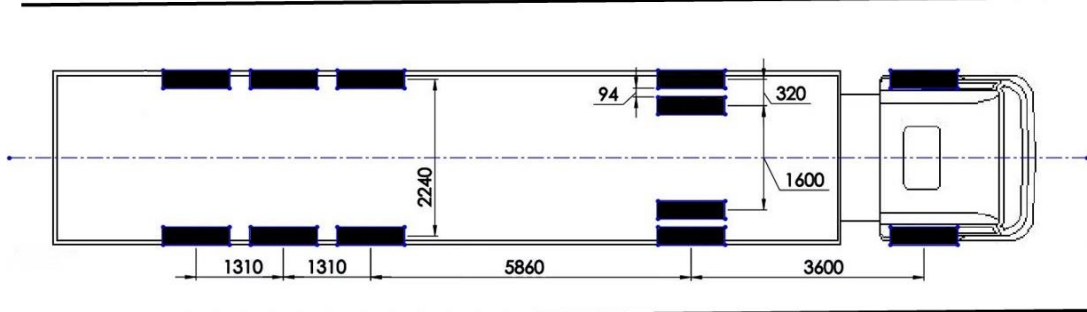
Boru Derinliği (mm)	Boru Aralığı (mm)	Giriş Suyu Sıcaklığı °C	Hava Sıcaklığı °C
Aşınma Tabakasının Ortası (25 mm)	150	50,40,30	0,-2,5,-5,-7,5,-10
Binder Tabakasının Ortası (85 mm)	150	50,40,30	0,-2,5,-5,-7,5,-10
Bitümlü Temel Tabakasının Ortası (170 mm)	150	50,40,30	0,-2,5,-5,-7,5,-10
Alttemel Tabakasının Ortası (320 mm)	150	50,40,30	0,-2,5,-5,-7,5,-10

Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları viscoelastik malzeme olarak, alttemel tabakası ve taban zemini ise elastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Malzemelere ait fiziksel özellikler Çizelge 3.4’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.4 Tabakalara ait katman kalınlıkları ve fiziksel özellikler (Liu vd. 2017).

Katmanlar	Kalınlıklar (mm)	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (Kg/m ³)
Aşınma tabakası	50	0,35	11150	2448
Binder tabakası	70	0,35	10435	2427
Bitümlü temel tabakası	100	0,35	6893	2427
Alt temel tabakası	200	0,49	157,8	1080
Taban zemini	2000	0,49	98,9	1750
Pe-x boru	16 mm (çap)	0,40	850	925

Sonlu elemanlar ağının en alt kısmındaki düğüm noktalarında hem düşey hem de yatay yönde harekete izin verilmemektedir. Sonlu eleman ağının yanıl sınırlarında ise düşey yönde harekete izin verilirken yanıl harekete izin verilmemektedir. Kaplama yüzeyine etki eden tekerlek yükü 226 mm genişliğinde etki etmektedir. İkinci dingilde çift teker diğerlerinde ise tek teker şeklinde yük uygulaması yapılmıştır (Liu vd. 2017). SEM analizinde yükleme yapılırken kullanılan araç Resim 3.8’de gösterildiği gibidir.



Resim 3.8 SEM Analizde yükleme yapılırken kullanılan teker konfigürasyonu.

Analizde kullanılan araç için, teker yüklemelerine ait zamansal hesaplamalar yapılırken Türkiye’de araçların uyması gereken yasal hız sınırları dikkate alınarak araç hızı 85 km/h olarak seçilmiş ve hesaplamalar bu hıza göre yapılmıştır. Çizelge 3.5’de teker yükleme miktarları ve zamanları gösterilmiştir. Yapılan yüklemeler beş ayrı zaman diliminde etki ettirilmiştir. Teker ara mesafelerine uygun olarak boş geçen zamanlar hesaplanmıştır. Hidronik ısıtma sistemini kullanan bir asfalt kaplamada üç farklı giriş suyu sıcaklığında ve beş farklı hava sıcaklığında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz sonucu sistemde meydana gelen gerilmeler ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Çizelge 3.5 Zamana bağlı yükleme miktarları ve süreleri.

	Tek teker (MPa)	Çift Teker (MPa)	Tek Teker (Mpa)	Tek Teker (Mpa)	Tek Teker (Mpa)
Zaman (s)	1. dingil	2. dingil	3. dingil	4. dingil	5. dingil
0,000-0,007	0,515				
0,007-0,162			Yükleme yok		
0,162-0,169		0,372 x 2			
0,169-0,426			Yükleme yok		
0,426-0,433			0,506		
0,433-0,485			Yükleme yok		
0,485-0,492				0,504	
0,492-0,544			Yükleme yok		
0,544-0,551					0,511

3.4 Laboratuvar DeneYlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Fen bilimleri ve sosyal bilimlerin birçok alanında kullanımı bulunan regresyon analizi, iki ya da daha fazla değişkenin birbirleri ile olan ilişkisini inceleyen ve aralarındaki ilişkinin modelini ortaya koymak için uygulanan bir istatistiksel analiz metodudur (Arı ve Önder 2013). Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin bulunduğu veriler için, bir tek bağımsız değişkenin kullanıldığı regresyon analizine; tek değişkenli regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişkenin kullanıldığı regresyon analizine de çok değişkenli regresyon analizi denilmekte olup literatürde de birçok çalışma yapılmıştır (Ay 2014, Ekincioglu vd. 2017, Maruf 2019, Garbalı ve Aslan 2020).

Bu çalışmada verilerin istatistik açıdan incelenmesi için MATLAB bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Verilerin analizi için çoklu lineer regresyon analizi uygulanmıştır. Bağımlı değişken olarak asfalt yüzeyin ortalama sıcaklığı, bağımsız değişken olarak da zaman, giriş suyu sıcaklığı, hava sıcaklığı ve dış ortam sıcaklığı kullanılarak bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. İlk olarak pearson korelasyon testi yapılmıştır. Korelasyon, iki kuyruklu hipotez testinde 0,01 (%1) anlamlılık düzeyinde anlamlı çıkmıştır. Yani, diğer değişkenlerin modellenen değişken (Asfaltın ortalama sıcaklığı (°C)) ile ilişkisi istatistiksel olarak anlamlı olmuştur. Gerçek veriler ile modellenen verilerin karşılaştırması grafiklerle gösterilmiştir.

Çoklu doğrusal regresyon modeli Formül 3.1’de gösterildiği biçimdedir.

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_4 * x_4 \quad (3.1)$$

Modelde Y bağımlı değişken; asfalt yüzeyin ortalama sıcaklığını, x_1 ; zaman (dakika), x_2 ; giriş suyu sıcaklığı (°C), x_3 ; hava sıcaklığı (°C), x_4 ; çıkış suyu sıcaklığı (°C) olmak üzere b_0 , regresyon eğrisinin y eksenini kesim noktası, b_1 birinci bağımsız değişkenin regresyon katsayısı, b_2 ikinci bağımsız değişkenin regresyon katsayısı, b_3 üçüncü bağımsız değişkenin regresyon katsayısı, b_4 ise dördüncü bağımsız değişkenin regresyon katsayısını göstermektedir.

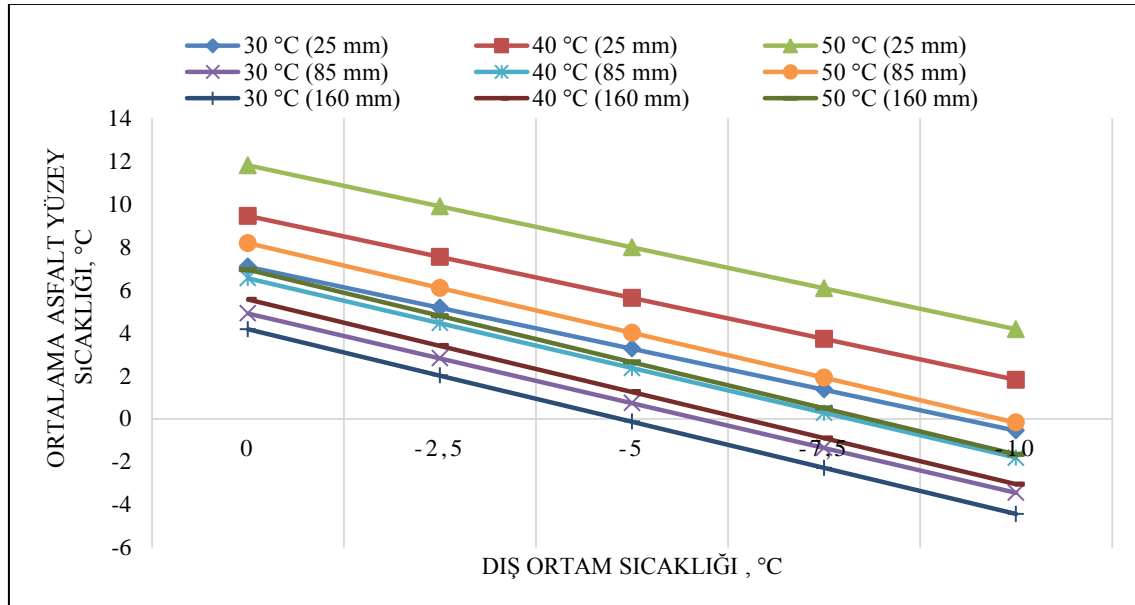
Hidronik ısıtma sistemleri için zaman, giriş suyu sıcaklığı, hava sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklıklarının, asfalt yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini modellemek için gerçek hava koşullarında ölçülen veriler kullanılarak MATLAB bilgisayar yazılımı ile çoklu lineer regresyon analizi yapılmıştır. Farklı regresyon modelleri oluşturulmuş ve bunların performansı ortalama karesel hatanın karekökü (OKHK), ortalama mutlak hata (OMH), determinasyon katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (r) değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir. R^2 kriteri, gerçek değerler ile model çıktıları arasındaki ilişkinin seviyesini göstermek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Belirginlik katsayısı R^2 değeri, modelin gerçek ölçülen verilere uyumunu gösteren bir ölçüt olup, 0,70 üzerindeki değerlerin daha iyi bir tahmin performansı sağladığı bilinmektedir. Mükemmel bir uyum için bu kriterin değeri 1’e yakın olmalıdır (Özşahin ve Singer 2019). OKHK ve OMH değerleri ise; hata ölçüsü ölçütleridir, dolayısıyla düşük değerlere sahip olması model performansının iyi olduğunu göstermektedir. Hata ölçüsü değerlerinin sıfıra eşit olması demek mükemmel bir tahmin modelini göstermektedir (Gültepe 2019).

Yapılan analizlerde, dört eş numunede toplam her değişken için 345 veri kaydı bulunmaktadır. Verilerin, %70’i yani yaklaşık 241 ölçüm satırı modellerin eğitime aşamasında, geriye kalan %30’u yani 104 ölçüm satırı da modelleri test etme aşamasında kullanılmıştır. Veriler, program vasıtasıyla rastgele seçilmiştir.

4. BULGULAR

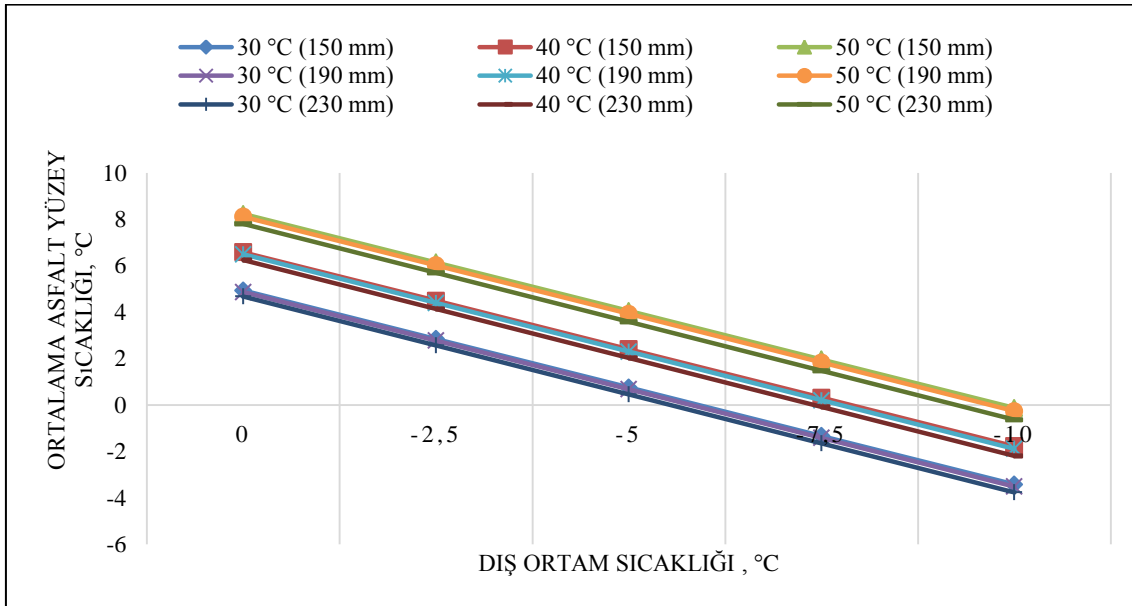
4.1 Hidronik Isıtma Sistemine Sahip Asfalt Kaplamanın ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Yapılan Termal Analiz Sonuçları

Yapılan termal analizler sonucu dış ortam sıcaklığı $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lere düştüğünde bile asfalt yüzey sıcaklığının $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ üstünde tutulabileceği gözlemlenmiştir. Hava sıcaklığı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ altına düşmeden istenilen aralık, derinlik ve giriş suyu sıcaklıklarında asfalt yüzey sıcaklığının $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üstünde tutulabileceği görülmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi genel olarak aşınma tabakası içerisinde yer alan sistemin üstyapı yüzeyinde daha yüksek sıcaklıklar oluşturduğu görülmektedir. Gömülü boruların yüzeye yakın olması durumunda yüzey sıcaklığının diğer tabakalardaki sistemlere göre daha fazla olacağı söylenebilir. Ayrıca giriş suyu sıcaklığının $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu analizlerde, giriş suyunun $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu sistemlere göre ortalama asfalt yüzey sıcaklıklarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Maksimum asfalt yüzey sıcaklığının, sistemin aşınma tabakasında olduğu modelde ve $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hava sıcaklığı ve $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ giriş suyu sıcaklığında yaklaşık 12 dereceye ulaştığı görülmektedir. Tüm modellerde, hava sıcaklığı yükseldikçe ortalama asfalt yüzey sıcaklıklarının da yükseldiği anlaşılmaktadır.



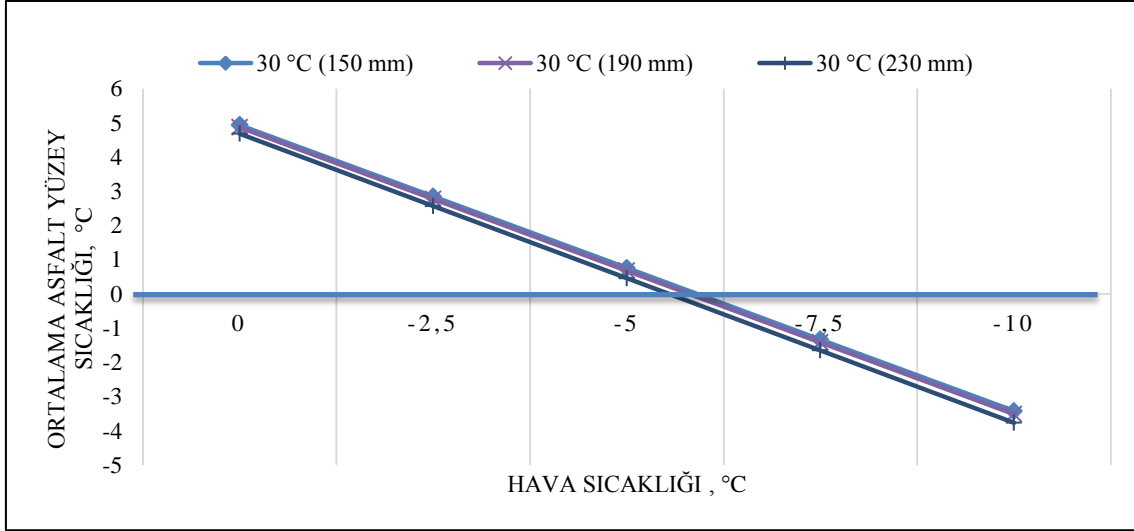
Şekil 4.1 150 mm boru aralığında aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında yer alan sistemin farklı hava ve giriş suyu sıcaklıklarına göre asfalt yüzey ortalama sıcaklıkları.

Şekil 4.2’de binder tabakası içerisinde yer alan ısıtma sisteminin farklı boru aralıklarındaki analiz sonuçları verilmiştir. 85 mm derinlikte; binder tabakasında yer alan sistemde 150 mm,190 mm ve 230 mm boru aralıklarında hazırlanan modellere ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Verilen grafiğe göre, boru aralık değişiminin asfalt yüzeyin ortalama sıcaklık değerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Asfalt yüzey sıcaklığını değiştiren unsurun giriş suyu sıcaklığı olduğu anlaşılmaktadır. Grafikten görüleceği üzere 50 °C su girişine sahip sistemin, 30 °C ve 40 °C giriş suyuna sahip sıcaklıklarda yapılan analizlere göre asfalt yüzey ortalama sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Yapılan termal analiz sonuçlarına göre asfalt yüzey ortalama sıcaklığının daha fazla olması için boru derinliğinin boru aralığından daha önemli olduğu ortaya konulmuştur. Maksimum asfalt yüzey ortalama sıcaklığının, boru aralığının 190 mm, 50 °C giriş suyu sıcaklığı ve hava sıcaklığının da 0 °C olduğu modelde, 8 °C’ye ulaştığı görülmektedir. Tüm modellerde hava sıcaklığı yükseldikçe asfalt yüzey ortalama sıcaklığının da yükseldiği görülmektedir. Ayrıca giriş suyu sıcaklığının 50 °C olduğu durumlarda da yüksek ortalama yüzey sıcaklıklarına ulaştığı görülmektedir.



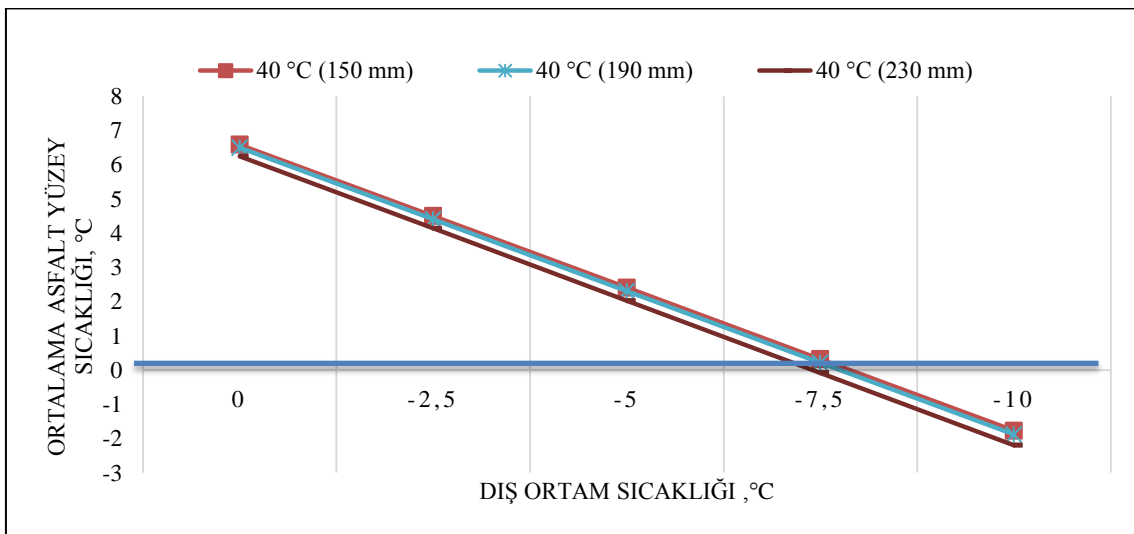
Şekil 4.2 Binder tabakasında yer alan, farklı boru aralıklarında, farklı hava sıcaklıkları ve farklı giriş suyu sıcaklıklarına göre asfalt yüzey ortalama sıcaklıkları.

Şekil 4.2 grafiğini her ayrı giriş suyu sıcaklığı için ayrı ayrı incelediğimizde üç farklı değerlendirme yapılabilmektedir. Şekil 4.3’de asfalt yüzey sıcaklığı 0 °C kabul edilirse 30 °C su girişine sahip sistemin, hava sıcaklığının -6 °C’ye kadar olduğu koşullarda etkili olduğu görülmektedir.



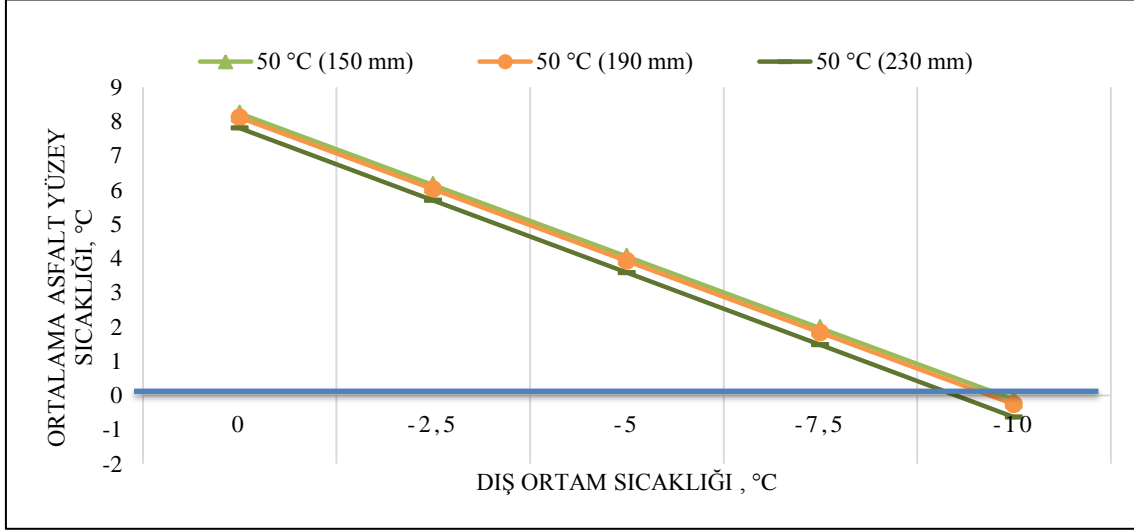
Şekil 4.3 30 °C su girişine sahip farklı boru aralıklarındaki sistemin asfalt yüzey sıcaklıkları.

Şekil 4.4’de asfalt yüzey sıcaklığı 0 °C kabul edilirse 40 °C su girişine sahip sistemin, hava sıcaklığının -7,5 °C’ye kadar olduğu koşullarda etkili olduğu görülmektedir.



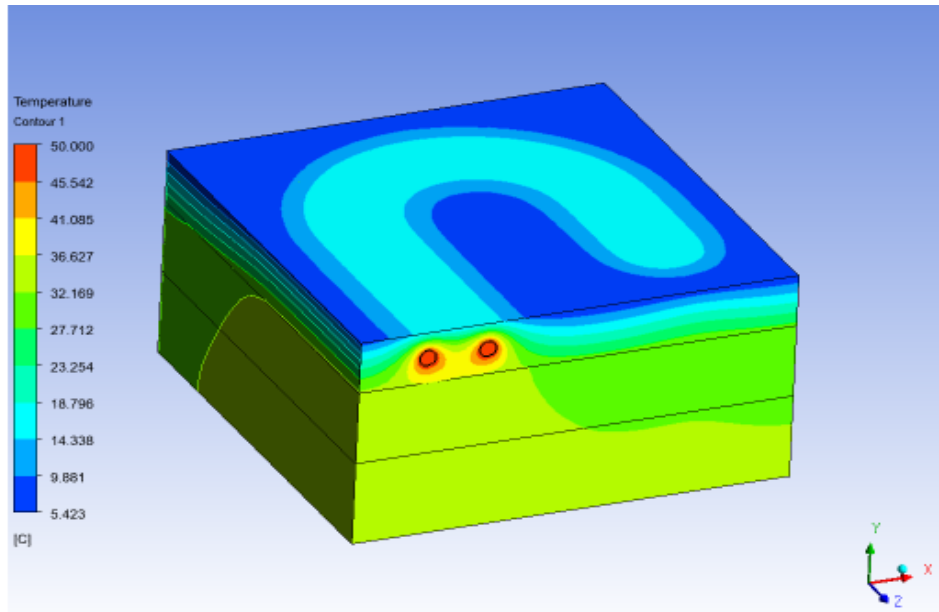
Şekil 4.4 40 °C su girişine sahip farklı boru aralıklarındaki sistemin asfalt yüzey sıcaklıkları.

Şekil 4.5’de asfalt yüzey sıcaklığı 0 °C kabul edilirse 50 °C su girişine sahip sistemin, hava sıcaklığının -10 °C’ye kadar olduğu koşullarda etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5 50 °C su girişine sahip farklı boru aralıklarındaki sistemin asfalt yüzey sıcaklıkları.

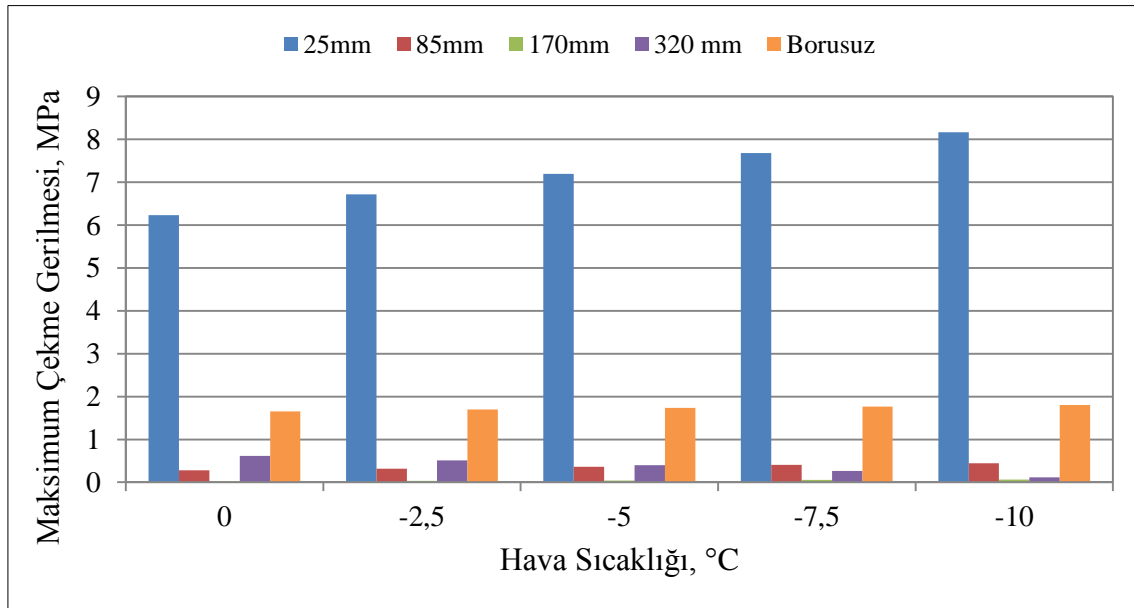
Şekil 4.6’da termal analiz sonucu en yüksek ortalama asfalt yüzey sıcaklığına (12°C) ulaşmış modelin (25 mm derinlik 150mm aralık, 50 °C giriş suyu 0 °C hava sıcaklığı) asfalt yüzey sıcaklık dağılımları verilmiştir. Şekil 8’e göre aşınma tabakasının yüzeyinde oluşan sıcaklıkların 5 °C ila 18 °C aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6 25 mm derinlik 150mm aralıkta, giriş suyu sıcaklığı 50 °C hava sıcaklığı 0 °C olduğu durumdaki asfalt yüzey ortalama sıcaklık dağılımı.

4.2 Hidronik Isıtma Sistemine Sahip Asfalt Kaplamasının ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı Kullanılarak Yapılan Yapısal Analiz Sonuçları

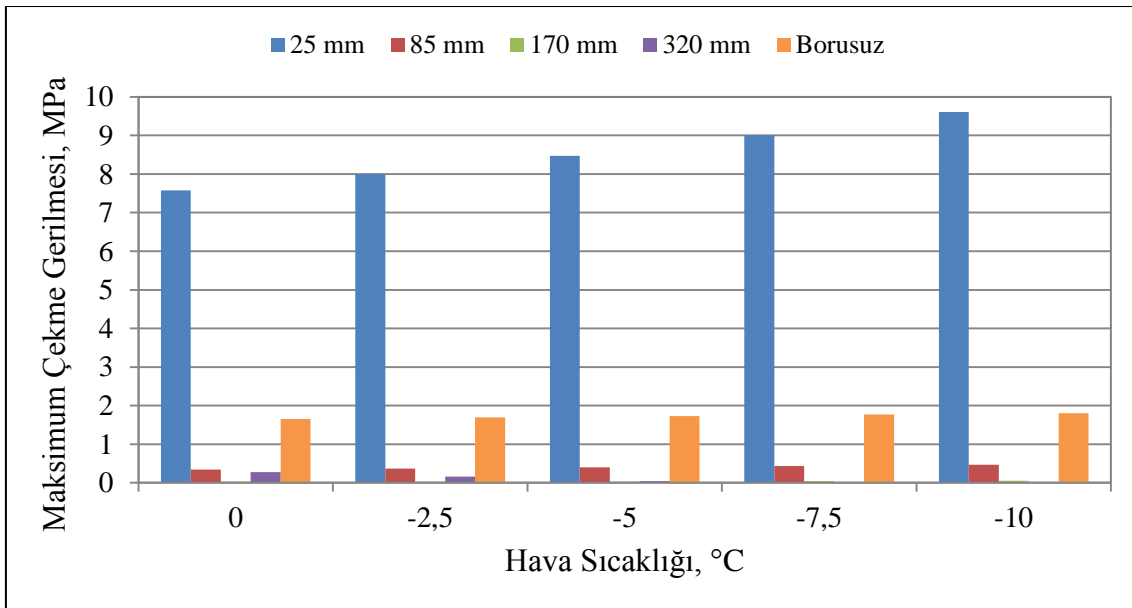
Asfalt kaplamaya uygulanan yapısal analizler sonucunda, hidronik ısıtma sistemine sahip bir üstyapının; gömülü boruların aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı durumlarda trafik yükü sonucunda, aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Analizde öncelikle oluşturulan modele termal analizler yapılmış sonrasında yapısal analizlere tabi tutulmuştur. Gömülü boruların farklı katmanlarda yer aldığı durumlarda, beş farklı hava sıcaklığı ve üç farklı giriş suyu sıcaklığında aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 4.7’de boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde 30 °C giriş suyu ile çalışan hidronik ısıtma sistemine sahip bir üstyapının beş farklı hava sıcaklığında, yükleme durumunda, aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.7 30 °C Giriş suyuyla boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri.

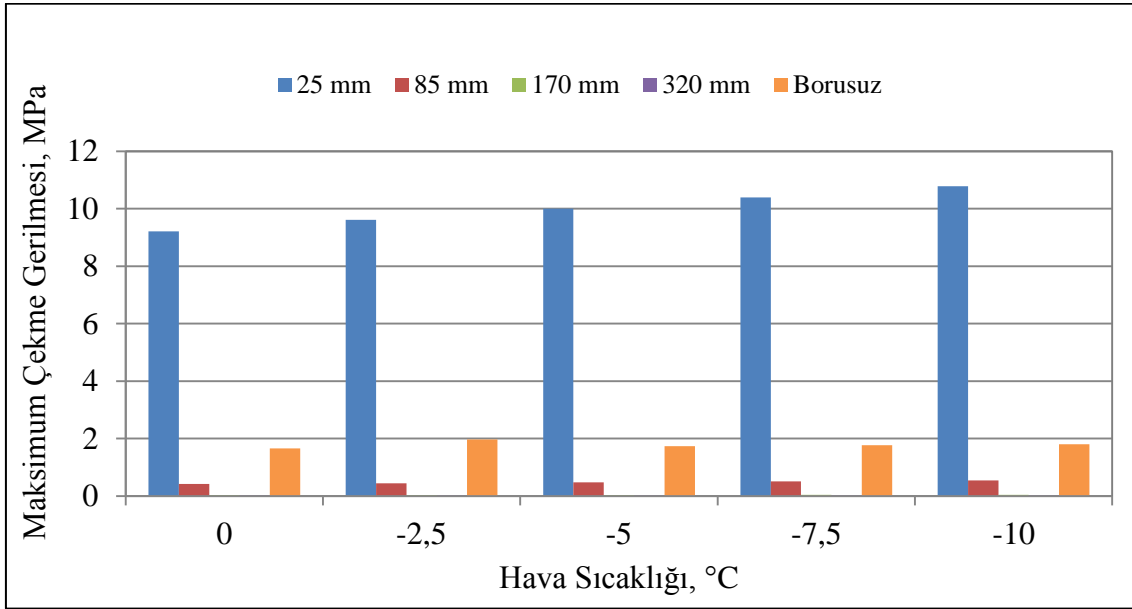
Şekil 4.7’ye göre ısıtmasız üstyapının aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerleri, gömülü boruların binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında olduğu durumlara göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Asfalt kaplamalı yollarda soğuk hava sıcaklıkları nedeniyle kaplama

içerisinde oluşan çekme gerilmeleri, düşük sıcaklık çatlaklarının oluşmasına sebep olmaktadır (Hunter 2015, Tunç 2004, Zeng 1995). İlgili çalışmalar, hidronik ısıtma sistemine sahip kaplamaların yükün neden olduğu ana gerilmeyi azaltabildiğini ve kaplamanın taşıma kapasitesini iyileştirdiğini bulmuştur (Ye 2018, Tan 2018). Dolayısıyla yol üstyapısında hidronik ısıtma sisteminin kullanılması ile ısınan üstyapıda, aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmelerinin azalması sonucu meydana gelecek düşük sıcaklık çatlaklarının önlenebileceği ve bu sayede hizmet ömrüne olumlu yönde katkı sağlanabileceği belirlenmiştir. Şekil 4.8’de gömülü boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde 40 °C giriş suyu ile çalışan hidronik ısıtma sistemine sahip bir üstyapının beş farklı hava sıcaklığında, aynı yükleme koşullarında, aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri verilmiştir. Zhu ve arkadaşlarının (2021) yaptıkları çalışmada hava sıcaklığının düşmesiyle asfalt betonundaki çekme gerilmelerinde artış olduğunu ve düşük sıcaklıktaki bir ortamda sıcaklık farkının büyük olması ve bunun da yüksek gerilmeler meydana getirerek, yapısal hasarlara yol açabileceğini söylemişlerdir. Yapısal analiz sonucu hava sıcaklığının düşmesiyle çekme gerilmelerinde artış olduğu belirlenmiş ve bu sebeple sistemin hava sıcaklığının 0°C’nin altına düşmeden çalıştırılmasının asfaltın hizmet ömrü açısından faydalı olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.8 40 °C Giriş suyuunda boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri.

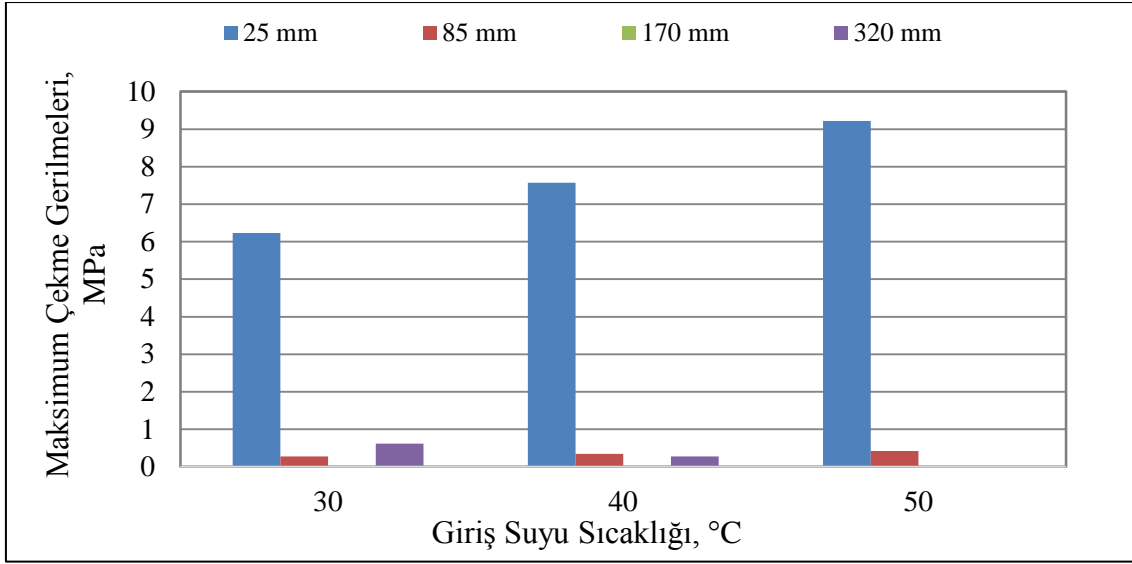
Şekil 4.9’da gömülü boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde 50 °C giriş suyu ile çalışan hidronik ısıtma sistemine sahip bir üstyapının beş farklı hava sıcaklığında yükleme durumunda aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri verilmiştir. Şekil 4.9’da verilen grafiğe göre gömülü boruların bitümlü temel tabakasında ve alttemel tabakasında bulunduğu durumlarda, aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmelerinin sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Düşük sıcaklık nedeniyle oluşan gerilmeler, bitümlü karışımın çekme dayanımına ulaştığında, kaplama yüzeyinde düşük sıcaklık çatlakları ortaya çıkmaktadır (Taşdemir 2003). Dolayısıyla hidronik ısıtma sisteminin kullanılması ile çekme gerilmesi değerlerinin sıfıra yaklaşması sonucu çatlak oluşumun önlenebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 4.9 50 °C Giriş suyunda boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri.

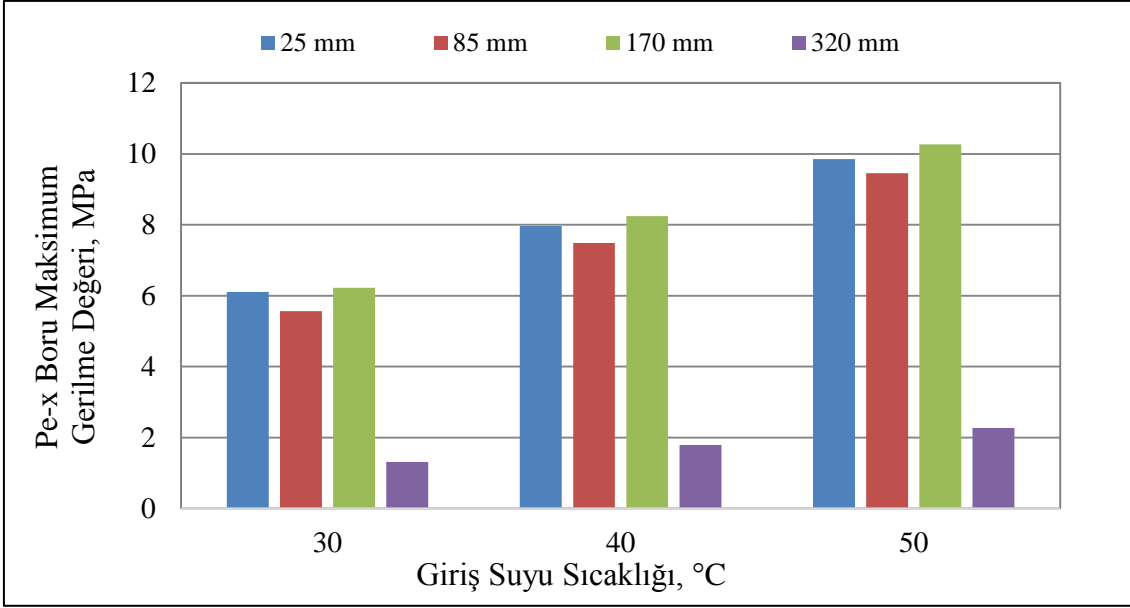
Şekil 4.7, 4.8, 4.9’da görüldüğü üzere farklı hava sıcaklıklarında yapılan analizler neticesinde hava sıcaklıkları azalırken çekme gerilmelerinin arttığı, gömülü boruların aşınma tabakasında olduğu durumda aşınma tabakasındaki çekme gerilmelerinin, gömülü boruların diğer tabakalarda yer aldığı duruma göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte gömülü boruların binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında olması durumunda gerilmelerin 10 MPa’dan 0,02 MPa’a kadar düştüğü, Cheng vd. (2018), Tan vd. (2012), Falchetto vd (2018)’nin yaptığı çalışmalarda da bu çekme gerilmesi değerlerinin önemsiz sayılabilecek derecede

düşük olduğu ve bu sonuca göre hidronik ısıtma sisteminin asfalt kaplamalarda kullanımının uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 4.10'da farklı giriş suyu sıcaklıklarının, 0 °C hava sıcaklığında yükleme durumunda aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmelerinin değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.10'da verilen grafiğe göre, boruların aşınma tabakasında ve binder tabakasında olduğu durumda; giriş suyu sıcaklığının artması ile birlikte aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmelerinin arttığı görülmektedir. Giriş suyu sıcaklığının artması ile birlikte asfalt yüzey sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasında meydana gelen sıcaklık farkından ötürü çekme gerilmesi değerlerinin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 4.10 0 °C hava sıcaklığında boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri.

Şekil 4.11'de yükleme durumunda hidronik ısıtma sistemine sahip üstyapıda yer alan pe-x borularda meydana gelen gerilme değerleri verilmiştir. Giriş suyu sıcaklığının artması ile pe-x boruda meydana gelen gerilmelerin arttığı görülmektedir. Pe-x boruda meydana gelen en düşük gerilme değerleri boruların alttemel tabakasında yer aldığı durumda gözlemlenmektedir. Pe-x boruda meydana gelen en yüksek gerilme değeri ise, gömülü boruların aşınma ve bitümlü temel tabakalarında olduğu sistemlerde görülmektedir. Katalog verilerine göre pe-x borunun akma noktasındaki gerilme dayanımı 22 MPa'dır (İnt. Kyn. 8). Dolayısıyla meydana gelen gerilme değerlerinin sınır değerlerden düşük olduğu ve hidronik ısıtma sistemi için pe-x boruların kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur.

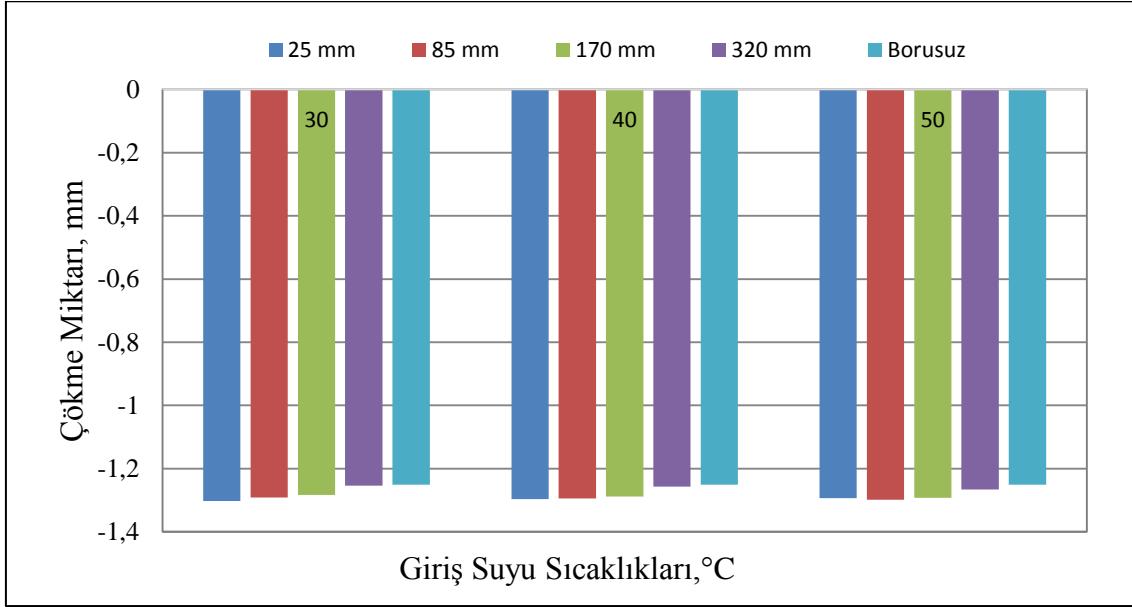


Şekil 4.11 Boruların farklı tabalarda yer aldığı sistemlerde 0 °C hava sıcaklığında farklı giriş suyuna sahip hidronik ısıtma sistemli üstyapının yükleme durumunda pe-x boruda meydana getirdiği gerilmeler.

Şekil 4.12 'de 0 °C hava sıcaklığında gömülü boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde farklı giriş suyu sıcaklıklarında meydana gelen tekerlek izinde deformasyon miktarları gösterilmektedir. Hidronik ısıtma sistemine sahip olmayan üstyapıya yapılan yükleme sonrasında çıkan çökme miktarı değerleri en düşük değerler olmakla beraber, gömülü boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde meydana gelen çökmelerin hidronik ısıtma sistemine sahip olmayan durumda meydana gelen çökme değerlerine yakın değerler olduğu görülmektedir. Genel olarak ortaya çıkan çökme miktarlarının birbirinden çok farklı olmaması sebebiyle hidronik ısıtma sisteminin kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur.

Soğuk hava koşullarında asfalt kaplamanın büzülmesi ve bağlayıcı malzeme olan bitümün rijit bir hale dönerek ağır trafik yükleri sonucunda gevrek bir davranış sergilemesiyle düşük sıcaklık çatlakları meydana gelmektedir (Tunç 2004, Taşdemir ve Ağar 2005, Bağdatlı ve Yıldırım 2017). Yapılan termal ve yapısal analizler sonucunda genel olarak; boruların binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı durumlarda hidronik ısıtma sistemi kullanan esnek üstyapıların aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinin, ısıtmasız asfalt kaplamanın aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinden düşük olduğu

belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak hidronik ısıtma sistemi kullanılan asfalt kaplamalı yollarda çatlak oluşumun azaltılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 4.12 0°C hava sıcaklığında boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde farklı giriş sularında meydana gelen tekerlek izinde deformasyon miktarları.

Özcanan ve Akpınar 2014 ve APA 2002’ye göre esnek üstyapı tabakalarında meydana gelen çekme gerilmeleri yorulma çatlaklarına neden olmaktadır. Giriş suyu sıcaklığının artması ile boruların bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı durumlarda aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinde azalma olduğu görülmüştür ve çekme gerilmesi değerlerinin azalması ile yorulma çatlak oluşumunun azalabileceği belirlenmiştir. Yapısal analiz sonuçlarına göre gömülü boruların aşınma tabakasında olduğu hidronik ısıtma sistemli üstyapılarda yüksek çekme gerilmesi değerleri olduğu saptanmıştır. Gömülü boru derinliğinin düşürülmesi sonucu kaplama yüzey sıcaklığının artması ile büzülme çatlaklarının oluşabileceği ve bu nedenle kaplamanın yapısal dayanıklılığını düşürebileceğini ortaya koymuşlardır (Feng ve Yin 2019, Zhu vd. 2021). Ayrıca yapılan çalışmalarda asfalt kaplamalar için yorulma ömrünün uzatılması için tabaka kalınlığının artırılması ile meydana gelecek çekme gerilmeleri azaltılabilmektedir (Diallo ve Akpınar 2020, APA 2002). Dolayısıyla boruların aşınma tabakasında yer aldığı durumlarda aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinin tabaka kalınlığının artırılması ile azaltılabileceği düşünülmektedir.

4.3 MATLAB Yazılımı Kullanılarak Yapılan İstatistik Analizi Sonuçları

Klasik bir istatistikî yöntem olan çoklu lineer regresyon (ÇLR) metodu, bu tez çalışması kapsamında kullanılmıştır. Özet olarak, deneysel çalışmadaki her bir numune için ölçülen ve kaydedilen veriler asfaltın ortalama sıcaklığını tahmin etmek için ayrı ayrı regresyon analizinde kullanılmıştır. Modelden çıkan sonuçlar her numune için çizelgelerle özetlenmiş sonrasında modellenen veriler ile gerçek/ölçülen verilerin hatasız karşılaştırılmaları hesaplanmış ve saçılım grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca, modellere eklenen diğer giriş değişkenlerinin (Zaman(dakika)(x_1), giriş su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)(x_2), hava sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)(x_3) ve çıkış su sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)(x_4)) etkisi de modellenen değişken olan asfalt yüzeyin ortalama sıcaklığına nasıl etki ettiği de tartışılmıştır. İncelemeler sonucunda, 4 numunenin en iyi modellerinin sonuçlarının birbirlerine benzer ve yakın olduğu görülmüştür.

Regresyon analizine başlamadan önce, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken ile ilişkisini ortaya koyan Pearson korelasyon testi yapılmıştır. Test sonuçları iki kuyruklu hipotez testi ve 0,01 (%1) anlamlılık düzeyinde incelenmiştir. Çizelge 4.1'te her bir bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkene olan korelasyonları verilmiştir. Çizelgeye göre, zaman, giriş suyu sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklığının asfaltın ortalama yüzey sıcaklığı ile korelasyon katsayıları sırasıyla +0,799 +0,081 ve +0,086 olarak hesaplanmıştır. Buna göre, zamanın asfalt yüzeyin ortalama sıcaklığı ile istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir ilişkisi olduğu, giriş suyu sıcaklığı ve çıkış suyu ile de istatistiksel olarak anlamlı olduğu söylenebilir. Giriş suyu sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklıklarının asfaltın ortalama yüzey sıcaklığı ile korelasyonu düşük olmasına rağmen istatistiksel olarak anlamlı olduğu için modellerde kullanılmıştır. Dış ortam sıcaklığının asfaltın ortalama yüzey sıcaklığı ile istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir, ancak fiziksel olarak dış ortamın etkisi kurulan deneysel sisteme etkisi olduğu düşünülerek modellerde kullanılmıştır. Bu durum, dış ortam sıcaklığının modellere eklenmesiyle oluşan hata değerleri ve grafikleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1 Korelasyonlar matrisi.

	Zaman (dk)	Giriş su sıcaklığı (°C)	Çıkış su sıcaklığı (°C)	Hava sıcaklığı (°C)	Asfaltın ortalama yüzey Sıcaklığı (°C)
Zaman(dk)	1	-0,144*	-0,156*	-0,004	0,799*
Giriş su sıcaklığı (°C)	- 0,144*	1	0,868*	0,205*	0,081*
Çıkış su sıcaklığı (°C)	- 0,156*	0,868*	1	0,137*	0,086*
Dış ortam hava sıcaklığı (°C)	-0,004	0,205*	0,137*	1	0,044
Asfaltın ortalama yüzey sıcaklığı (°C)	0,799*	0,081*	0,086*	0,044	1

* : Korelasyon, iki kuyruklu hipotez testinde 0,01 (%1) anlamlılık düzeyinde anlamlıdır. Yani, diğer değişkenlerin modellenen değişken (Asfaltın ortalama sıcaklığı (°C)) ile ilişkisi istatistiksel olarak anlamlıdır.

Aşağıdaki paragraflarda her numune için ayrı ayrı incelemeler yapılmıştır. Dört eş numune için eğitme ve test aşamasındaki sonuçlar gösterilmiştir. Aynı zamanda eğitme ve test aşamından çıkan sonuçlara göre oluşturulmuş saçılma grafikleri ve oluşan model denklemleri verilmiştir. Analize Numune 1 ile başlanılmıştır. Numune 1’de toplam her değişken için 345 veri kaydı bulunmaktadır. Verilerin, %70’i yani yaklaşık 241 ölçüm satırı, modellerin eğitme aşamasında geriye kalan %30’u yani 104 ölçüm satırı da modelleri test etme aşamasında kullanılmıştır. Veriler, program vasıtasıyla rastgele seçilmiştir. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te, Numune 1’e ait çoklu lineer regresyon analizindeki, eğitme ve test aşamasında oluşan modellerin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren sayısal değerlendirmeler verilmiştir. Çizelge 4.2 ve 4.3’e göre eğitme ve test aşamasında en küçük hata ve en yüksek R^2 değerlerine göre 4 giriş değişkenine ve 1 çıkış değişkenine sahip olan ÇLR (4.1) modelinin en iyi model olduğu görülmektedir. Modelde değişken sayısının artması ile birlikte korelasyon ve belirginlik katsayısının arttığı ve hata payı değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.2 Numune 1 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin eğitime aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri.

Model	Giriş Değişkenleri (x _n)	Modellenen Değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,13	1,75	+0,82	0,68
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,07	1,71	+0,84	0,70
ÇLR (3.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava Sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,06	1,69	+0,84	0,70
ÇLR (4.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C) (x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,94	1,56	+0,86	0,74

Çizelge 4.3 Numune 1 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri.

Model	Giriş Değişkenleri(x _n)	Modellenen Değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,10	1,70	+0,65	0,42
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,95	1,65	+0,75	0,56
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,01	1,69	+0,74	0,54
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk)(x ₁), Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C) (x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,95	1,62	+0,77	0,60

*: En iyi model olarak seçildi.

Çizelge 4.2'e göre ÇLR (1.1)'de, OKHK, OMH, r ve R² değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 2,13; 1,75; +0,82 ve 0,68 olmuştur. Çizelge 4.3'e göre ÇLR (1.1)'de, OKHK, OMH, r ve R² değerleri test aşamasında sırasıyla 2,10; 1,70; +0,65 ve 0,42 olmuştur. ÇLR (2.1)'de, OKHK, OMH, r ve R² değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 2,07; 1,71; +0,84 ve 0,70, test aşamasında sırasıyla 1,95; 1,65; +0,75 ve 0,56 olmuştur. ÇLR (3.1)'de OKHK, OMH, r ve R² değerleri eğitime aşamasında sırasıyla, 2,06 1,69 +0,84 ve 0,70 test aşamasında sırasıyla 2,01; 1,69; +0,74 ve 0,54 olmuştur. ÇLR (4.1)'de OKHK, OMH, r ve R² değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 1,94; 1,56; +0,86 ve 0,74 OKHK, OMH, r ve R² değerleri test aşamasında sırasıyla 1,95; 1,62; +0,77 ve 0,60

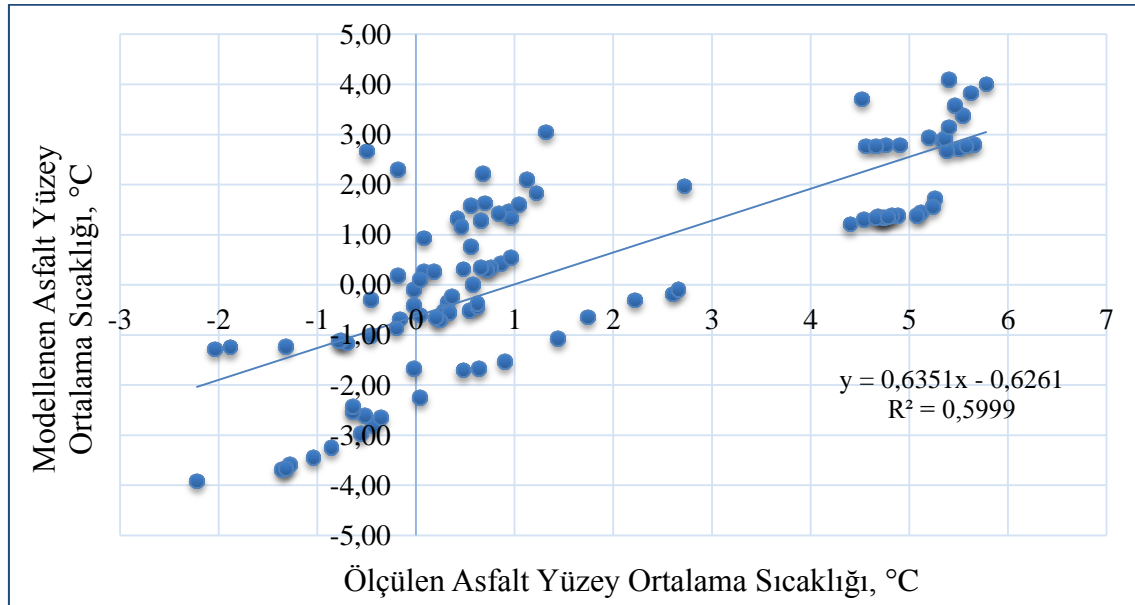
olmuştur. Görüldüğü gibi giriş değişkeni eklendikçe hata miktarı azalmaktadır. Çizelge 4.4’de Numune 1 verileri ile farklı giriş değişkenleri kullanılarak yapılan analiz sonucu oluşan lineer modellerin denklemleri verilmiştir. Verilen denlemler içerisinde en iyi sonuçları veren model denklemi ÇLR (4.1) olmuştur.

Çizelge 4.4 Numune 1 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Oluşan Lineer Modellerin Denklemleri
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x_1)	$y = - 3.8815 + 0.0842(x_1)$
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) (x_2)	$y = - 7.821 + 0.0884(x_1) + 0.1(x_2)$
ÇLR (3.1)	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) (x_2) Hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) (x_3)	$y = - 6.5254 + 0.0899(x_1) + 0.1082(x_2) + 0.2259(x_3)$
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) (x_2) Hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) (x_3) Çıkış su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) (x_4)	$y = - 8.5025 + 0.0881(x_1) - 0.183(x_2) + 0.0346(x_3) + 0.3397(x_4)$

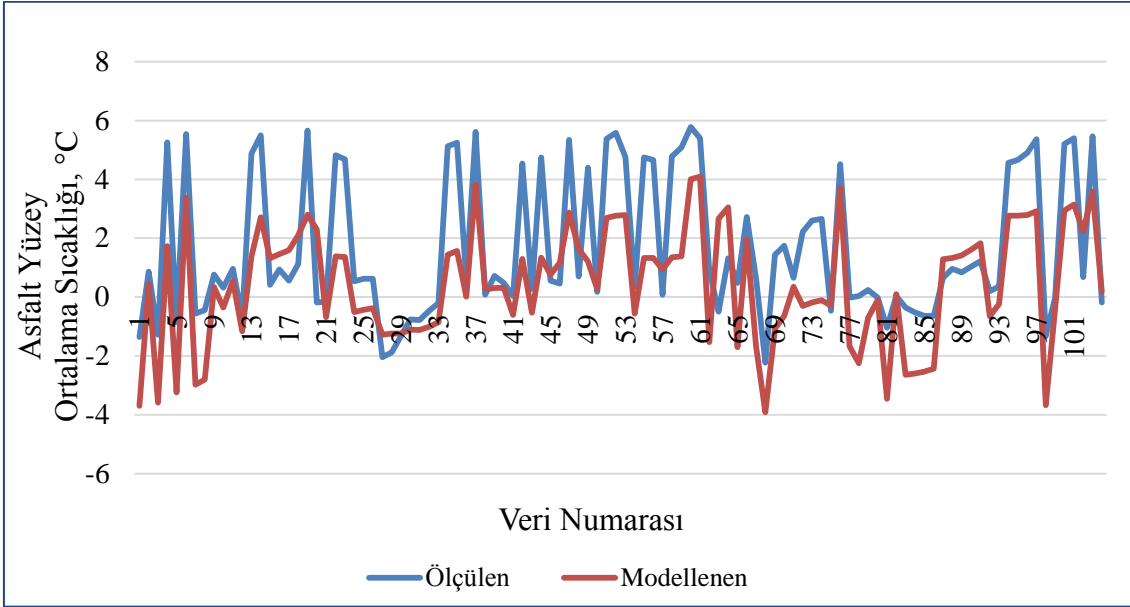
*: En iyi model denklemi olarak seçildi.

Şekil 4.13’de görüldüğü üzere modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı ile ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı değerlerine göre analiz sonucu ortaya çıkan saçılma grafiği verilmiştir.



Şekil 4.13 Numune 1 ÇLR 4.1’in test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği.

Şekil 4.14'de de modellenen ve ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığının grafiksel gösterimi verilmiştir. Grafiğe göre tahmin modeli değerleri ile gerçek ölçülen değerlerin birbirlerine yakın oldukları ve paralellik gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 4.14 Numune 1 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Numune 2'de de toplam her değişken için 345 veri kaydı bulunmaktadır. Verilerin, %70'si yani yaklaşık 241 ölçüm satırı, modellerin eğitime aşamasında geriye kalan %30'u yani 104 ölçüm satırı da modelleri test etme aşamasında kullanılmıştır. Veriler, program vasıtasıyla rastgele seçtirilmiştir.

Çizelge 4.5 ve çizelge 4.6'te, Numune 2'ye ait çoklu lineer regresyon analizindeki, eğitime ve test aşamasında oluşan modellerin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren sayısal değerlendirmeler verilmiştir. Çizelge 4.6'ya göre en iyi model olarak ÇLR (3.1) ve ÇLR (4.1) seçilebilir. Az değişken kullanma açısında ÇLR (3.1) modeli de kullanılabilir. Çizelge 4.5'ya göre ÇLR (1.1)'de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 2,15; 1,69; +0,88 ve 0,77 Çizelge 4.6'ye göre test aşamasında sırasıyla 2,29;1,79; +0,69 ve 0,47 olmuştur. ÇLR (2.1)'de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 1,98; 1,61; +0,89 ve 0,80 test aşamasında sırasıyla 1,72; 1,40; +0,84 ve 0,71 olmuştur.

Çizelge 4.5 Numune 2 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Modellenen değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,15	1,69	+0,88	0,77
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı(°C)(x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,98	1,61	+0,89	0,80
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,97	1,60	+0,90	0,81
ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,96	1,61	+0,90	0,81

Çizelge 4.6 Numune 2 için çoklu lineer regresyon analizi modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri değerleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Modellenen değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,29	1,79	+0,69	0,47
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,72	1,40	+0,84	0,71
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,71	1,37	+0,85	0,72
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklık(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,73	1,37	+0,84	0,71

*: En iyi model olarak seçildi.

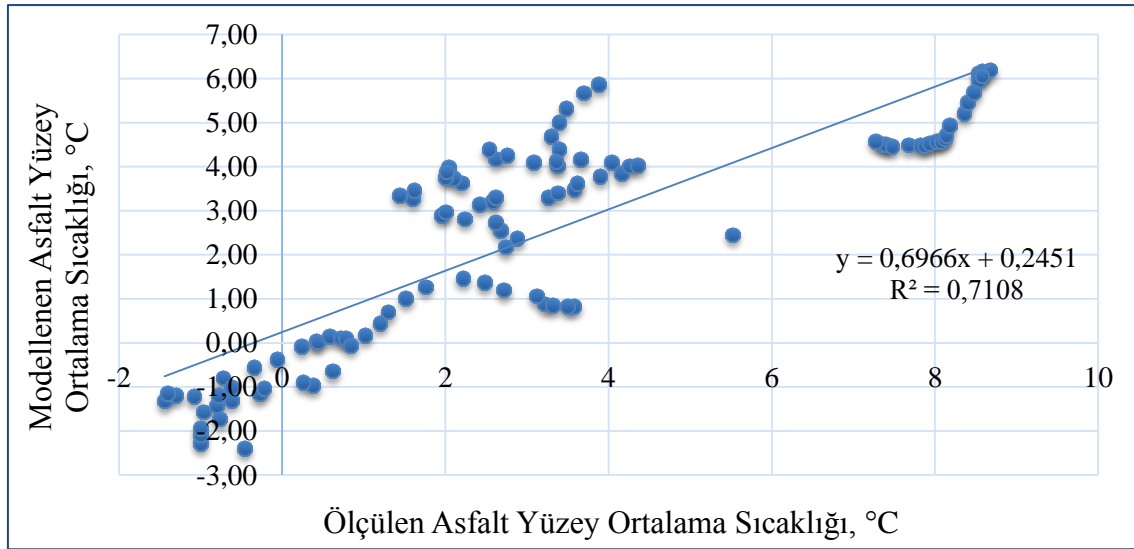
ÇLR (3.1)'de OKHK, OMH, r ve R² değerleri eğitim aşamasında sırasıyla, 1,97 1,60 +0,90 ve 0,81 test aşamasında sırasıyla 1,71; 1,37; +0,85 ve 0,72 olmuştur. ÇLR (4.1)'de OKHK, OMH, r ve R² değerleri eğitim aşamasında sırasıyla 1,96; 1,61; +0,90 ve 0,81 OKHK, OMH, r ve R² değerleri test aşamasında sırasıyla 1,73; 1,37; +0,84 ve 0,71 olmuştur. Görüldüğü gibi Numune 2'de de giriş değişkeni eklendikçe hata miktarının azaldığı görülmektedir. Çizelge 4.7'de Numune 2 verileri ile farklı giriş değişkenleri kullanılarak yapılan analiz sonucu oluşan lineer modellerin denklemleri verilmiştir. Verilen denklemler içersinde en iyi sonucu veren model denkleminin ÇLR (4.1) olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7 Numune 2 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Oluşan lineer modellerin denklemleri
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x_1)	$y = -4.0685 + 0.1073(x_1)$
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı (°C) (x_2)	$y = -8.166 + 0.1097(x_1) + 0.1012(x_2)$
ÇLR (3.1)	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı (°C) (x_2) Hava sıcaklığı (°C) (x_3)	$y = -7.1481 + 0.1073(x_1) + 0.1057(x_2) + 0.1615(x_3)$
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı (°C) (x_2) Hava sıcaklığı (°C) (x_3) Çıkış su sıcaklığı (°C) (x_4)	$y = -5.7761 + 0.1057(x_1) + 0.1630(x_2) + 0.2376(x_3) - 0.0908(x_4)$

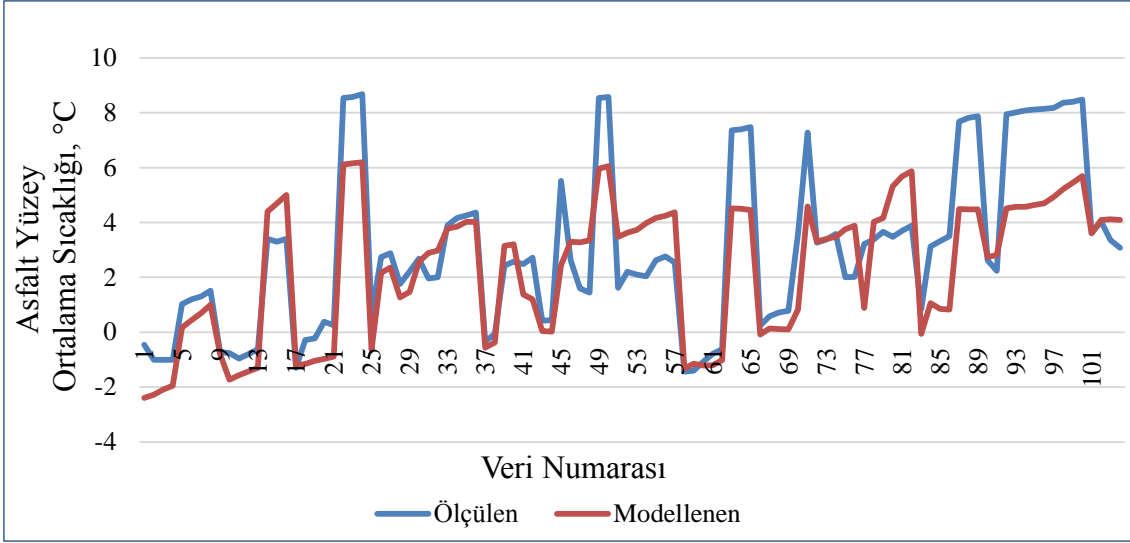
*:En iyi model denklemleri olarak seçildi

Şekil 4.15’de görüldüğü üzere modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı ile ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı değerlerine göre analiz sonucu ortaya çıkan saçılma grafiği verilmiştir.



Şekil 4.15 Numune 2 için ÇLR 4.1 'de test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği.

Şekil 4.16’da modellenen ve ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığının grafiksel gösterimi verilmiştir. Grafiğe göre tahmin modeli değerleri ile gerçek ölçülen değerlerin birbirlerine yakın oldukları ve paralellik gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 4.16 Numune 2 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Numune 3’de de toplam her değişken için 345 veri kaydı bulunmaktadır. Verilerin, %70’si yani yaklaşık 241 ölçüm satırı, modellerin eğitime aşamasında geriye kalan %30’u yani 104 ölçüm satırı da modelleri test etme aşamasında kullanılmıştır. Veriler, program vasıtasıyla rastgele seçtirilmiştir.

Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da, Numune 3’e ait çoklu lineer regresyon analizindeki, eğitime ve test aşamasında oluşan modellerin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren sayısal değerlendirmeler verilmiştir. Çizelge 4.9’a göre eğitime ve test aşamasında en küçük hata ve en yüksek R^2 değerlerine göre 4 giriş değişkenine ve 1 çıkış değişkenine sahip olan ÇLR (4.1) modelinin en iyi model olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.8’e göre ÇLR (1.1)’de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 2,19; 1,77; +0,84 ve 0,71 Çizelge 4.10’a göre test aşamasında sırasıyla 1,89; 1,71; +0,72 ve 0,52 olmuştur. ÇLR (2.1)’de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 2,18; 1,77; +0,84 ve 0,71, test aşamasında sırasıyla 1,89; 1,71; +0,72 ve 0,52 olmuştur. ÇLR (3.1)’de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitime aşamasında sırasıyla 2,09; 1,59; +0,85 ve 0,73 test aşamasında sırasıyla 1,77; 1,54; +0,75 ve 0,57 olmuştur.

Çizelge 4.8 Numune 3 için çoklu lineer regresyon modellerinin eğitime aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri değerleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Modellenen değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,19	1,77	+0,84	0,71
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,18	1,77	+0,84	0,71
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x ₁) giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,09	1,59	+0,85	0,73
ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) hava sıcaklığı(°C)(x ₃) çıkış su sıcaklık(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,90	1,41	+0,88	0,78

Çizelge 4.9 Numune 3 için çoklu lineer regresyon modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri değerleri.

Model	Giriş(ler) değişkenleri	Modellenen değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,89	1,71	+0,72	0,52
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,89	1,71	+0,72	0,52
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x ₁) giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) hava sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,77	1,54	+0,75	0,57
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk)(x ₁) giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) hava sıcaklığı(°C)(x ₃) çıkış su sıcaklık(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,67	1,34	+0,86	0,74

*: En iyi model olarak seçildi.

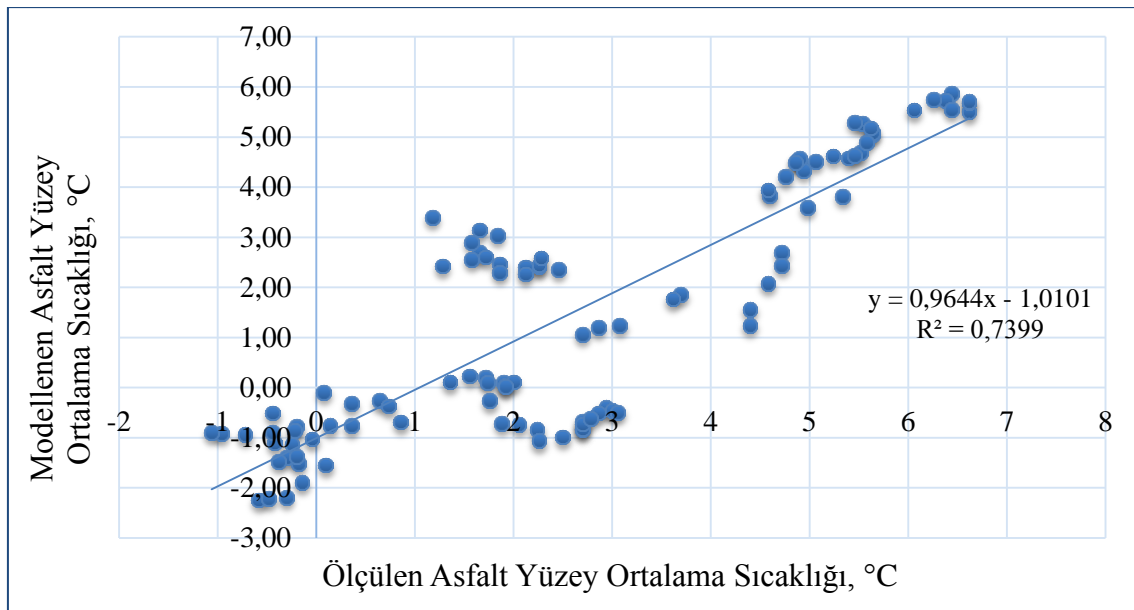
Çizelge 4.8 ve 4.9'a göre en iyi model olan ÇLR (4.1) modelinde R² değerleri, eğitim ve test aşamalarında sırasıyla 0,78 ve 0,74 olmuştur. OKHK ve OMH değerleri eğitim safhasında sırasıyla 1,90 ve 1,41, test aşamasında ise sırasıyla 1,67 ve 1,34 hata değerlerini vermiştir. Korelasyon katsayısı değeri olan r değerleri test ve eğitim aşamasında sırasıyla +0,88 ve +0,86 değerlerini vermiştir. Görüldüğü gibi Numune 3'de de giriş değişkeni eklendikçe hata miktarı azalmaktadır. Çizelge 4.10'da Numune 3 verileri ile farklı giriş değişkenleri kullanılarak yapılan analiz sonucu oluşan lineer modellerin denklemleri verilmiştir.

Çizelge 4.10 Numune 3 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Oluşan lineer modellerin denklemleri
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x_1)	$y = - 3.766 + 0.093(x_1)$
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı (°C) (x_2)	$y = - 2.2018 + 0.0916(x_1) - 0.0385(x_2)$
ÇLR (3.1)	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı (°C) (x_2) Hava sıcaklığı(°C) (x_3)	$y = + 6.0664 + 0.0903(x_1) - 0.1287(x_2) + 0.6028(x_3)$
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı (°C) (x_2) Hava sıcaklığı(°C) (x_3) Çıkış su sıcaklığı(°C) (x_4)	$y = + 4.2244 + 0.0932(x_1) - 0.3816(x_2) + 0.6204(x_3) + 0.352(x_4)$

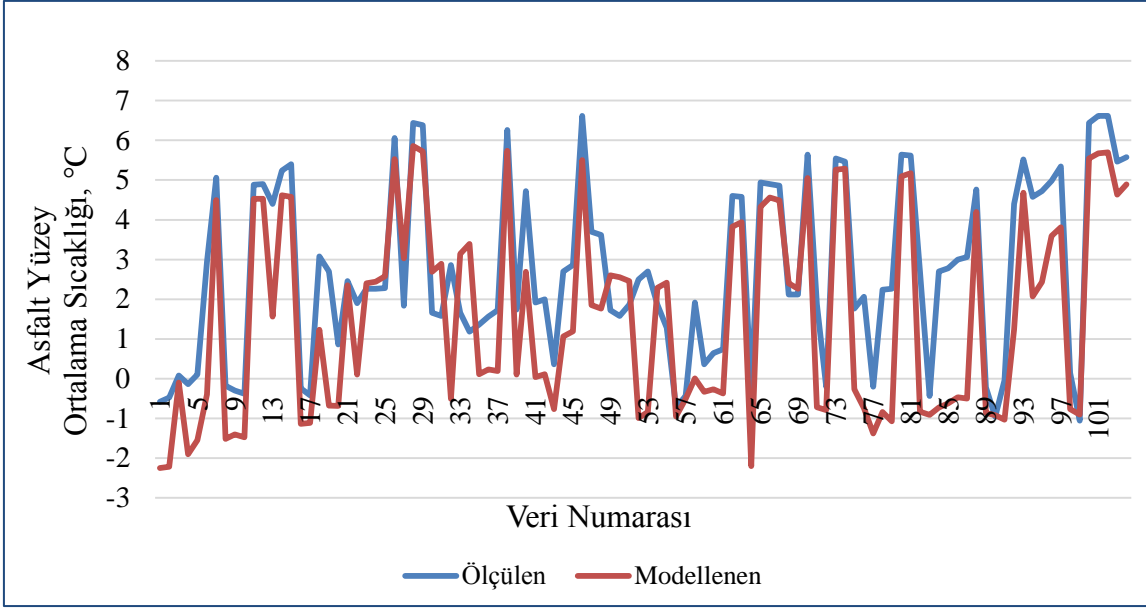
*: En iyi model denklemi olarak seçildi.

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı ile ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı değerlerine göre, analiz sonucu ortaya çıkan saçılma grafiği verilmiştir.



Şekil 4.17 Numune 3 için ÇLR 4.1 'in test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği.

Şekil 4.18’de modellenen ve ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığının grafiksel gösterimi verilmiştir. Grafiğe göre tahmin modeli değerleri ile gerçek ölçülen değerlerin birbirlerine yakın oldukları ve paralellik gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 4.18 Numune 3 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Numune 4’de de toplam her değişken için 345 veri kaydı bulunmaktadır. Verilerin, %70’si yani yaklaşık 241 ölçüm satırı, modellerin eğitme aşamasında geriye kalan %30’u yani 104 ölçüm satırı da modelleri test etme aşamasında kullanılmıştır. Veriler, program vasıtasıyla rastgele seçtirilmiştir.

Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13’te, Numune 4’e ait çoklu lineer regresyon analizindeki, eğitme ve test aşamasında oluşan modellerin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren sayısal değerlendirmeler verilmiştir. Çizelgelere göre eğitme ve test aşamasında en küçük hata ve en yüksek R^2 değerlerine göre 4 giriş değişkenine ve 1 çıkış değişkenine sahip olan ÇLR (4.1) modelinin en iyi model olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.11’ye göre ÇLR (1.1)’de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitme aşamasında sırasıyla 2,84; 2,37; +0,82 ve 0,67 olmuştur. Çizelge 4.12’e göre ÇLR (1.1)’de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri test aşamasında sırasıyla 3,11; 2,81; +0,54 ve 0,29 olmuştur. ÇLR 2.1’de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitme aşamasında sırasıyla 2,58; 2,16; +0,85 ve 0,73 test aşamasında sırasıyla 2,65; 2,48; +0,73 ve 0,53 olmuştur. ÇLR (3.1)’de, OKHK, OMH, r ve R^2 değerleri eğitme aşamasında sırasıyla 2,46; 1,98; +0,87 ve 0,75 test aşamasında sırasıyla 2,58; 2,35; +0,74 ve 0,54 olmuştur.

Çizelge 4.11 Numune 4 için çoklu lineer regresyon modellerinin eğitime aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri değerleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Modellenen Değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,84	2,37	+0,82	0,67
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,58	2,16	+0,85	0,73
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,46	1,98	+0,87	0,75
ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,99	1,58	+0,91	0,84

Çizelge 4.12 Numune 4 için çoklu lineer regresyon modellerinin test aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri değerleri.

Model	Giriş Değişkenleri	Modellenen Değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x ₁)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	3,11	2,81	+0,54	0,29
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x ₁) giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,65	2,48	+0,73	0,53
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	2,58	2,35	+0,74	0,54
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklık(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,88	1,73	+0,88	0,78

*: En iyi model olarak seçildi.

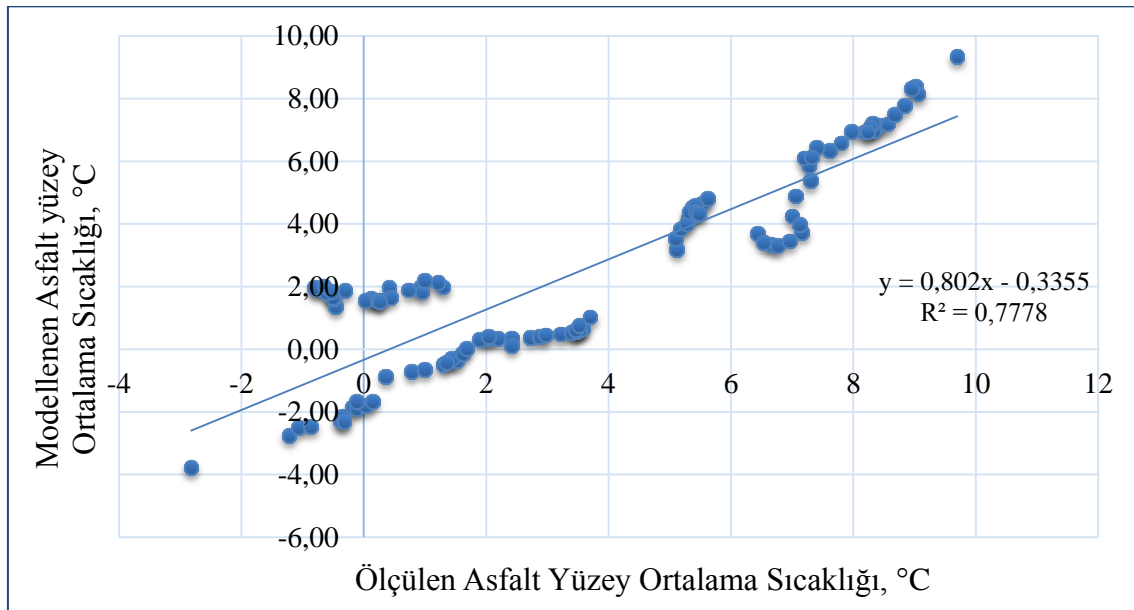
Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'ye göre en iyi model olan ÇLR (4.1)'de R² değerleri, eğitim ve test aşamalarında sırasıyla 0,84 ve 0,78 olmuştur. OKHK ve OMH değerleri eğitime safhasında sırasıyla 1,90 ve 1,58 test aşamasında ise sırasıyla 1,88 ve 1,73 hata değerlerini vermiştir. Korelasyon katsayısı değeri olan r değerleri test ve eğitim aşamasında sırasıyla +0,91 ve +0,88 değerlerini vermiştir. Görüldüğü gibi Numune 4'de de giriş değişkeni eklendikçe hata miktarı azalmaktadır. Çizelge 4.13'de Numune 4 verileri ile farklı giriş değişkenleri kullanılarak yapılan analiz sonucu oluşan lineer modellerin denklemleri verilmiştir.

Çizelge 4.13 Numune 4 verileri ile oluşan lineer modellerin denklemleri.

Model	Giriş(ler) değişkenleri	Oluşan lineer modellerin denklemleri
ÇLR (1.1)	Zaman(dk) (x_1)	$y = - 4.347 + 0.1098(x_1)$
ÇLR (2.1)	Zaman(dk) (x_1) Giriş su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)(x_2)	$y = - 13.6108 + 0.1149(x_1) + 0.2483(x_2)$
ÇLR (3.1)	Zaman(dk)(x_1) Giriş su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)(x_2) Hava sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$) (x_3)	$y = - 3.7867 + 0.116(x_1) + 0.1627(x_2) + 0.6284(x_3)$
ÇLR (4.1)*	Zaman(dk)(x_1) Giriş su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)(x_2) Hava sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)(x_3) Çıkış su sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)(x_4)	$y = + 6.764 + 0.1168(x_1) + 0.9591(x_2) + 1.083(x_3) - 1.03(x_4)$

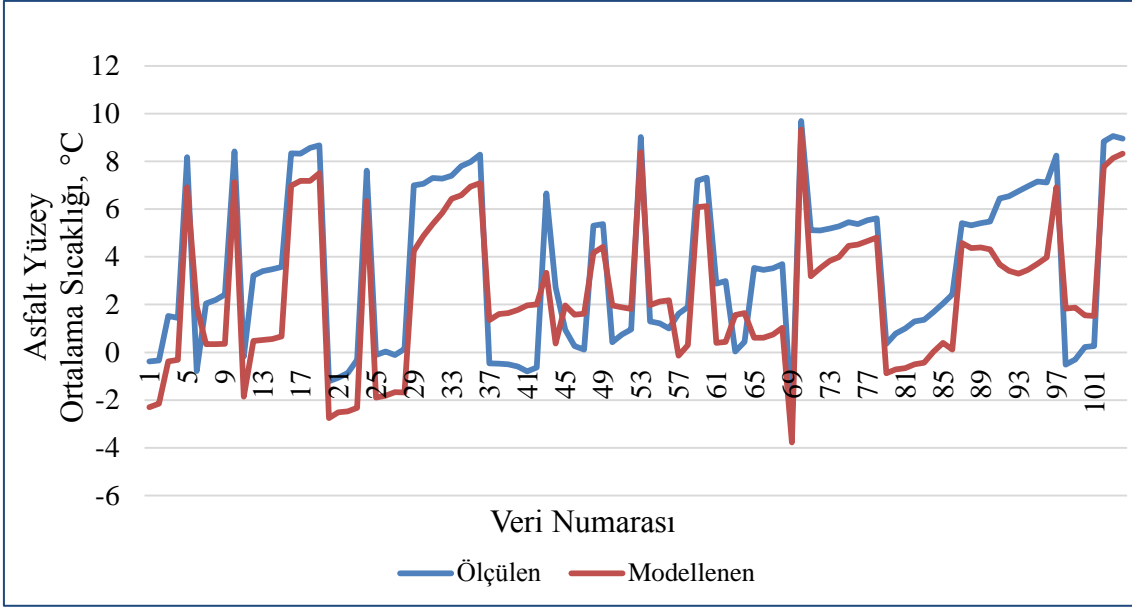
*: En iyi model denklemi olarak seçildi.

Şekil 4.19'da görüldüğü üzere modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı ile ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığı değerlerine göre analiz sonucu ortaya çıkan saçılma grafiği verilmiştir.



Şekil 4.19 Numune 4 için ÇLR 4.1 'in test aşamasındaki ölçülen ve modelden çıkan asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin saçılma grafiği.

Şekil 4.20'de de modellenen ve ölçülen asfalt yüzey ortalama sıcaklığının grafiksel gösterimi verilmiştir. Grafiğe göre tahmin modeli değerleri ile gerçek ölçülen değerlerin birbirlerine yakın oldukları ve paralellik gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 4.20 Numune 4 için ölçülen ve modellenen asfalt yüzey ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Genel itibariyle, yapılan analizler sonucu, 4 farklı çoklu lineer regresyon modellerinden en iyi R^2 değerini genellikle 4 giriş değişkeninde ve 1 çıkış değişkenine sahip olan ÇLR (4.1) modelinin verdiği görülmektedir. R^2 değerinin, giriş değişkenlerinin artması ile arttığı söylenebilir. Bu da asfalt yüzey sıcaklığı tahmini için ne kadar fazla sayıda modele etkiyen ve fiziksel olarak anlamlı giriş değişkeni olursa tahmin modelinin daha doğru sonuç vereceği anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.14'de 4 numune için ayrı ayrı en iyi model olan ÇLR (4.1)'lerin yapılan çoklu lineer regresyon analizleri sonucunda, 4 numunenin verileri ile ayrı ayrı oluşturulan modellerin birbirine yakın oldukları ve benzerlik gösterdikleri söylenebilir. Genel olarak, korelasyon katsayısı değerlerinin tüm ÇLR (4.1) modellerinde +0,80 ve üzeri değerler aldığı görülmektedir. Korelasyon katsayılarının +1 e yakın olması bağımlı değişkenimiz olan asfalt yüzey ortalama sıcaklığının, bağımsız değişkenlerle (zaman, giriş suyu sıcaklığı, hava sıcaklığı, çıkış suyu sıcaklığı) olan ilişkisinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.14 4 Numune için en iyi çoklu lineer regresyon modellerinin eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, r ve R² değerleri değerleri.

Numune	Model	Giriş Değişkenleri	Modellenen değişken (y)	OKHK	OMH	r	R ²
1	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁), Giriş su sıcaklığı (°C) (x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,95	1,62	+0,77	0,60
2	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklık(°C) (x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,73	1,37	+0,84	0,71
3	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) hava sıcaklığı(°C)(x ₃) çıkış su sıcaklık(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,67	1,34	+0,86	0,74
4	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) hava sıcaklığı(°C)(x ₃) çıkış su sıcaklık(°C)(x ₄)	Asfalt Yüzey Ortalama Sıcaklığı (°C)	1,88	1,73	+0,88	0,78

Çizelge 4.15'e göre, yapılan çoklu lineer regresyon analizi sonucu verilen model denklemlerinden tüm bağımsız değişkenlerin kullanıldığı durumda daha iyi sonuçlar veren model denklemleri verilmiştir. Ortaya konulan model denklemleri sonucu çıkan hata değerleri ÇLR (4.1) denklemlerinde OKHK değerleri ortalama 1,8 ve OMH değerleri ise 1,5 olmuştur. Hata değerleri 0 ve ∞ arasında değer almaktadır. Düşük hata değerlerine yakın tahmin modelleri daha iyi performans gösterirler. Hata değerinin sıfır (0) olması modelin hiç hata yapmadığını göstermektedir. Yapılan analizdeki hata değerleri ile oluşturulan modellerin tahmin için kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.15 4 numune verileri ile ayrı ayrı oluşan en iyi lineer modellerin denklemleri.

Numune	Model	Giriş(ler) değişkenleri	Oluşan lineer modellerin denklemleri
1	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C)(x ₄)	$y = - 8.5025 + 0.0881(x_1) - 0.183(x_2) + 0.0346(x_3) + 0.3397(x_4)$
2	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C)(x ₄)	$y = - 5.7761 + 0.1057(x_1) + 0.1630(x_2) + 0.2376(x_3) - 0.0908(x_4)$
3	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C)(x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C)(x ₄)	$y = + 4.2244 + 0.0932(x_1) - 0.3816(x_2) + 0.6204(x_3) + 0.352(x_4)$
4	ÇLR (4.1)	Zaman(dk)(x ₁) Giriş su sıcaklığı (°C)(x ₂) Hava sıcaklığı(°C) (x ₃) Çıkış su sıcaklığı(°C)(x ₄)	$y = + 6.764 + 0.1168(x_1) + 0.9591(x_2) + 1.083(x_3) - 1.03(x_4)$

4.4 Hidronik Isıtma Sistemi Maliyet Analizi

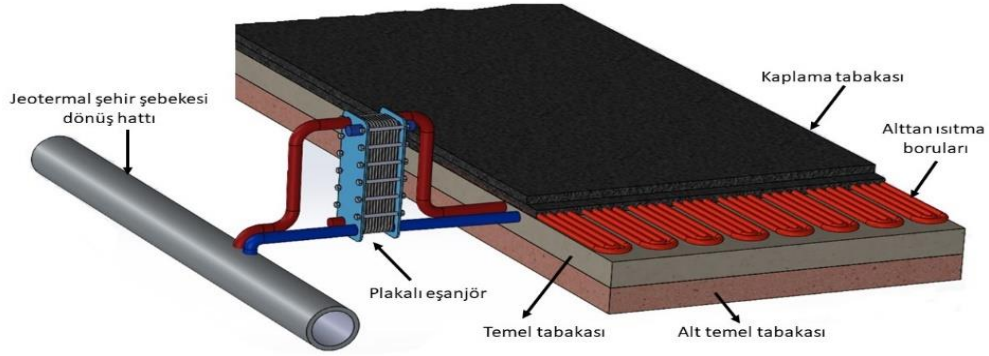
Yapılan çalışmada hidronik ısıtma sistemi için kullanılacak olan ısıtma kaynağının şehir ısıtmasında kullanılan artık jeotermal enerji olabileceği düşünülmüş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Hidronik ısıtma maliyetlerinin büyük bir kısmını ısıtma kaynağının sağlanması için gerekli olan sondaj kuyularının açılması oluşturmaktadır (Habibzadeh-Bigdarvisha vd. 2019). Fakat yapılan çalışma artık jeotermal kaynağın kullanımı ile kurulum maliyetinde önemli bir düşüşün olabileceği söylenebilir. Çizelge 4.16'da geleneksel yöntemler ile hidronik ısıtma sistemlerinin potansiyel maliyetleri ve faydaları gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 Geleneksel yöntemler ile hidronik ısıtma sistemlerinin fayda/maliyet kategorileri (Anand vd. 2017).

	Geleneksel Yöntemler	Hidronik Isıtma Sistemi
İlk Maliyet	Malzeme Satın Alımları Malzeme Depolama Alanları	Hidronik Sistem Kurulumu
İşletme Maliyeti	İşçilik, Yakıt, Buz Öleyici/Çözücü Maliyetleri, Araç Bakım Maliyetleri	Enerji Kaynağı Giderleri (jeotermal, doğalgaz, elektrik vs.)
Bakım Maliyeti	Sistem Bakımı	Sistem Bakımı
Yarar		Havaalanları için minimize edilmiş uçak ve yolcu gecikme maliyetleri, havaalanı, yol ve köprüler için daha güvenli ve daha iyi yol koşulları

Maliyet analizi hesaplamaları 20 m uzunluğunda ve 3,5 m genişliğinde bir asfalt yol baz alınarak yapılmıştır. Yol yapım maliyeti, maliyet hesaplamaları dışında tutulmuştur. Yapılacak işin 3 gün içerisinde tamamlanacağı ve 2 usta ve 2 usta yardımcısı ile yürütüleceği varsayılmıştır. İşçi bedelleri Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı 2020 yılı inşaat birim fiyatlarına esas, işçilik rayiç bedelleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Hidronik ısıtma sistem maliyetleri içerisinde yer alan kalemler; kurulum maliyeti, işletme maliyeti ve bakım maliyetleridir. Kurulum maliyetleri içerisinde; malzeme bedelleri ve işçilik bedelleri hesaplanmıştır. Şekil 4.21'de hidronik

sistem elemanları gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Hidronik ısıtma sistemi için kullanılan malzemeler.

Kurulacak sistem için malzeme bedeli kapsamında, 1 adet plakalı eşanjör, 140 m ısıtma borusu, boruların bağlantısı için kullanılacak olan 70 m² hasır çelik, 4 adet küresel vana ve 1 adet pürjör seti kullanılacaktır. Malzemeler için toplam bedel 4358 TL olarak hesaplanmıştır. Sistem kurulumu için gerekli olan işçilik bedeli de 9687 TL olarak hesaplanmıştır. Sistem için yıllık bakım maliyeti olarak boruların temizlenmesi ve işlejin kontrolü kapsamında m² başına 7 TL yıllık bedel ödeneceği öngörülmektedir. Sistem için işletme maliyeti bulunmamaktadır. Çizelge 4.17’de hidronik sistem için yapılan maliyet analizi verilmiştir. İşletme maliyeti olarak, sistemin kontrolü için görevlendirilecek personelin maaşı düşünülmüştür.

Çizelge 4.17 Hidronik ısıtma sistem maliyeti.

Kurulum Maliyeti		İşletme Maliyeti	Bakım Maliyeti
Plakalı Eşanjör	1763 TL	2825 TL/Aylık	7 TL/m ² yıllık
Isıtma Boruları	1100 TL		
Hasır Çelik	1155 TL		
Küresel Vana	300 TL		
Pürjör Seti	40 TL		
İşçilik Bedeli	9687 TL		
Toplam	14045 TL		
Toplam	200 TL/m²		

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, hidronik ısıtma sistemi kullanılan esnek üstyapıların kar ve buzlanma mücadelesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışma ile kar ve buzla mücadele yöntemlerinin doğurduğu zararlar ortadan kaldırılarak yenilenebilir bir enerji olan jeotermal kaynaklar kullanılarak kar ve buzun yol yüzeyinde oluşumunun engellenebileceği ortaya konulmuştur. Böylelikle kar ve buzlanma nedeniyle oluşan trafik kazalarının önlenmesi ayrıca kar ve buzlanma ile mücadele için kullanılan yöntemlerin çevreye verdiği zararlarının düşük maliyetli ve çevreci olan bir yöntemle ortadan kaldırılmasının mümkün olabileceği gösterilmiştir.

Ülkemiz dünyada jeotermal kaynak kullanımı bakımından 5 ülke arasında yer almasına rağmen bu kaynaklarımızı etkin kullanabileceğimiz alanlar sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle hem yenilenebilir hem de öz kaynaklarımız olan jeotermal kaynakları kar ve buzlanma ile mücadelede kullanmak önemli bir yaklaşım olacaktır.

Jeotermal enerji konut veya sera ısıtmasında %100 oranında kullanılamamaktadır. Sadece daha düşük kullanılabilirliği olan enerji şekline dönüştürülmektedir. Bu çalışma ile niteliği düşen enerjinin israf edilmeden, karayollarında kar ve buzlanma önleme sistemleri için yeniden kullanılabilirliği ortaya konulmuştur. Ayrıca bu sayede jeotermal enerjiyi etkin bir şekilde kullanarak jeotermal kaynaktan ikinci kez faydalanılmış ve enerji tasarrufu için önemli bir katkı sağlanmış olacaktır. Ülke kaynaklarının daha verimli şekilde kullanımı sağlanacak, sadece karayolu trafik güvenliği ile ilgili kazanç sağlanmayacak, aynı zamanda yüksek ekonomik fayda sağlayacaktır.

Çalışma kapsamında hidronik ısıtma sistemli dört eş asfalt kaplama numunelerine, gerçek hava koşullarında yaklaşık 2 saat süre ile 30-40 °C su sıcaklıklarında su girişleri kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Ölçümler termocupl kullanılarak, hava sıcaklığının 0 °C'nin altında olduğu zamanlarda alınmıştır. Asfalt numunelerin yüzey sıcaklığı; dört termocupl köşe noktalara ve bir termocupl ise asfalt yüzeyin orta noktasına yerleştirilerek kaydedilmiştir. Aynı anda giriş suyu sıcaklığı, çıkış suyu sıcaklığı ve hava sıcaklığı ölçümleride termocupl ile yapılmıştır.

Kış aylarında asfalt yüzey sıcaklığı, buzla mücadele kapsamında trafiğin sorunsuz bir şekilde ilerlemesi ve kazalara neden olmayacak şekilde hizmet vermesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada hidronik ısıtma sistemleri için zaman, giriş suyu sıcaklığı, hava sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklıklarının, asfalt yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini modellemek için gerçek hava koşullarında alınan veriler doğrultusunda çoklu lineer regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucu çeşitli modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı regresyon modellerinin performansı ortalama karesel hatanın karekökü (OKHK), ortalama mutlak hata (OMH), belirginlik katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (r) kullanılarak değerlendirilmiştir. Dört eş numune üzerinde yapılan ölçümler neticesinde en iyi modelin 3 numaralı numunede ve tüm bağımsız değişkenlerin kullanıldığı ÇLR (4.1) modeli olduğu gösterilmiş ve bu modele ait eğitim aşamasındaki OKHK, OMH, R^2 ve r değerleri sırasıyla 1,90; 1,41; +0,88; 0,78 test safhasındaki OKHK, OMH, R^2 ve r değerleri sırasıyla 1,67; 1,34; 0,74 ve +0,86 olmuştur. Sonuç olarak bu model asfalt yüzey sıcaklığını tahmin etmede etkili bir araç diyebiliriz. Maliyetli ve zaman alıcı araştırmalar yerine kullanılabilmesi görülmektedir.

Dört eş numuneden alınan veriler doğrultusunda yapılan çoklu lineer regresyon analizleri sonucu R^2 ve hata değerlerinin az da olsa birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Bunların nedeni olarak, numunelerin hazırlanması sırasında dört numunenin ısı özelliğinin birebir aynı olmaması sebebi ile alınan ölçümlerde küçük farklılıklar olabileceği düşünülmektedir. Fakat sonuçlar birbirinden afaki düzeyde farklı çıkmadığı dolayısıyla önerilen modellerin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki çıkan sonuçlar, modelin iyi bir performansa sahip olduğunu ve tahmin amaçlı kullanılabilir olduğunu göstermiştir. OKHK ve OMH hata değerleri ise yapılan çoklu lineer regresyon modellerine bakıldığında giriş değişkenlerinin artması ile hata değerlerinin düştüğü söylenebilir. Buradan da ortam şartlarına ve asfalt numuneye ait ne kadar fazla veri kullanılırsa hata paylarının da düşebileceği söylenebilir. Korelasyon katsayısı değerlerinin tüm yapılan analizlerde giriş değişkenleri arttıkça pozitif yönde arttığı görülmektedir. Aynı zamanda genel olarak giriş suyu sıcaklığının modele dahil edilmesi ile korelasyon katsayısının önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, asfalt yüzey sıcaklığının artması için giriş suyu sıcaklığının artırılması gerektiği sonucuna varılabilir.

Çalışmada, ANSYS bilgisayar yazılımı kullanılarak asfalt kaplamalı bir yol kesitinde termal analizler yapılmıştır. Aşınma tabakası, binder tabakası ve bitümlü temel tabakalarına döşenmiş ısıtma borularının beş farklı dış ortam ve üç farklı giriş suyu sıcaklıklarında oluşturdukları asfalt yüzey sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Çalışmada deneyde kullanılan numenelere benzer şekilde, 40 cm X 40 cm boyutlu asfalt kaplamalı yol kesit örnekleri kullanılmıştır. 8 cm bitümlü temel, 7 cm binder ve 5 cm aşınma tabakalarından oluşan bir üst yapı kesiti seçilmiştir. Yapılan analiz sonucu; asfalt kaplamalı yollarda hidronik ısıtma sistemi kullanılarak kar ve buzun oluşmadan önlenmesinin sağlanacağı ortaya konulmuştur. Sistem tasarımındaki değişkenler kar ve buz önleme performansını önemli derecede etkilemektedir. Farklı katmanlara yerleştirilen gömülü boruların, yüzeye yakın olduğu sistemlerde asfalt yüzeyini daha yüksek sıcaklıklara ulaştırabildiği ve yüksek giriş suyu sıcaklıklarının asfalt kaplamanın kar ve buz önleme performansı olumlu yönde etkilediği bulunmuştur. Kar ve buz mücadelesi için boru derinliğinin boru aralığından daha önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Sistemin kar ve buz önleme performansının artırılması için hava sıcaklığının 0 °C'nin altına düşmeden çalıştırılması ile sistem buz önleme açısından daha verimli hale gelebilir. Yapılan termal analizler sonucu 30 °C'ye sahip bir jeotermal kaynağın varlığında; -6 °C hava sıcaklığına kadar asfalt yüzey sıcaklığının 0°C'de tutulabildiği, jeotermal kaynağın 40 °C olduğu durumda, -7,5 °C hava sıcaklığına kadar asfalt yüzey sıcaklığının 0°C'de tutulabildiği, jeotermal kaynağın 50 °C olduğu durumda ise -10 °C hava sıcaklığına kadar asfalt yüzey sıcaklığının 0°C'de tutulabildiği ortaya konulmuştur.

Hidronik ısıtma sistemine sahip asfalt kaplamanın trafik yükü altında nasıl davranış sergileyeceği yapısal analizler ile değerlendirilmiştir. Yapısal analizler ANSYS bilgisayar yazılımı kullanılarak zamana bağlı statik analiz yapılarak gerçekleştirilmiştir. Statik analiz öncesinde modele termal analizler uygulanmıştır. Boruların aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı hidronik ısıtma sistemli karayolu ile ısıtmasız karayolunun trafik yükü altında aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri, pe-x boruda meydana gelen gerilmeler ve tekerlek izinde deformasyon miktarları incelenmiştir. Farklı hava sıcaklıklarında yapılan analizler neticesinde hava sıcaklıkları artarken çekme

gerilmelerinin arttığı, gömülü boruların aşınma tabakasında olduğu durumda aşınma tabakasındaki çekme gerilmelerinin, gömülü boruların diğer tabakalarda yer aldığı duruma göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte gömülü boruların binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında olması durumunda meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinin Cheng vd. (2018), Tan vd. (2012), Falchetto vd (2018)'nin çalışmalarında belirttiği çekme gerilmesi değerlerinden düşük olduğu saptanmış ve bu sonuca göre hidronik ısıtma sisteminin asfalt kaplamalarda kullanımının uygun olabileceği tespit edilmiştir. SEM analiz sonuçlarına göre düşük hava sıcaklıklarında çalıştırılan hidronik ısıtma sistemli üstyapıda yüksek çekme gerilmelerinin oluşabileceği ve bu sebeple sistemin 0°C'nin altına düşmeden çalıştırılmasının asfaltın hizmet ömrü açısından faydalı olabileceği belirlenmiştir.

Yapılan termal ve yapısal analizler sonucunda sistem için en uygun tasarım belirlenmeye çalışılmıştır. Gömülü boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemde yapılan termal analizler sonucunda, boruların yüzeye yakın olan aşınma tabakasında yer aldığı durumda en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir. Fakat yapılan yapısal analizler sonucu gömülü boruların aşınma tabakasında bulunduğu durumda trafik yükü altında aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinin gömülü boruların diğer tabakalarda yer aldığı duruma göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla beraber boruların binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı durumlarda ise borusuz üstyapıda meydana gelen çekme gerilmelerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yapılan termal ve yapısal analizler sonucunda hidronik ısıtma sistemi için en uygun sistemin gömülü boruların binder tabakası, bitümlü temel tabakası veya attemel tabakasında yer aldığı ve giriş suyu sıcaklığının en az 30°C olduğu bir kaynakla verimli bir şekilde çalışabileceği belirlenmiştir. Ayrıca sistemin hava sıcaklığının 0°C altına düşmeden çalıştırılması ile sistemin ısıtma performansı açısından ve asfaltın mekanik performansı açısından daha verimli olabileceği tespit edilmiştir.

Sistem maliyeti açısından hidronik ısıtma sistemlerinin yüksek maliyetli olduğu bilinmektedir. Fakat yapılan fayda maliyet analizleri sonucunda yapılması uygun olan sistemler olabilmektedir. Maliyeti oluşturan kısmın ısıtma kaynağı olduğu

bilinmektedir. Yaptığımız çalışmada atık ısı kaynağı olan jeotermal kaynaklar kullanılacağından dolayı maliyetin düşürülebildiği ortaya konulmuştur. Yapılan analiz sonucu m² maliyetinin 1127 TL'den 200 TL'ye kadar düştüğü görülmektedir.

Çalışma sonuçlarının bütünsel değerlendirilmesinde, geri enjeksiyonu yapılamayan termal enerji kullanımını dikkate alındığında, kullanım sonucunda atıl kalan enerjinin daha verimli kullanılarak hem ülkenin trafik kazalarına bağlı sosyal ve ekonomik kayıplarının önüne geçilmesinde, hemde bölgesel kalkınmaya ve yerel kaynakların verimli kullanılmasına büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Jeotermal enerji kullanan belediyelerimizin ve Karayolları Genel Müdürlüğü'nün hem yerel hemde devlet karayollarında kar ve buzlanma önleyici sistem olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Son olarak sistemin buz önlemede iyi bir performans göstereceğini söylemekle beraber, asfalt karışımlar içerisine ısı iletkenliği artıran çelik çürüf, karbon ya da grafit gibi ısı iletkenliği yüksek malzemelerin kullanılması ile birlikte buz önleme performansının iyileştirilmesi sağlanabilir. Bu kapsamda deneysel ve sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak çalışmaların yapılması önerilmektedir. Bunlara ek olarak zamana bağlı termal analizler yapılarak sistemin istenilen yüzey sıcaklığına ne kadar sürede ulaşabileceği ile ilgili çalışmalar yapılması önerilmektedir. Asfalt yollarda, hidronik ısıtma sistemlerinin kullanımının, asfaltın performansında meydana getireceği etkilerinin gelecek çalışmalarda deneysel olarak araştırılması bu sistemlerin kullanılabilir olması açısından son derece önemlidir. Ayrıca sistemin uygun zamanda uygun sıcaklıkta çalıştırılarak oluşacak çatlaklara karşı (kendi kendini iyileştiren) kendi kendini tamir eden asfalt kaplamaların araştırması yapılabilir. İstatistiki açıdan elde edilen modellerin kullanılabilir olduğunu söylemekle beraber, daha ileri analizlerin yapay zekâ uygulamaları kullanılarak yapılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Adl-Zarrabi B, Mirzananamadi R, Johnsson J, 2016, Hydronic Pavement Heating for Sustainable Ice-Free Roads, *Transportation Research Procedia*, 14, 704–713.
- Ağar E, Kutluhan S, 2005, Karayollarında Kış Bakımı, Kar ve Buz Kontrolü, *TMMOB İstanbul Bülten*, 76, 10-16.
- Akbulut H, Woodside A R, 2019, Traffic Safety and Unprotected Road Users in Low and Middle Income Countries, *Jiciviltech*, 1, 1-9.
- Akbulut H, Gürer C, Yıldız A, Gevrek L, 2018, Karayollarında Buzlanma Önleyici Sistem Olarak Jeotermal Enerjinin Kullanımı, *Yayın Yeri: IV. Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Sempozyumu ve Sergisi, Afyonkarahisar*.
- Akbulut H, Gürer C, Gevrek L, 2018, Highway Pavement Surface Icing and Traffic Safety, *International Journal of Scientific Engineering Research*, 9, 6–9.
- Akpınar A, Kömürcü M İ, Önsoy H, Kaygusuz K, 2008, Status of Geothermal Energy Amongst Turkey's Energy Sources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1148–1161.
- Allison E K, Bernard N S, 2004, Effects of Highway Deicing Chemicals on Shallow Consolidated Aquifers in Ohio-Final Report, *Scientific Investigations Report - 5150*, 199.
- Anand P, Nahvi A, Ceylan H, Pyrialakou V D, Gkritza K, Gopalakrishnan K, Kim S, and Taylor P C, 2017, Energy and Financial Viability of Hydronic Heated Pavement Systems, *National Technical Information Services (NTIS)*, Springfield, Virginia 22161, No. DOT/FAA/TC17/47.
- Anonim, 1998, Karayolları Bakım El Kitabı, KGM Bakım Dairesi Başkanlığı Yayınları, 478, Ankara.
- Arı A, Önder H, 2013, Farklı Veri Yapılarında Kullanılabilecek Regresyon Yöntemleri, *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 28, 168-174.
- ASHRAE, 2003, *Handbook of HVAC Applications*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, GA.

- ASHRAE, 1999, Handbook of HVAC Applications, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, GA.
- Ay M, 2014, Su Kalitesi Parametrelerinin Yapay Zekâ Yöntemleri ile Değerlendirilmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 136, Kayseri.
- Bağdatlı M E C, Yıldırım M Ş, 2017, Karayolu Üstyapılarındaki Bozulmaların Bakım Maliyetlerine Etkisi, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6, 102-111.
- Blomqvist S, Amiri S, Rohdin P, Ödlund L, 2019, Analyzing the Performance and Control of a Hydronic Pavement System in a District Heating Network, Energies, 12, 2078.
- Cheng Y, Yu D, Gong Y, Zhu C, Tao J, Wang W, 2018, Laboratory Evaluation on Performance of Eco-Friendly Basalt Fiber and Diatomite Compound Modified Asphalt Mixture, Materials, 11, 2400.
- Croney P, Croney D, 1991, The Design and Performance of Road Pavements, McGraw-Hill, Incorporated, 606.
- Derwin D, Booth P, Zaleski P, Marsey W, Flood W, 2003, Snowfree® Heated Pavement System to Eliminate Icy Runways, SAE Technical Paper, 2003-01-2145, 9.
- Diallo A O, Akpınar M V, 2020, Mechanistic Responses Of Asphalt Concrete Overlay Over Jointed Plain Concrete Pavement Using Finite Element Method, The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering, 15, 80-93.
- Dickson M.H, Fanelli M, 2003, Geothermal Energy Utilization and Technology, Unesco Publishing, 24, İndia.
- Ekincioglu G, Güney A, Akbay D, Altındağ R, 2017, Dairesel Testereli Kesme Makinelerinin Saatlik Üretim Miktarının Mermer Yüzey Sertliğine Bağlı Olarak Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Regresyon Analizleri (RA) İle Tahmin Edilmesi, Türkiye 9. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi ve Sergisi (MERSEM2017) 87-96, Antalya.
- Eugster W J, 2007, Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy Overview and

- Examples, Proceedings European Geothermal Congress, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June.
- Fay L, Shi X, 2012, Environmental Impacts of Chemicals for Snow and Ice Control: State of the Knowledge, Water, Air and Soil Pollution, 223, 2751-2770.
- Fay L, Volkening K, Gallaway C, Shi X, 2008, Performance and Impacts of Current Deicing and Antiicing Products: User Perspective versus Experimental Data Presented at 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D C, 08-1382.
- Falchetto A C, Moon K H, Wang D, Riccardi C, Wistuba M P, 2018, Comparison of Low-Temperature Fracture and Strength Properties of Asphalt Mixture Obtained from IDT and SCB Under Different Testing Configurations, Road Materials and Pavement Design, 19, 591-604.
- Feng J, Yin G, 2019, Thermal Analyses and Responses of Bridge Deck Hydronic Snow Melting System, Advances in Civil Engineering, 2019, Article ID 8172494, 14p.
- Garbalı D, Aslan Z, 2020, Güneş Enerjisi Potansiyelinin Çoklu Lineer Regresyon Ve Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi, Aurum Mühendislik Sistemleri Ve Mimarlık Dergisi, 4, 23-26.
- Gevrek L, 2008, Yol Katmanlarında Meydana Gelen Gerilme Dağılımının Ansys Bilgisayar Programı İle Nonlinear Sonlu Eleman Analizi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76. Afyonkarahisar.
- Górszczyk J, Grzybowska W, 2011, The Use of Fem for Thermal Analyses of The Asphalt Pavement, Roads and Bridges Research Institute, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 10, 5-30.
- Gustafson K, 1983, Icing Conditions on Different Pavement Structures, Transportation Research Record 860, Nr 84, ISSN 0347-6049.
- Gültepe Y, 2019, Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Hava Kirliliği Tahmini Üzerine Karşılaştırmalı Bir Değerlendirme. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 16, 8-15.
- Gürer C, Düşmez C, 2015, Köprülerde İletken Asfalt Kaplamalarla Buzlanmayla Mücadele Yöntemleri, 3. Köprüler Viyadükler Sempozyumu, Bursa.

- Habibzadeh-Bigdarvisha O, Yua X, Leia G, Lia T, Puppala A. J, 2019, Life-Cycle Cost-Benefit Analysis of Bridge Deck De-Icing Using Geothermal Heat Pump System: A Case Study of North Texas, *Sustainable Cities and Society*, 47, 101492.
- Hachiya Y, Tsubokawa Y, Mizukami J, Maekawa R, Su K, 2008, Laboratory and Field Study on Performance of Airport Asphalt Pavements with Embedded Snow-Melting Equipment, APT '08, Third International Conference, Madrid, Spain, 13.
- Highter W H, Wall D J, 1983, Thermal Properties of Some Asphaltic Concrete Mixes, International Air Transportation Conference, Transportation Research Record, 968, 38-45.
- Ho I-H, Li S, Abudureyimu S, 2019, Alternative Hydronic Pavement Heating System Using Deep Direct Use of Geothermal Hot Water, *Cold Regions Science and Technology*, 160, 194-208.
- Houssain S M K, 2014, Optimum De-Icing and Anti-Icing for Snow and Ice Control of Parking Lots and Sidewalks, The degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. The University of Waterloo, 186. Canada.
- Hunter R N, Self A, Read J, 2015, *The Shell Bitumen Handbook (Sixth Edition)*, ICE Publishing, 514.
- Iwamoto K, Nagasaka S, Hamada Y, Nakamura M, Ochifuji K, Nagano K, 1998, Prospects of Snow Melting Systems (Sms) Using Underground Thermal Energy Storage (Utes) in Japan, Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference, Pomona, New Jersey, March 16 – 17.
- İslam Md R, Tarefder R A, 2015, Determining Thermal Properties of Asphalt Concrete Using Field Data and Laboratory Testing, *Construction and Building Materials*, 67, Part B, 297-306.
- Johnsson J, Adl-Zarrabi B, 2019, Modeling the Thermal Performance of Low Temperature Hydronic Heated Pavements, *Cold Regions Science and Technology*, 161, 81-90.
- KGM, 2020, 2018 yılı Devlet ve İl yolları Bakım-İşletme Maliyetleri, Strateji

Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ulaşım Maliyetleri ve Verimlilik Şubesi
Müdürlüğü Haziran.

Kılıç İ, 2015, Buzlanma Önleyici Otomatik Püskürtme Sistemi, Gazi Üniversitesi,
Bilişim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55, Ankara.

Kılıç F Ç, Kılıç M K, 2013, Jeotermal Eneji ve Türkiye, Mühendis ve Makina, 54, 45-
56.

Kula Ö, 2008, Jeotermal Isıtma Sistemlerinin Ekserji Analizleri, Marmara Üniversitesi,
Fen Bilimleri enstitüsü, Makina Eğitimi Anabilimdalı, Yüksek Lisans Tezi, 77,
İstanbul.

Kuloğlu N, Kök B V, 2005, Karayollarında Kar ve Buz Mücadelesinde Kullanılan
Tuzun Beton Asfalt Kaplamaya Etkisi, Journal of Science and Engineering
Sciences, 17, 87-96.

Levenberg E, Rocchi I, 2019, On the Thermal Sensitivity of Unbound Granular
Pavement Layers, International Journal of Pavement Research and Technology,
13, 32-39.

Liu P, Wang D, Oeser M, 2017, Application os Semi-Analytical Finite Element Method
to Analyze Asphalt Pavement Response Under Heavy Traffic Loads, Journal of
Traffic and Transportation Engineering, 4, 206-214.

Liu X, Rees S J, Spitler J D, 2006, Modeling Snow Melting on Heated Pavement
Surfaces, Part II: Experimental Validation, Applied Thermal Engineering, 27,
1125-1131.

Liu X, Spitler J D, 2003, A Simulation Tool for the Hydronic Bridge Snow Melting
System, Submitted to the 12th International Road Weather Conference.

Liu X, 1998, Development and Experimental Validation of Simulation of Hydronic
Snow Melting Systems for Bridges, Master Thesis, Tongji University, 263,
Shanghai, China.

Lund J W, Toth A N, 2021, Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide
Review, Geothermics, 90, 101915.

Lund J W, Freeston D H, Boyd T L, 2005, Direct Application of Geothermal Energy:

- 2005 Worldwide Review, *Geothermics* 34, 691–727.
- Lund, J W, 2000, Pavement Snow Melting, Geo-Heat Center, Quarterly Bulletin, Vol:21, No: 2.
- Maruf A.G, 2019, Atay İli Dörtüol Bölgesi Yer Altı Su Seviyesinin Bulanık Mantık, Çoklu Linear Regresyon Ve Arma Modelleri İle Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 74, Hatay.
- Minsk L D, Hanover N H, 1971, Electrically Conductive Asphaltic Concrete, Patent 3573427 A, USA, 6 April.
- Minsk L D, 1968, Electrically Conductive Asphalt for Control of Snow and Ice Accumulation, *Highway Research Record*, 227, 57–63.
- Mirzanimadi R, Hagentoft C E, Johansson P, Johnsson J, 2018, Anti-icing of Road Surfaces Using Hydronic Heating Pavement With Low Temperature, *Cold Regions Science and Technology* 145, 106-118.
- Mirzanimadi R, 2017, Ice Free Roads Using Hydronic Heating Pavement With Low Temperature, Chalmers University Of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering Division of Building Technology, Infrastructure Physics, Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, 56, Gothenburg, Sweden.
- Morita K, Tago M, 2005, Snow-Melting on Sidewalks with Ground-Coupled Heat Pumps in a Heavy Snowfall City, *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- Nahvi A, Pyrialakou V D, Anand P, Sajed Sadati S M, Gkritza K, Ceylan H, Cetin K, Kim S, Gopalakrishnan K, Taylor P C, 2019, Integrated Stochastic Life Cycle Benefit Cost Analysis of Hydronicallyheated Apron Pavement System, *Journal of Cleaner Production*, 224, 994-1003.
- Orhan F, 2006, Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Özcan E, Güngör N, Şen H, 2010, Kimya Laboratuvar Şefliği Laboratuvar Tanıtım

Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

- Özdemir E, 2011, Karayolları Üstyapılarında Buzlanmayla Mücadelede Isıtılmış Agreganın Kullanımı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107, Isparta.
- Özsoy A, Acar M, 2005, Yerçekimi Destekli Bakır-Su Isı Borusu İçin Deneysel Bir Çalışma, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 90, 13-18.
- Özşahin Ş, Singer H, 2019, Odun Yüzey Pürüzlülüğü Tahmininde Bir Yapay Sinir Ağı Modelinin Kullanılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7, 1764-1777.
- Pan P, Wu S, Xiao Y, Liu G, 2015, A Review on Hydronic Asphalt Pavement for Energy Harvesting and Snow Melting, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, 624-634.
- Pan P, Wu S, Xiao F, Pang L, Xiao Y, 2015, Conductive Asphalt Concrete: A Review on Structure Design, Performance, and Practical Applications, Journal of Intelligent Material, Systems and Structures, 26, 755-769.
- Seferoğlu A G, Seferoğlu M T, Akpınar M V, 2015, Karayolu ve Havayolu Kaplamalarında Kullanılan Kar ve Buzla Mücadele Yöntemlerinin Mali Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım ve Teknoloji, 3, 407-416.
- Spitler J D, Ramamoorthy M, 2000, Bridge Deck Deicing Using Geothermal Heat Pump, Proceeding of the Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference.
- Sugawara N, Hokari K, Watanabe T, Sugawara H, 1998, Energy Saving Characteristics of a New Type of Road-Heating System, Atmospheric Research, 46, 113-122.
- Şiş A, 2000, Şartname Sınırlarındaki Agreganın Granülometrisinin Asfalt Betonunun Fiziksel Özelliklerine ve Optimum Bitüm oranına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 70, Elazığ.
- Tan Y Q, Kang F Y, Liang L Y, Chi Z, 2018, Responses of Snow-Melting Airfield

- Rigid Pavement Under Aircraft Loads and Temperature Loads and Their Coupling Effects, *Transportation Geotechnics*, 14, 107-116.
- Tan Y, Zhang L, Xu H, 2012, Evaluation of Low-Temperature Performance of Asphalt Paving Mixtures, *Cold Regions Science and Technology*, 70, 107-112.
- Taşdemir Y, Ağar E, 2005, Bitümlü Kaplamalarda Düşük Sıcaklık Çatlaklarının İncelenmesi, *İtü dergisi/d mühendislik*, 4, 59-70.
- Taşdemir Y, 2003, Bitümlü Kaplamaların Termal Davranışının Performans Testleri İle İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 237, İstanbul.
- Transit New Zealand (TNZ), 2005, Road Controlling Authorities, Roading New Zealand, Chipsealing in New Zealand. Wellington, 524, New Zealand.
- Tunç A, 2004, Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayınevi, 1.Baskı, Ankara.
- Varış M, 2007, Karayolları Esnek Üstyapılarında Buzlanma İle Mücadele Yöntemleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93, Isparta.
- Wang H, Zhao J, Chen Z, 2008, Experimental Investigation of Ice and Snow Melting Process on Pavement Utilizing Geothermal Tail Water, *Energy Conversion and Management*, 49, 1538–1546.
- Xiao J, Kulakowski B T, El-Gindy M, 2000, Prediction of Risk of Wet-Pavement Accidents: FuzzyLogic Model, *Transportation Research Record* 1717, Transportation Research Board, Washington, 1, 1717.
- Xu H, Tan Y, 2015, Modeling and Operation Strategy of Pavement Snow Melting Systems Utilizing Low-Temperature Heating Fluids, *Energy*, 80, 666-676.
- Yaşar K, 2010, Balıkesir Üniversitesi Yerleşkesinin Hisarköy Jeotermal Kaynaklarından Isıtılmasının Ekonomiye Katkısının Araştırılması, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12, 46-56.
- Yayla N, 2002, Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, 285, İstanbul.
- Ye Q, Su X, Chen F, Shang P, Jiao H, 2018, Analysis of the Mechanical Properties of

the Snow Self- Melting Pavement, AIP Conference Proceedings, 1995, 1, 020002.

Yıldız K, 2003, Marshall Dizayn Metodu İle Optimum Bitüm Muhtevasının Belirlenmesinde Deney Parametrelerinin Sonuca Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 104, Ankara.

Yu WB, Yi X, Guo M, 2014, State of The Art and Practice of Pavement Anti-Icing and De-Icing Techniques, Sciences in Cold and Arid Regions, 6, 14–21.

Zeng H, 1995, On The Low Temperature Cracking of Asphalt Pavements, TRITA-IP FR 95-07, Royal Institute of Technology, Stockholm, 167, Sweden.

Zhang J, Das D K, 2009, Selection of Effective and Efficient Snow Removal and Ice Control Technologies for Cold-Region Bridges, Journal of Civil, Environmental and Architectural Engineering, 3, 1-14.

Zhu X, Zhang Q, Chen L, Du Z, 2021, Mechanical Response of Hydronic Asphalt Pavement Under Temperature–Vehicle Coupled Load: A Finite Element Simulation and Accelerated Pavement Testing Study, Construction and Building Materials, 272, 121884.

İnternet Kaynakları

1-<https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789> 17.04.2021

2-https://ops.fhwa.dot.gov/Weather/best_practices/EnvironmentalSensors.pdf, 21.01.2019

3-

<https://www.oregon.gov/ODOT/Programs/ResearchDocuments/RankingMethodsSpeedRelated.pdf>, 21.01.2020

4- <https://www.atmos.washington.edu/~cliff/Roadway2.htm>, 15.12.2020

5-

https://www.meteoblue.com/tr/hava/historyclimate/climateobserved/yozgat_t%c3%bcrk_iye_296562, 10.11.2020

6-

[https://mde.state.md.us/programs/Marylander/Documents/2013_Stranko_Road_Salt_\(final\)_TMF_edits.pdf](https://mde.state.md.us/programs/Marylander/Documents/2013_Stranko_Road_Salt_(final)_TMF_edits.pdf), 06.06.2020

7-<https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/bolu-dagi-kar-kaplanlari-ile-guvende/994356>
(20.01.2021)

8- <https://www.firat.com/cmsfiles/certificates/9896/pex-metal-brosuru.pdf>, 14.01.2021

9-

[https://mgm.gov.tr/FILES/ziraat/TrDonHaritasi/don/ilkbahar%20en%20gec%20don%20tarihleri%20\(-1%C2%B0C\).png](https://mgm.gov.tr/FILES/ziraat/TrDonHaritasi/don/ilkbahar%20en%20gec%20don%20tarihleri%20(-1%C2%B0C).png) 10.03.2021

10-

[https://mgm.gov.tr/FILES/ziraat/TrDonHaritasi/don/sonbahar%20en%20erken%20don%20tarihleri%20\(-1%C2%B0C\).png](https://mgm.gov.tr/FILES/ziraat/TrDonHaritasi/don/sonbahar%20en%20erken%20don%20tarihleri%20(-1%C2%B0C).png) 10.03.2021

11-<https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/jeotermal-harita/images/1.jpg>
20.02.2021

12-<https://www.haber7.com/guncel/haber/2941604-sakaryada-buzlanma-nedeniyle-9-arak-birbirine-girdi> 09.03.2020

13-<https://www.anindahaberler.com.tr/genel/gizli-buzlanma-ile-meydana-gelen-kazah23674.html> 09.03.2020

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Lale ATILGAN GEVREK
Doğum Yeri ve Tarihi : Salihli/22.08.1981
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (e-posta) : lale.gevrek@bozok.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Salihli Anadolu Teknik, Teknik Lise ve Endüstri
Meslek Lisesi, Yapı Ressamlığı Bölümü (1995-1998)
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Yapı Öğretmenliği
Bölümü, (1999-2003)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, (2005-2008)
Doktora : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği ABD (2014-2021)

Çalıştığı Kurum ve Yıl : Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat Meslek
Yüksekokulu, İnşaat Bölümü (2009-Devam Ediyor)

Yayımları (SCI ve diğer) :

Akbulut H. ve Gevrek L, 2021, Hidronik Isıtma Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi
Kullanılarak Termal Analiz Sonuçlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe
Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21, 434-441.

Akbulut H, Gürer C, Gevrek L, 2019, Ice Control Methods By Using Geothermal
Energy In HighwayBridges. Presented at the 1st International Symposium on
Innovations in Civil Engineering and Technology, I CIVILTECH 2019, Afyon.

Akbulut H, Gürer C, Gevrek L, 2019, Soğuk İklimlerde Trafik Güvenliği Ve Sosyal ve
Ekonomik Sonuçları. Presented at the 4. International Conference on
Engineering Technology and Applied Sciences, (ICETAS) Kiev/Ukrayna.

Akbulut H, Gürer C, Yıldız A, Gevrek L, 2018, Karayollarında Buzlanma Önleyici Sistem Olarak Jeotermal Enerjinin Kullanımı. IV. Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Sempozyumu ve Sergisi, Afyon.

Akbulut H, Gürer C, Gevrek L, 2018, Highway Pavement Surface Icing And Traffic Safety. International Journal of Scientific Engineering Research, 9, 6–9.

Gürer C, Düşmez C, Gevrek L, 2015, İletken Asfalt Betonu Uygulamaları, Presented at The 8. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara.

Gürer C, Akbulut H, Düşmez C, Sürüç O, Gevrek L, Karşlı T, Gücek S, 2014, Karayollarında Yüzey Sürtünme Özelliklerinin Karayolu Trafik Güvenliğine Etkileri, 5. Karayolu Trafik Güvenliği Sempozyumu, 21-23 Mayıs, Ankara.