

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 025601 (324-331)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 025601 (324-331)

DOI: 10.35414/akufemubid.1004772

Araştırma Makalesi / Research Article

Hidronik Isıtma Sistemli Asfalt Üstyapılarda Gömülü Boruların Farklı Tabakalarda Yer Aldığı Durumlarda Aşınma Tabakasında Meydana Gelen Gerilmelerin İncelenmesi*

*Karayolu Üstyapılarında jeotermal Enerji ile Buzlanma Önleyici Sistemlerin Modellenmesi isimli tezden türetilmiştir.

Hüseyin AKBULUT¹, Lale ATILGAN GEVREK²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

²Yozgat Bozok Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Yozgat.

e-posta: hakbulut@aku.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4504-4384>

Sorumlu yazar e-posta: lale.gevrek@bozok.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2015-9679>

Geliş Tarihi: 07.10.2021

Kabul Tarihi: 22.03.2022

Öz

Asfalt betonu yollarda yüzeyde kar birikmesi ve buz oluşumunun önlenmesi için üstyapı içerisinde gömülü bir hidronik ısıtma sisteminin kullanılması geleneksel kar ve buz mücadelesi uygulamalarına alternatif olarak önerilmektedir. 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 sayede yol yüzeyinin buzlanması önlenmektedir. Güvenilir ve ekonomik olarak uygulanabilir bir hidronik kar eritme sistemi için çeşitli parametrelerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada hidronik ısıtma sistemlerinin kullanıldığı esnek üstyapılarda trafik yükü sonucu meydana gelen gerilmeler ile hidronik ısıtma sistemi kullanılmayan esnek üstyapılarda trafik yükü sonucu meydana gelen gerilmelerin sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak karşılaştırılması yapılmıştır. Beş farklı hava sıcaklığında ve üç farklı giriş suyu sıcaklığı kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan çalışmada gömülü boruların aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı durumlarda, aşınma tabakasında meydana gelen gerilmeler incelenmiştir. Ek olarak sistem içinde kullanılan pe-x borularda trafik yükü sonucu meydana gelen gerilmeler de değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Hidronik Isıtma Sistemleri; Buz Önleme; Gerilme Analizi; ANSYS

Investigation of Stress Occurring in the Wearing Layer in Cases of Embedded Pipes in Different Layers in Asphalt Pavements with Hydronic Heating System

Abstract

In order to prevent snow accumulation and ice formation on asphalt concrete roads, the use of a hydronic heating system embedded in the pavement is recommended as an alternative to traditional snow and ice fighting applications. Hydronic heating systems circulate a heated liquid through a pipe network placed under the pavement layer to melt the snow and ice accumulated in the pavement layer, thus preventing the road surface from icing. Various parameters need to be evaluated for a reliable and economically viable hydronic snowmelt system. In this study, the stresses that occur as a result of traffic load in flexible pavements where hydronic heating systems are used and the stresses that occur as a result of traffic load in flexible pavements without hydronic heating system are compared using finite element software. Evaluations were made using five different air temperatures and three different inlet water temperatures. In the study, the stresses occurring in the surface course were investigated when buried pipes are located in the surface course, binder course, asphalt base course and gravel base layer. In addition, the stresses that occur as a result of traffic load in pe-x pipes used in the system were also evaluated.

Keywords

Hydronic Heating System; Anti-icing; Stress Analysis; ANSYS

1. Giriş

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 (Wang vd. 2008, Sun vd. 2018, Chen vd. 2011). 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 birçok ülkede sosyal ve ekonomik bir yük haline gelmiştir (Akbulut ve Woodside 2019). Kar ve buzla mücadelede halen geleneksel yöntemler kullanılmakta ve bu yöntemlerin beraberinde getirmiş olduğu birçok 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 (Houssain 2014, Fay vd. 2008) 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.

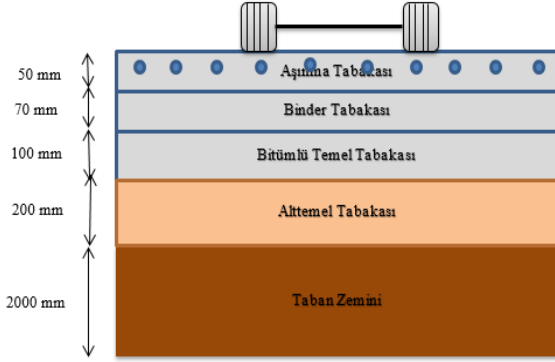
Hidronik ısıtma sistemleri geleneksel yöntemlere alternatif olan çevreci, sürdürülebilir ve verimli bir buz önleme yöntemidir. Sürdürülebilir hidronik ısıtma sistemlerinin tasarımını optimize etmeye çalışırken kar eritme verimliliğinin yanı sıra yol kaplamasının mekanik performansının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu tür sistemlere ait kar eritme performansı araştırmaları bulunmakla birlikte mekanik etkilerin araştırılması konusunda çalışmalar yetersiz kalmaktadır (Zhu vd. 2021). Mirzanamadi ve arkadaşları (2018), kar eritme verimliliğini simüle etmek için hidronik ısıtma

kaplamasının 2 boyutlu bir sayısal modelini geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada çeşitli parametrelerin sistem verimliliği üzerine etkilerini araştırmışlardır. 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. Wang ve arkadaşları (2008), küçük ölçekli bir kar ve buz eritme sistemi oluşturarak, sistemin kar eritme performansı ile ilgili deneyler gerçekleştirmişlerdir. 40 °C'lik ısı kaynağının kar eritme performansı için yeterli olduğunu ortaya koymuşlardır. Yapılan araştırmaların hidronik ısıtma sistemlerinin buz önleme performansına etkilerini araştırmakta fakat bununla birlikte hidronik asfalt kaplamaların özellikle yük altındaki mekanik tepkileri ve uzun dönemli performans araştırmaları sınırlı kalmaktadır. Yapılan bu çalışma ile hidronik ısıtmaya sahip asfalt kaplamalı bir yolun, boruların aşınma tabakasında yer aldığı durumda yük altında tabakalarda meydana getirdiği gerilmeler incelenmiştir. Sonuç olarak; aşınma tabakasında yüksek sıcaklık farkına bağlı olarak meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinin hidronik ısıtma sisteminin kullanılmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Düşen hava sıcaklığına bağlı olarak çekme gerilmesi değerlerindeki artış, sistemin 0 °C'de çalıştırılmasının yüksek sıcaklık farkını sınırlayacak ve asfaltın hizmet ömrü bakımından faydalı olacağı belirlenmiştir. Buna ek olarak, pe-x boruların hidronik ısıtma sistemleri için yük altında ve yüksek sıcaklık değerlerinde kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 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 1’de üstyapıya ait model gösterilmiştir. Aşınma tabakası 50 mm, binder tabakası 70 mm, bitümlü temel tabakası 100 mm, alt temel tabakası 200 mm ve taban zemini 2000 mm olarak teşkil edilmiştir.



Şekil 1. 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 1’de gösterilmiştir. Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları viskoelastik malzeme olarak, alttemel tabakası ve taban zemini ise elastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Malzemelere ait fiziksel özellikler Çizelge 2’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 1. Yapısal Analizde Kullanılan Parametreler

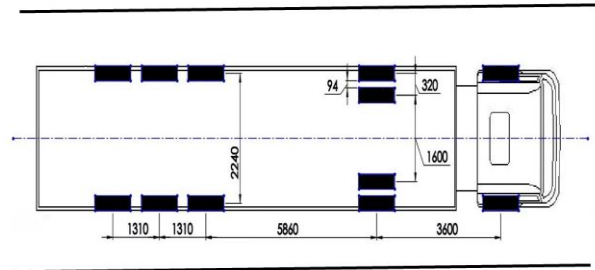
Boru Derinliği (mm)	Boru Aralığı (mm)	Giriş Suyu Sıcaklığı °C	Hava Sıcaklığı °C
Aşınma Tabakasının Ortası (25 mm)	150	50,40,30	0,-2,5,-5,-7,5,-10
Binder Tabakasının Ortası (85 mm)	150	50,40,30	0,-2,5,-5,-7,5,-10
Bitümlü Temel Tabakasının Ortası (170 mm)	150	50,40,30	0,-2,5,-5,-7,5,-10
Alttemel Tabakasının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

Sonlu elemanlar ağının en alt kısmındaki düğüm noktalarında hem düşey hem de yatay yönde harekete izin verilmemektedir. Sonlu eleman ağının yanal sınırlarında ise düşey yönde harekete izin verilirken yanal harekete izin verilmemektedir. Sonlu eleman ağı oluşturulurken kare elemanlar kullanılmış olup bu kare elemanlar 4 düğüm noktalı ve 6 serbestlik dereceli olarak seçilmiştir.

Çizelge 2. Tabakalara ait katman kalınlıkları ve fiziksel özellikler

Katman	Kalınlık (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 (Çap)	16mm	0,40	850	925

Kaplama yüzeyine etki eden tekerlek yükü 226 mm genişliğinde etki etmektedir. İkinci dingilde çiftteker diğerlerinde ise tek teker şeklinde yük uygulaması yapılmıştır (Liu vd. 2017). Analizde yükleme yapılırken kullanılan araç Şekil 2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2. 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’de teker yükleme miktarları ve zamanları gösterilmiştir. Yapılan yüklemeler beş ayrı zaman diliminde etki ettirilmiştir. Teker ara mesafelerine uygun olarak boş geçen zamanlar hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Zamana Bağlı Yükleme Miktarları ve Süreleri

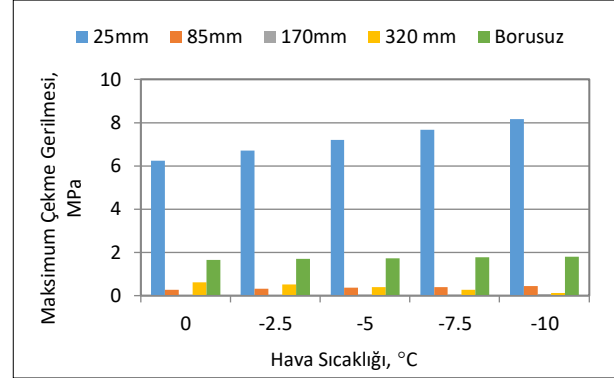
Zaman (s)	Tek teker (MPa)	Çift Teker (MPa)	Tek Teker (Mpa)	Tek Teker (Mpa)	Tek Teker (Mpa)
0,000-0,007	1. dingil	2. dingil	3. dingil	4. dingil	5. dingil
0,162-0,169		0,372 x 2			
0,426-0,433			0,506		
0,485-0,492				0,504	
0,544-0,551					0,511

Hidronik ısıtma sistemini kullanan bir asfalt kaplamada üç farklı giriş suyu sıcaklığında ve beş farklı hava sıcaklığında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz sonucu aşınma tabakasında ve pe-x borularda meydana gelen çekme gerilmeleri ile tekerlek yüzeylerinin temas ettiği alanlarda meydana gelen çökme değerleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3 Bulgular

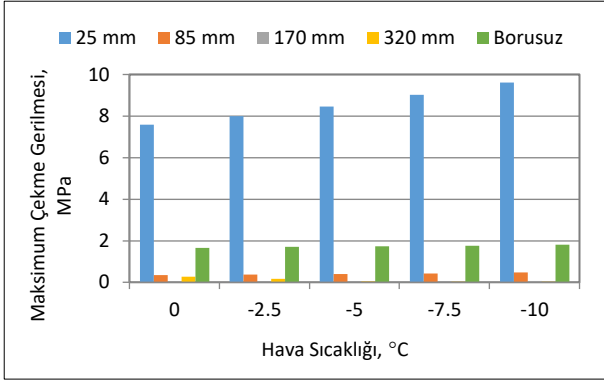
Asfalt kaplamaya uygulanan yapısal analizler sonucunda, hidronik ısıtma sistemine sahip bir üstyapının; gömülü boruların aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı durumlarda trafik yükü sonucunda, aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri 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 3’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 3’e 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 vd. 2015, Tunç 2004, Zeng 1995). İlgili çalışmalar, hidronik ısıtma sistemine sahip kaplamaların yükün neden olduğu ana



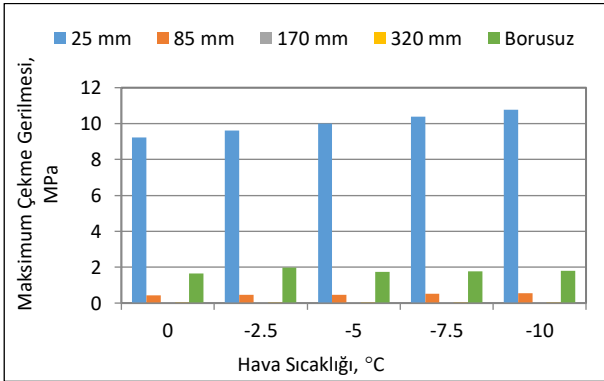
Şekil 3. 30 °C Giriş suyunda boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri

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’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. 40 °C Giriş suyu sıcaklığında boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri

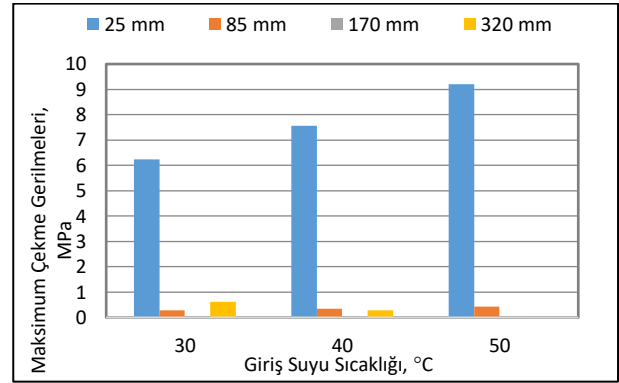
Şekil 5’de gömülü boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde 50 °C giriş suyu ile çalışan hidronik ısıtma sistemine sahip bir üstyapının beş farklı hava sıcaklığında yükleme durumunda aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri verilmiştir. Şekil 5’de verilen grafiğe göre gömülü boruların bitümlü temel tabakasında ve alttemel tabakasında bulunduğu durumlarda, aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmelerinin sifıra 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 sifıra yaklaşması sonucu çatlak oluşumun önlenebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 5. 50 °C Giriş suyu sıcaklığında boruların farklı derinliklerde yer aldığı sistemlerde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri

Şekil 3, 4, 5’de görüldüğü üzere farklı hava sıcaklıklarında yapılan analizler neticesinde hava sıcaklıkları azalırken çekme gerilmelerinin arttığı,

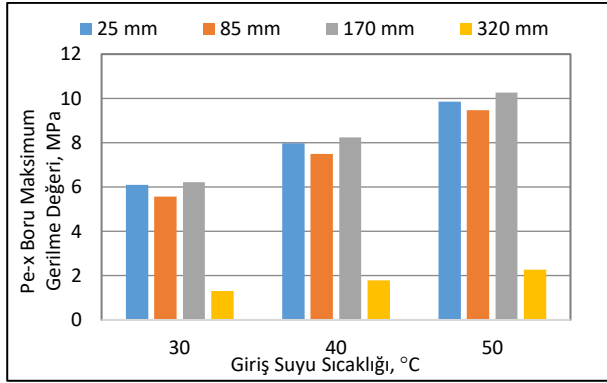
gömülü boruların aşınma tabakasında olduğu durumda aşınma tabakasındaki çekme gerilmelerinin, gömülü boruların diğer tabakalarda yer aldığı duruma göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte gömülü boruların binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında olması durumunda 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 6’da farklı giriş suyu sıcaklıklarının, 0 °C hava sıcaklığında yükleme durumunda aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmelerinin değişimleri gösterilmiştir. Şekil 6’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 6. 0 °C hava sıcaklığında boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemde aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri

Şekil 7’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. 1). Dolayısıyla meydana gelen gerilme değerlerinin sınır değerlerden düşük olduğu ve hidronik ısıtma sistemi için pe-x boruların kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur. Şekil 8'de 0 °C hava sıcaklığında gömülü boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde farklı giriş suyu

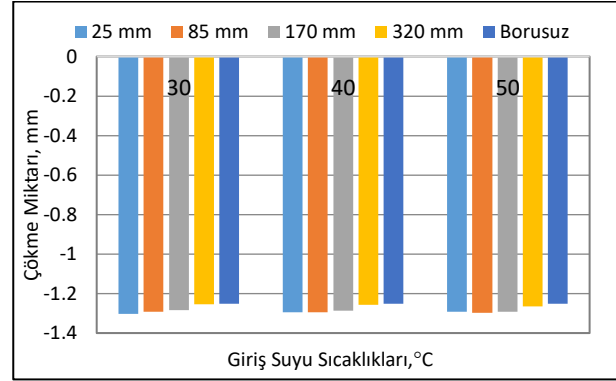


Şekil 7. Boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde 0 °C hava sıcaklığında farklı giriş suyunun sahip hidronik ısıtma sistemli üstyapının yüklemesinde pe-x boruda meydana getirdiği gerilmeler

sıcaklıklarında meydana gelen tekerlek izinde deformasyon miktarları gösterilmektedir. Hidronik ısıtma sistemine sahip olmayan üstyapıya yapılan yüklem 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 alt temel 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.



Şekil 8. 0°C hava sıcaklığında boruların farklı tabakalarda yer aldığı sistemlerde farklı giriş sularında meydana gelen tekerlek izinde deformasyon miktarları

Bunun sonucu olarak hidronik ısıtma sistemi kullanılan asfalt kaplamalı yollarda çatlak oluşumunun azaltılabileceği belirlenmiştir. Özcanan ve Akpınar 2014'e 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 çatlakları oluşumunun azaltılabileceği 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). Dolayısıyla boruların aşınma tabakasında yer aldığı durumlarda aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinin tabaka kalınlığının artırılması ile azaltılabileceği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada boruların aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel tabakası ve alttemel tabakasında yer aldığı hidronik ısıtma sistemli asfalt kaplama ile ısıtmasız asfalt kaplamanın trafik yükü altında aşınma tabakasında meydana getirdiği çekme gerilmeleri, pe-x boruda meydana gelen gerilmeler ve tekerlek izinde deformasyon miktarları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Asfalt kaplamalı yollarda 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 düşünülmektedir.
- Yapılan 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 belirlenmiştir.
- Düşük hava sıcaklıkları nedeniyle, yüksek sıcaklık aralığına bağlı olarak oluşan çekme gerilmelerinin hidronik ısıtma sisteminin kullanılması ile birlikte azalacağı, bunun sonucu olarak çatlak oluşumunun önlenebileceği tespit edilmiştir.
- 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.

- Hidronik ısıtma sistemi kullanılan asfalt kaplamalı yollarda pe-x borularda meydana gelen gerilme değerlerinin sınır değerlerden düşük olduğu ve hidronik ısıtma sistemi için pe-x boruların kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur.
- Analiz sonuçlarına göre yük sonrasında meydana gelen çökme miktarlarının hidronik ısıtma sistemlerini kullanmak için önemsiz olduğu sonucuna varılmıştır.
- Boruların aşınma tabakasında yer aldığı durumlarda aşınma tabakasında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinin tabaka kalınlığının artırılması ile azaltılabileceği düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- Akbulut, H. ve 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.
- Bağdatlı, M. E. C. ve Yıldırım, M. Ş., 2017. Karayolu Üstyapılarındaki Bozulmaların Bakım Maliyetlerine Etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **6**, 102-111.
- Chen, M., Wu, S., Wang, H., Zhang, J., 2011. Study of Ice and Snow Melting Process on Conductive Asphalt Solar Collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 3241-3250.
- 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.
- 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
- 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.

- 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.
- Feng, J., Yin, G., 2019. Thermal Analyses and Responses of Bridge Deck Hydronic Snow Melting System. *Advances in Civil Engineering*, Article ID 8172494, 14.
- 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.
- Liu, P., Wang, D., Oeser, M., 2017. Application of Semi-Analytical Finite Element Method to Analyze Asphalt Pavement Response Under Heavy Traffic Loads. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **4**, 206-214.
- Mirzanimadi, R., Hagentoft, C. E., Johansson, P., Johansson, J., 2018. Anti-icing of Road Surfaces Using Hydronic Heating Pavement With Low Temperature. *Cold Regions Science and Technology*, **145**, 106-118.
- Özcanan, S. ve Akpınar, M.V., 2014. Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigurasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi. *İMO Teknik Dergi*, **25**, 6625-6654.
- Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Hu, J., Yuan, Y., Ye, Q., 2018. Snow and Ice Melting Properties of Self-Healing Asphalt Mixtures with Induction Heating and Microwave Heating. *Applied Thermal Engineering*, **129**, 871-883.
- 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. ve 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, İstanbul, 237.
- Tunç, A., 2004. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. Asil Yayınevi, 1.Baskı, Ankara.
- 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.
- Xu, H., Tan, Y., 2015. Modeling and Operation Strategy of Pavement Snow Melting Systems Utilizing Low-Temperature Heating Fluids. *Energy*, **80**, 666-676.
- 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.
- 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.
- Zeng, H., 1995. On The Low Temperature Cracking of Asphalt Pavements. TRITA-IP FR 95-07. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 167.

İnternet Kaynakları

1. <https://www.firat.com/cmsfiles/certificates/9896/pe-x-metal-brosuru.pdf>, (14.01.2021)