

**Demiryolu Araçlarında Yalıtım Kalınlığının Vagon İç Sıcaklığına ve Isıl Yüke Etkisinin İncelenmesi**Mustafa DÖNMEZ¹, Mehmet Mete ÖZTÜRK^{*2}, Bahadır DOĞAN³¹ Eskişehir Teknik Üni., Lisansüstü Eğitim Ens., Raylı Sistemler Müh. Bölümü, Eskişehir, Türkiye² Eskişehir Osmangazi Üni., Müh. Mim. Fak., Uçak Mühendisliği. Bölümü, Eskişehir, Türkiye³ Eskişehir Osmangazi Üni., Müh. Mim. Fak., Makine Mühendisliği. Bölümü, Eskişehir, Türkiye

*mete.ozturk@ogu.edu.tr

(Alınış/Received: 24.06.2025, Kabul/Accepted: 17.07.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Yolcu taşımacılığında kullanılan vagonlarda yalıtım kalınlığı ve malzemesinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. Trenin ısı kayıplarını minimize etme hedefiyle, tren zarfı olarak adlandırılan yapısal model alt bölümlere ayrılarak incelenmiştir. Belirlenen bu bölümler için farklı yalıtım kalınlıkları ve malzeme çeşitleri tanımlanmış, bu sayede parametrik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler, yaz ve kış mevsimlerine özgü farklı sıcaklık senaryoları altında enerji tüketimi üzerindeki etkiyi belirlemek üzere yürütülmüştür. Ticari bir mühendislik yazılımı olan ANSYS kullanılarak yapılan bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen veriler, karşılaştırmalı analize uygun biçimde derlenmiştir. Çalışma, malzeme ısı iletim katsayısının düşmesi ve yalıtım kalınlığının artmasıyla enerji tüketiminde gözlemlenen azalma arasındaki doğrudan ilişkiyi nicel verilerle desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Tren zarfı, Yalıtım malzemesi, Nümerik analiz, Raylı sistemler, Enerji verimliliği

Investigation of the Effect of Insulation Thickness on Interior Wagon Temperature and Thermal Load in Railway Vehicles

Abstract: This study focuses on the effect of insulation thickness and material on energy consumption in passenger wagons. With the aim of minimizing heat losses of the train, the structural model, referred to as the "train envelope," was divided into sub-sections and examined. Different insulation thicknesses and material types were defined for these determined sections, thereby conducting a parametric analysis. The analyses were carried out under various temperature scenarios specific to summer and winter seasons to determine the effect on energy consumption. The data obtained from these evaluations, performed using ANSYS, a commercial engineering software, were compiled in a format suitable for comparative analysis. The study supports with quantitative data the direct relationship between the decrease in energy consumption and the reduction in the material's thermal conductivity coefficient and the increase in insulation thickness.

Keywords: Train envelope, Insulation material, Numerical analysis, Railway, Energy efficiency

1. Giriş

Teknolojinin hızla ilerlemesi ile kullanımı her geçen gün artan enerjinin verimli kullanılması tüketilen toplam enerjinin %20'sini oluşturan ulaştırma sektörü açısından önemli bir konudur. Taşımacılıkta oluşan yüksek enerji talebi ve bunlara ilave olarak son yıllarda fosil yakıt tüketiminin çevresel etkileri, enerjinin daha verimli kullanılması gerekliliği gibi hususlar, yaygın olarak elektrik kullanımına izin veren, süratli insan ve eşya taşımacılığına müsaade eden demiryolunun daha çok ön plana çıkmasına sebep olmuştur. 2000'li yıllar ile birlikte yolcu ve yük taşımacılığında büyüme gösteren demiryolu taşımacılığı gelişme dönemine girmiş ve toplanan veriler doğrultusunda, bu büyüme trendi ile birlikte, 2025 yılına kadar yolcu taşımacılığında %3,2, yük taşımacılığında %1,4 ve şehir içi taşımacılıkta %5,2 paya sahip olması

Atıf için/Cite as: M. Dönmez, M. M. Öztürk, B. Doğan, "Demiryolu araçlarında yalıtım kalınlığının vagon iç sıcaklığına ve ısı yüküne etkisinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 106-120, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1725159

beklenmektedir [1]. Demiryolu taşımacılığında enerjinin verimli kullanılması için birçok akademik çalışma yapılmıştır.

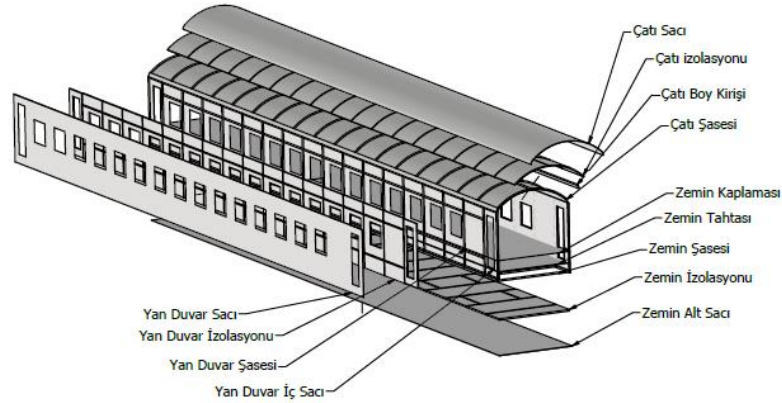
Aliahmadi vd. [2] iklimlendirme sisteminden vagona sağlanan havanın çoğunlukla bölmenin sol tarafına doğru meyilli olduğunu ve termal konfor koşullarının elde edilmediğini belirtmişlerdir. Bazı basit değişiklikler ile hava akışı dağılımını simetrik hale getirebileceğini göstermişlerdir. Dullinger vd. [3], demiryolu araçlarında enerji tüketimini hesaplayabilmek için hafif raylı araçlar için geliştirilen modül ile HVAC sistemlerinin enerji tüketimlerinin hesaplanması konusunda bir çalışma yapmışlardır. Önerilen modül, kullanıcı dostu bir arayüze entegre edilmiş ve bu arayüz yardımıyla veri setlerini işlemek, sonuçları zaman domainleri içinde göstermek ve yıllık enerji tüketimlerinin kolay bir şekilde incelenebileceğini belirtmişlerdir. Powell vd. [4] şehir içi raylı sistemlerde kullanılan bir metro aracının yıllık enerji tüketiminin yaklaşık %11'inin yardımcı sistemler tarafından kullanıldığını ve yardımcı sistemler tarafından tüketilen enerjinin %45'nin ısıtma ihtiyacı için tüketildiğini tespit etmişlerdir. Barone vd. [5], TRNSYS programı ile bütün çevresel şartları bir demiryolu aracı üzerine uygulayarak gerçek zamanlı dinamik bir analiz yapmayı, enerji kaybını azaltabilecek çözümler bulmayı amaçlamıştır. Daha önceki yapılan çalışmalardan farklı olarak trenin yapısalında kullanılan yalıtım malzemesi ve HVAC tasarımıdaki iyileştirmeler yapılabileceğini açıklamıştır. Çalışma sonucunda yapılabilecek değişiklikler ile yolcuların konfor şartları değiştirilmeden enerji tüketiminin 0,4 – 6 MWh/yıl azaltılabileceği belirtilmiştir. Hofstadter vd. [6] Avusturya'nın Viyana şehrinde çalışan bir tramvay için konfor ve enerji analizi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Tam sayılı doğrusal optimizasyona dayalı bu yöntem ile kontrol stratejisine bağlı olarak %9 ile %32 arasında değişen elektrik enerjisi tasarrufu sağlanmıştır. Vetterli vd. [7] Basel Üniversitesi ve diğer kurumlar ile birlikte İsviçre Rhaetian Demiryolunda bulunan bir EWII yolcu trenini üç yıl boyunca incelemiştir. Trenden alınan veriler ile analiz programı kalibre edilmiştir. Tren enerji tüketiminin %20-40 arasında olan bölümünün konfor fonksiyonları olarak kullanıldığı anlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu konfor fonksiyonları için kullanılan enerjide tren yapısalı ve HVAC sisteminden kaynaklı kayıplar yaşandığı anlaşılmıştır. Amri vd. [8] yaptıkları çalışmada bir metro aracı için özel olarak tasarlanmış talebe dayalı bir kontrol stratejisinden bahsedilmiştir. Isıtma ve havalandırma için kullanılan mevcut kontrol sistemi, talep kontrollü (akıllı) bir ısıtma ve havalandırma ünitesi ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan talep kontrollü ısıtma ve havalandırma ünitesi ile enerji tüketiminde 325 MWh/yıl azalma simülasyon ile doğrulanmıştır. Marcos vd. [9] yolcu taşımacılığında kullanılan klimanın araç tarafından tüketilen toplam enerjinin içerisinde önemli bir paya sahip olduğunu belirtmiştir. Çalışmada bir araç için basit ve dinamik bir model hazırlanmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Liu vd. [10] klimalı bir tren bölmesinde dinamik soğutma yükünü simüle etmek için matematiksel bir model oluşturmuştur. Modelleme için Gambit, dinamik simülasyon için FLUENT kullanılmıştır. Sonuçlar tren bölmesinin toplam soğutma yükü talebinin farklı bölgelerde farklı saat dilimlerinde maksimum 40,4 – 43,8 kW ve minimum 4,5 kW olduğunu göstermiştir. Çin ulusal standardı ile sonuçlar karşılaştırılmıştır ve daha az enerji tüketimi için çalışmanın dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Shravanth vd. [11] Hindistan Demiryollarına ait bir vagonun çatısına monte edilen fotovoltaiik modüller ile vagonunun günde en az 18 kWh elektrik üretebileceği ve bunun da yıllık 1700 litre dizel yakıt tasarrufu sağlayabileceğini tespit etmişlerdir. Ampofo vd. [12] demiryolu hatları üzerindeki tünellerde tren geçişleri sebebiyle oluşan sıcak havanın diğer kabin içi sıcaklık etkileriyle birleşerek yolcuların konfor şartlarını düşürdüğünü belirterek tünellerin soğutulmasına yönelik bir çalışma yapmıştır. Tünel içi farklı soğutma yöntemleri ile soğutma yükü için talep edilen enerji miktarının azaltıldığı görülmüştür.

İncelenen literatür çalışmaları, yolcu taşımacılığında kullanılan demiryolu araçlarının toplam tükettiği enerjinin yaklaşık %20-40'nın yolcuların konfor şartlarını sağlamak için kullanıldığı göstermiştir [7]. Yıllık tüketim olarak değerlendirildiğinde bu miktar ciddi bir enerji tüketiminin olduğunu ve enerji verimlilik çalışmalarının bu alanda yapılması gerektiğini bize anlatmaktadır.

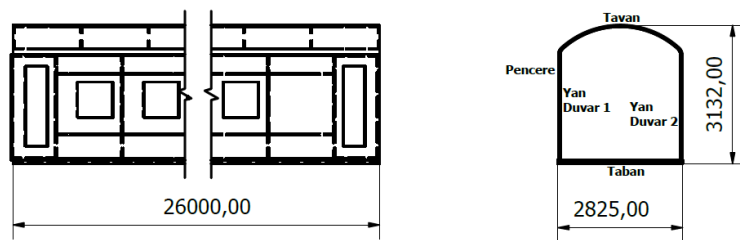
Daha önceki çalışmalarda İklimlendirme aydınlatma gibi sistemlerde yapılan çok sayıda değişikliğin yıllık enerji tüketimine etkisi net bir şekilde ifade edilmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda tren zarf yapısı ve yapının enerji tüketimine olan etkisinin detaylı bir şekilde incelenmediği görülmüştür.

2. Metot

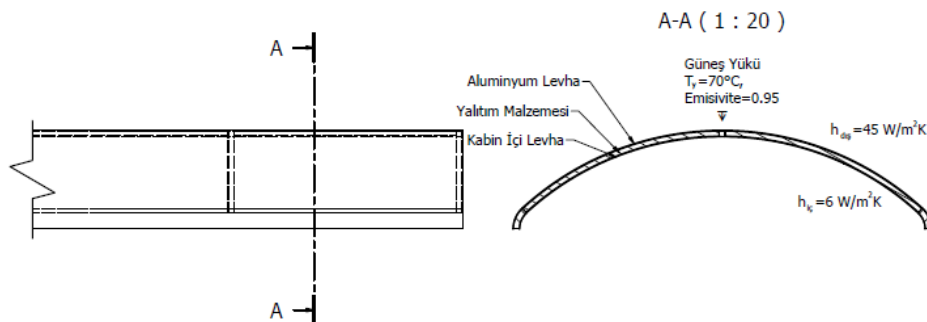
Demiryolu yolcu taşımacılığında kullanılan vagon çeşitlerinden olan, üretimi ülkemizde gerçekleştirilen konvansiyonel yolcu vagonu modellenmek ve analizde kullanılmak üzere seçilmiştir. Vagonun analiz programında incelenebilmesi için tüm geometrisi teknik özelliklerinde belirtilen ölçülerde Autodesk Inventor programı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 1’de vagonun hangi parçalardan oluştuğu belirtilmiştir. Vagon modellemesi sonrasında geometri incelenmek üzere dört farklı bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler; tavan, taban, yan duvarlar ve pencereden oluşmaktadır. Şekil 2’de ayrılan bölümler belirtilmiştir. Tavan, taban, yan duvarlar ve pencerenin farklı geometri ve malzemelere sahip olmaları, maruz kaldıkları ısı yüklerinin farklı olması sebebiyle ayrı modeller olarak değerlendirilmiştir. Şekil 3’te vagonun tavan geometrisi gösterilmiştir. Modelleme ve analizde kullanılmak üzere tavan, taban, yan duvarlar dört farklı kalınlıkta tekrar modellenmiştir.



Şekil 1. Konvansiyonel vagonun patlatılmış teknik resmi



Şekil 2. Konvansiyonel vagonun geometrik ölçüleri ve bölümleri



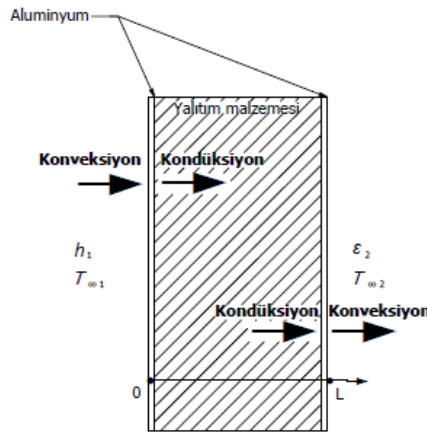
Şekil 3. Konvansiyonel vagonun tavan teknik resmi

Değişen kalınlıklar, yapıda kullanılan yalıtım malzemesinin değişiminden kaynaklanmaktadır. Kullanılan kalınlıklar; 50 mm, 70 mm, 80 mm ve 90 mm'dir. Analizlerde değişen diğer bir parametre farklı kalınlıklarda kullanılan yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısıdır. Tablo 1'de gösterildiği şekilde, dört farklı malzeme için dört farklı ısı iletim katsayısı analize dahil edilmiştir. Bu ısı iletim katsayıları; Liu vd. [10] ve Ampofo vd. [12]'nin çalışmalarında kullandığı 0,08 W/(mK) ve 0,096 W/(mK) katsayılarına ek olarak sektörde uygulamada kullanılan ısı iletim katsayıları olan 0,03 W/(mK) ve 0,046 W/(mK)'dir .

Tablo 1. Analizde kullanılan yalıtım malzemelerinin özellikleri

Yalıtım Malzemesi	Isı İletim Katsayısı	Yangın Tepki Sınıfı	Yoğunluk
Poliüretan Sert Köpük	0,030 W/(mK)	D	30 kg/m ³
Cam Yünü	0,046 W/(mK)	A1-A2	50 kg/m ³
Yalıtım malzemesi-A [10]	0,096 W/(mK)	-	-
Yalıtım malzemesi-B [12]	0,080 W/(mK)	-	-

Analizler için gereken iç ve dış duvarlarda oluşan konveksiyon katsayıları belirlenmiştir. Kabin içi konveksiyon katsayısı iç ortamlar için tespit edilen ve yararlanılan tipik bir değer olmakla birlikte, dış ortam konveksiyon katsayısı, bu tür uygulamalar için Çin demiryollarında önerilen hesaplama yöntemi ile 80 km/s ortalama hızla hareket eden bir demiryolu aracı için konveksiyon katsayısı 45 W/m²K olarak hesaplanmıştır. İç ortam yüzey konveksiyon katsayısı 6 W/m²K olarak kabul edilmiştir. Duvar ve taban için sınır şartları Şekil 4'te belirtilmiştir.



Şekil 4. Tren zarfı için konveksiyon sınır şartları

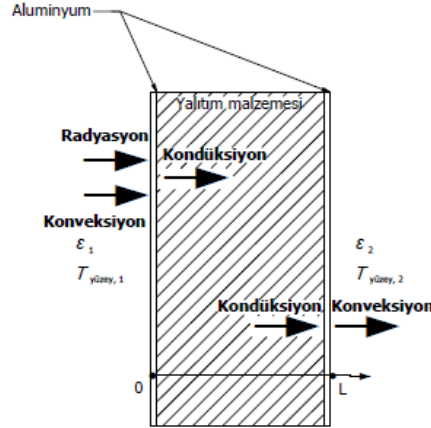
Isı transfer katsayısı dış yüzeyde konvektif kabul edilmiş olup, Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır [10]. Burada; h konveksiyon ısı taşınım katsayısı ve V hızdır. Isı transfer mekanizmasının vagon zarfı boyunca kondüksiyon, zarfın her iki yüzeyinde ise konveksiyon ile transfer gerçekleşmektedir. Bu durumu belirten denge denklemleri Denklem 2 ve Denklem 3'teki gibidir [13]. Burada; k ısı iletim katsayısı, h konveksiyon ısı taşınım katsayısı ve T sıcaklıktır.

$$h_0 = 9 + 3.5 V^{0.66} \quad (V > 0) \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)] \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_2 [T(L, t) - T_{\infty 2}] \quad (3)$$

Analizdeki bir diğer parametre olan iç ve dış ortam sıcaklıkları yaz ve kış mevsimleri için belirlenmiştir. Yaz mevsimi için; iç ortam sıcaklığı 25°C kabul edilerek dış ortam sıcaklığı 30°C ve 35°C, kış mevsimi için; iç ortam sıcaklığı 20°C kabul edilerek dış ortam sıcaklığı 0°C ve 10°C olacak şekilde dikkate alınmıştır. Duvar, cam ve taban için yukarıda belirtilen eşitliklerden yararlanmak mümkünken, Marcos vd. [9]'nin belirttiği üzere araçların tavan bölümlerinin ısı analizlerinde radyasyon etkisinin dikkate alınması gerekmektedir. Tavan için radyasyon sınır şartları Şekil 5'te belirtilmiştir.



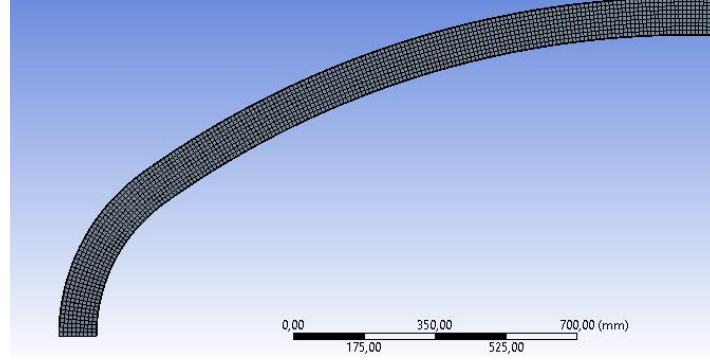
Şekil 5. Tren zarfı için radyasyon sınır şartları

Isı transfer mekanizmasının vagon zarfı boyunca kondüksiyon, zarfın dış yüzeyinde radyasyon ve konveksiyon, zarfın iç yüzeyinde ise konveksiyon ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu durumu belirten denge denklemleri Denklem 4 ve Denklem 5'teki gibidir [13]. Burada; k ısı iletim katsayısı, ε emisivite, σ Stefan Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır.

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \varepsilon_1 \sigma [T_{yüzey,1}^4 - T(0, t)^4] + h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)] \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_2 [T(L, t) - T_{yüzey,2}] \quad (5)$$

Marcos vd. [9] belirttiği üzere, araçların termal analizinde yan yüzeylerden farklı olarak, radyasyon etkisi etkindir ve ihmal edilemez. Bu bölümlere dair yapılacak simülasyonlarda sonuçların daha gerçekçi olması için güneş yükünün etkisi ortalama bir sıcaklık ve emisivite (yayıcılık) değeri ile analize dahil edilmiştir. Değerlerin gerçeğe yakın olabilmesi için benzer geometriye sahip bir yapının belirtilen koşullar altında pik saat sıcaklığı kızılötesi lazer sıcaklık ölçüm cihazı ile yüzey sıcaklığı ve emisivite ölçümleri yapılmıştır. Modelin taban bölümünün analizinde ise, duvar için belirtilen analize ilave olarak zeminde kullanılan tahta tabaka da analize dahil edilmiştir. Üç boyutlu modeller analiz için ANSYS [14] ortamına aktarılmıştır. Sürekli rejim termal modülü kullanılarak analizler yapılmıştır. Şekil 6'da tavan kesitinin analiz ortamındaki ağ yapısı verilmiştir. Ağ yapısına ait kesit, 141956 düğüm sayısı ve 23990 elemandan oluşmaktadır. Ağ yapısı için eleman boyutu 10 mm olarak belirlenmiştir.

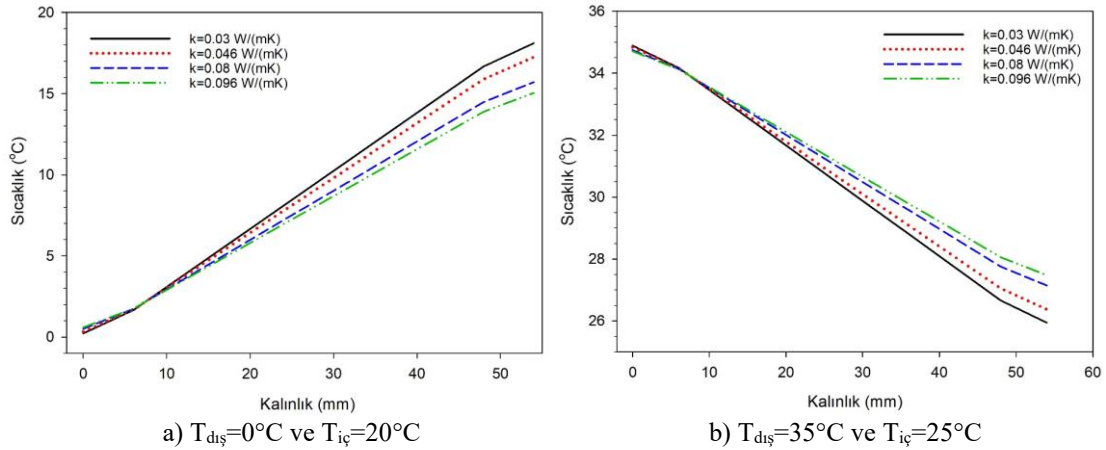


Şekil 6. Tavan geometrisine ait ağ yapısı

3. Bulgular

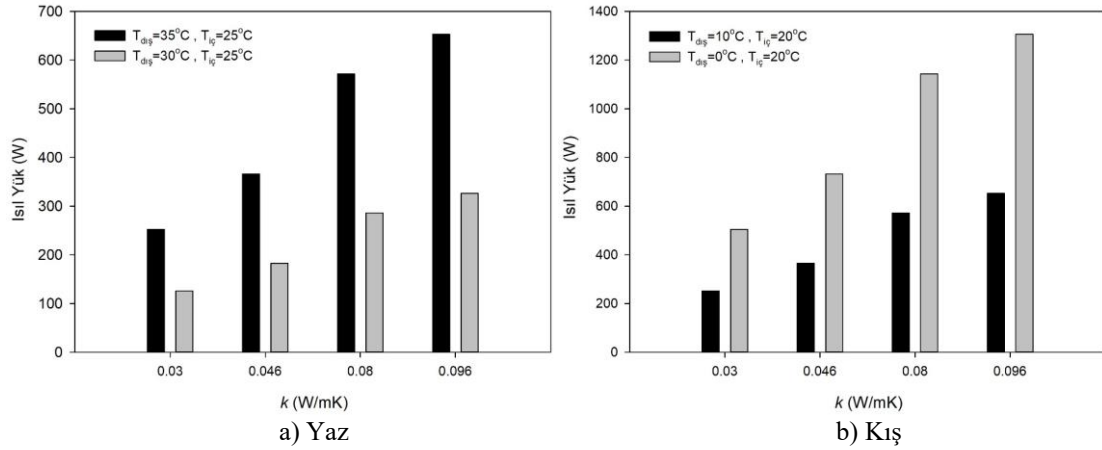
3.1. Yan duvar için bulgular

Şekil 7’de 50 mm kalınlığında yalıtım malzemesi bulunan geometri parametrik olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar dört farklı dış ortam koşulunda dört farklı yalıtım malzemesi için oluşturulmuştur. Beklenildiği şekilde aynı kalınlıkta iletkenlik artırıldığında tren zarfı ısıyı daha iyi iletmektedir. Şekil 7’den görüldüğü üzere yalıtım malzemeleri benzer eğilime sahip olmalarına rağmen aralarında fark yalıtım malzemesinin kalınlığı arttıkça ortaya çıkmaktadır. Yaz şartlarında değerlendirildiğinde ısı iletim katsayısının düşük olması iç ortamı izole etmekte ve aşırı sıcaklık artışını engellemektedir. Isı iletim katsayısı $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan yalıtım malzemesinde yaz koşullarında iç sıcaklığın 25°C ’de tutulamadığı görülürken $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ için iç ortam sıcaklığının bu değere yaklaştığı görülmektedir. Kış koşullarında aynı şekilde 20°C olması beklenen iç ortam sıcaklığı $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan yalıtım malzemesinde 16°C ’ye kadar düşerken $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ olan yalıtım malzemesinde 18°C mertebesinde tutulabilmektedir.



Şekil 7. 50 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

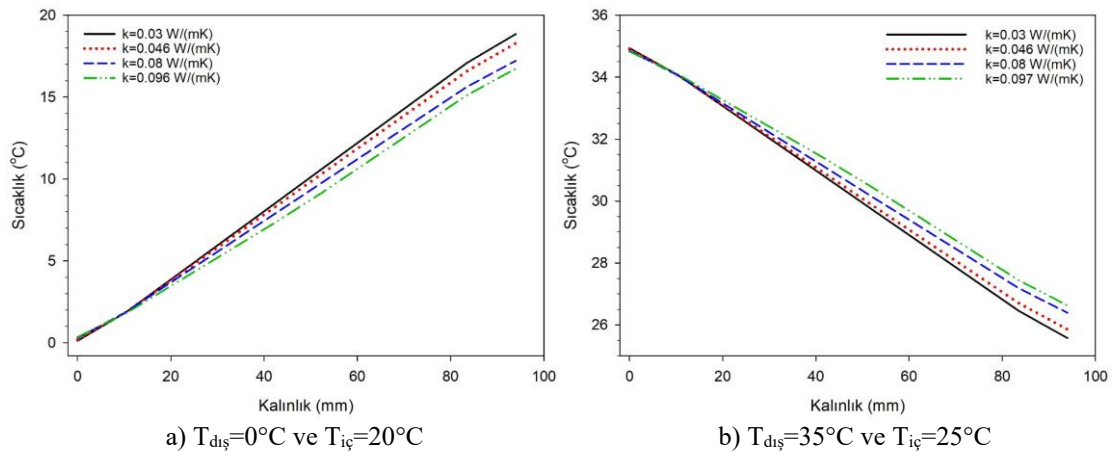
Şekil 8’de ise 50 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki ısı yükleri gösterilmiştir. Yan duvarda 50 mm kalınlık için yaz koşullarında ısı iletim katsayısı $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35°C olduğunda 600 W ’lık bir ısı yük oluşmaktadır. Sıcaklık farkı azaldığında bu yük 300 W ’a kadar düşmektedir.



Şekil 8. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında $t=50$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

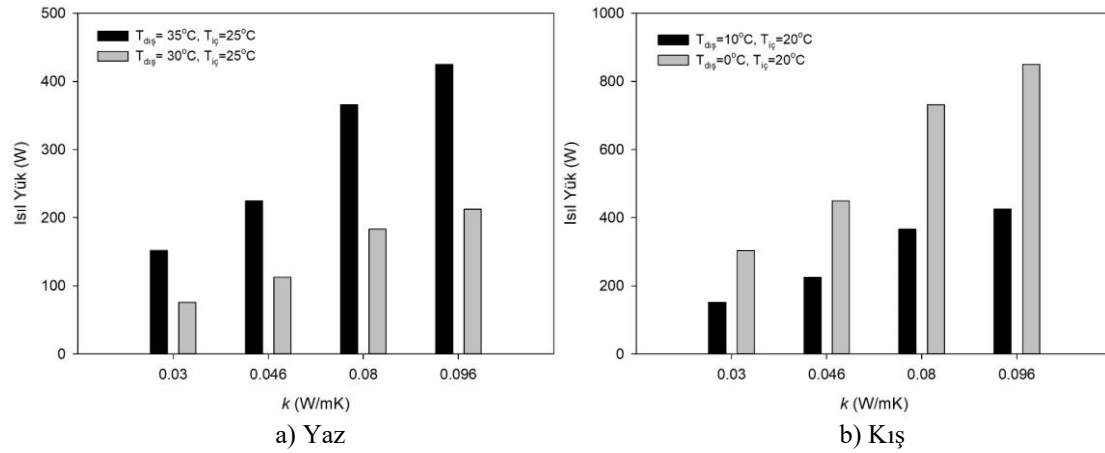
Aynı koşullarda ısı iletim katsayısı $k=0.03$ W/(mK) olan malzemenin kullanıldığı durumda 35°C için 250 W, 30°C için ise 100 W'a kadar düşmektedir. Kış koşulları incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0°C olduğu durumda $k=0.096$ W/(mK) olan malzeme 1300 W'lık bir ısı yüküne ihtiyaç duymaktadır. 10°C dış ortam sıcaklığına çıkıldığında ise bu talep 600 W'a düşmektedir. Isı iletim katsayısı $k=0.03$ W/(mK) olan malzemede ise 0°C için 500 W olan ısı yükü talebi 10°C dış ortam sıcaklığında 200 W'a düşmektedir. Yan duvarda kalınlık arttıkça yaz koşullarında dış ortam sıcaklığı 35°C iken $k=0.03$ W/(mK) ısı iletim katsayısına sahip malzeme için ısı yükü 100 W azalırken $k=0.096$ W/(mK) ısı iletim katsayısına sahip malzemede 200 W azaldığı görülmüştür. Dış ortam sıcaklığı 30°C olduğunda ise ısı yükü farkı daha az olmaktadır.

Şekil 9'da dikkate alınan malzemelerin ısı iletim katsayıları için 90 mm yalıtım malzemesi için sıcaklık değişimleri sunulmaktadır. Beklendiği üzere $k=0.03$ W/(mK) ile temsil edilen malzeme, iç ortam sıcaklığını hedef sıcaklığa yakın tutma konusunda $k=0.096$ W/(mK) olan malzemeden daha iyi performans göstermektedir. İletkenliği en yüksek olan malzeme ısıyı daha iyi iletmekte ve bu da sırasıyla kış ve yaz simülasyonlarında kabin içinde daha soğuk ve daha sıcak bir ortam oluşmasına neden olmaktadır. Altı çizilmesi gereken en önemli nokta kalınlığın etkisidir. Görüldüğü üzere dikkate alınan tüm yalıtım malzemeleri için kabin içi sıcaklıklar kullanılan yalıtım malzemesinin kalınlığına bağlı olarak değişim göstermektedir.



Şekil 9. 90 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 10'da, 90 mm kalınlıktaki yan duvara ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35°C 'de 430 W'lık bir ısı yükü oluşmaktadır.

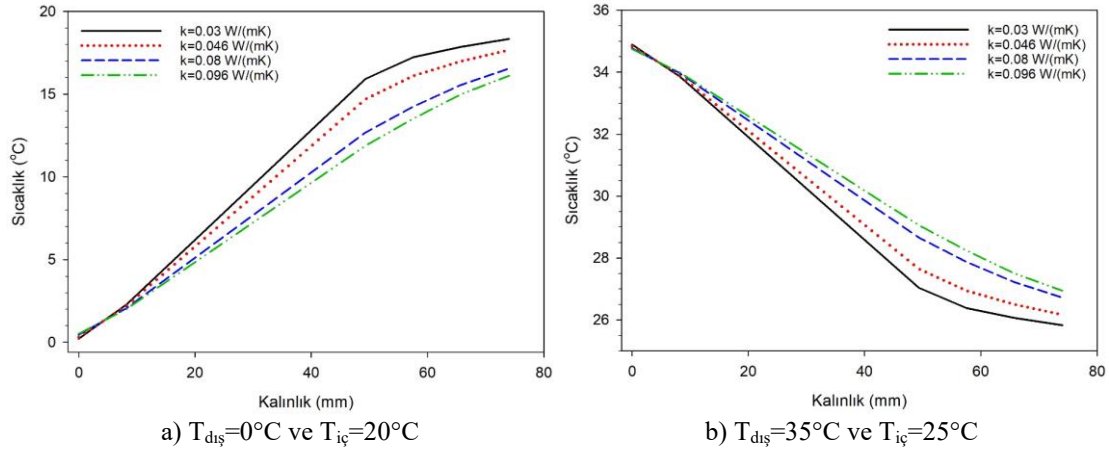


Şekil 10. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında t=90 mm kalınlıktaki ısı yükleri

Dış ortam sıcaklığı 30°C'ye düştüğünde yani iç ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yükü 200 W'a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35°C'de ısı yükü 150 W'a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30°C olduğu durumda ise ısı yükü 70 W'ın altına düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0°C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 850 W değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C'ye artırıldığı durumda ısı talep 400 W'a düşmektedir. ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede ise 0°C'de 300 W'lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10°C olduğu durumda 150 W'a düşmektedir.

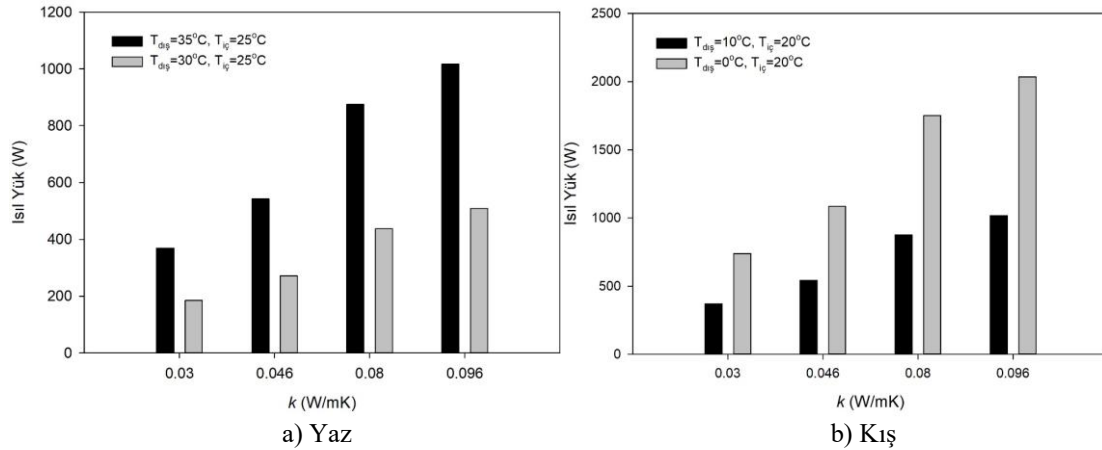
3.2. Taban için bulgular

Vagon geometrisinin bir diğer parçası olan taban duvarının 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı için dört farklı yalıtım malzemesine göre karşılaştırması Şekil 11'de gösterilmiştir. Taban duvarını diğer duvarlardan ayıran bir özellik iç kısımda kullanılan ve maruz kaldığı yükleri eşit olarak karkas yapıya ileten 18 mm kalınlığındaki tahtadır. Zemini rijitleştirerek yolcu konforunu arttıran zemin tahtası buna ek olarak grafiklerde de görüldüğü üzere ısı yalıtımında da fayda sağlamaktadır. Yan duvarlarda olduğu gibi taban duvarında da beklenildiği üzere iletkenlik arttıkça iç ortam sıcaklığının istenilen sıcaklıktan uzaklaştığı görülmektedir. Taban duvarında zemin tahtasının etkisi grafikte görüldüğü şekilde 50 mm'den sonra net olarak görülmektedir. Tahtanın başlangıcı ile lineer azalış eğrisindeki değişiklik yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısına göre farklılaşmaktadır. Aynı parametrelerde yan duvar ile karşılaştırıldığında kabin içi sıcaklığın talep edilen sıcaklığa daha fazla yaklaştığı söylenebilmektedir. Tahtanın etkisi ısı iletim katsayısı düşük olan malzemede daha net görülürken ısı iletim katsayısı arttıkça etkinin incelenmesi zorlaşmaktadır. Yan duvarların analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında farklı malzemelerin 50 mm kalınlıkta aralarında gözle görülür bir fark oluşmaktadır. ısı iletim katsayısı düşük olan yani iyi yalıtkan olarak adlandırılan malzeme kabin içi sıcaklığın talep edilen sıcaklığa en yakın olduğu 26°C ye ulaşmaktadır. ısı iletim katsayısı 0,096 W/(mK) olan iyi iletken olarak tanımlanan malzeme ise 28°C ye yaklaşmaktadır.



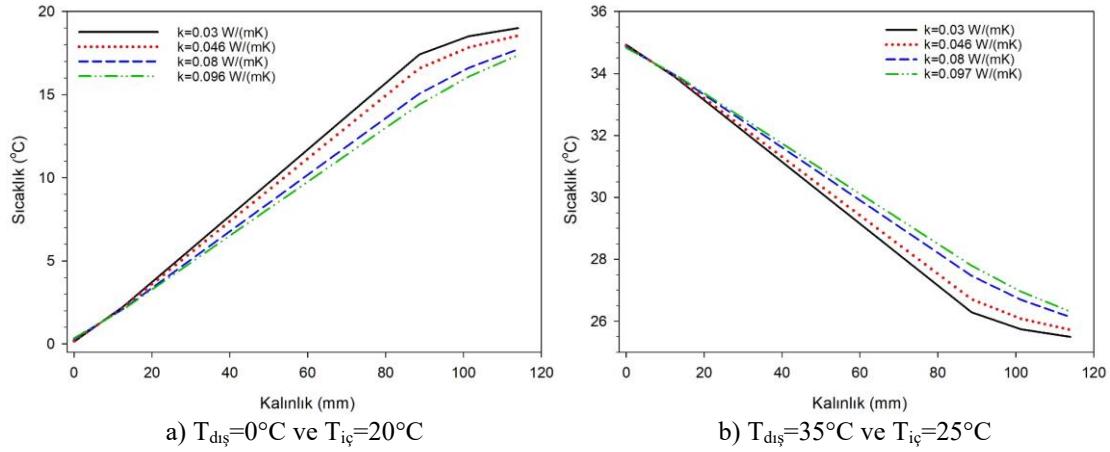
Şekil 11. 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 12’de görüldüğü üzere yan duvarlarda olduğu gibi taban duvarında da benzer farklar görülmektedir. Ek olarak zeminde kullanılan tahtanın etkisi 50 mm kalınlık için yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0.096 W/(mK) olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35°C’de 400 W ek ısı yük oluşturmaktadır. 0.03 için fark 150 W’tır. Kış koşullarında $k=0.096$ W/(mK) olan malzemede 0°C için ısı talebi yan duvara göre 800 W artmaktadır. 0.03 için fark 200 W’tır. Dış ortam sıcaklığı istenilen iç ortam sıcaklığına yaklaştıkça yaz koşullarında ısı yükü, kış koşullarında ısı talebi azalmaktadır. Yan duvarlarda olduğu gibi taban içinde yalıtım malzemesi kalınlığı artırıldığında yaz koşullarında ısı yükü, kış koşullarında ısı talebi azalmaktadır.



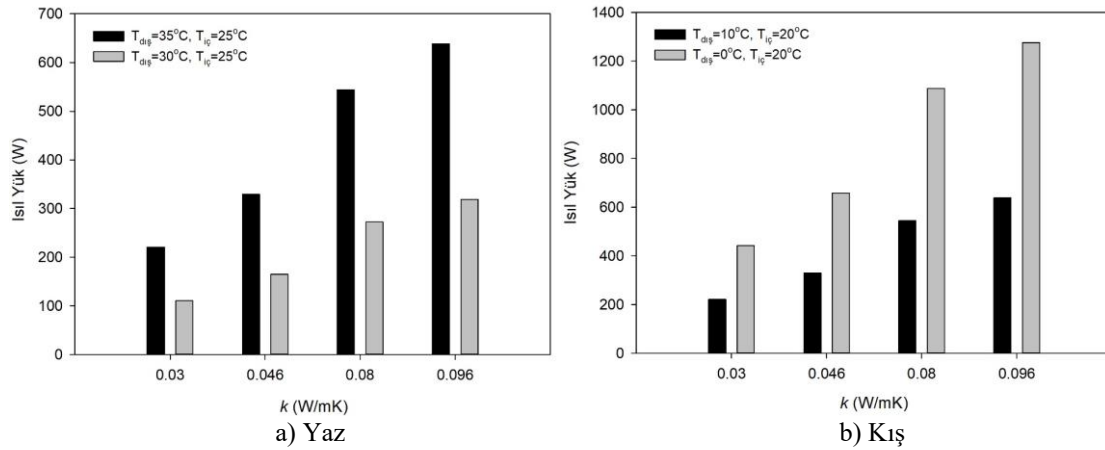
Şekil 12. Tabana ait yaz ve kış koşullarında $t=50$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

90 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan ve parametrik olarak 4 farklı yalıtım malzemesi ile analiz edilen taban duvarının karşılaştırması Şekil 13’de verilmiştir. Farklı kalınlıklarda eğrilerin birbirine benzemesine ek olarak sıcaklık değerlerinde belirgin bir fark görülmemektedir. Diğer kalınlıklarla karşılaştırıldığında iyi iletken ve iyi yalıtkan olarak tanımlanan malzemelerin aralarındaki fark kalınlığın artması ile azalmaktadır. Keskin geçişlere sahip eğrilerin 90 mm kalınlıkta normalleştiği gözlemlenmiştir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/(mK) olan malzemenin 26°C’de neredeyse sabit kaldığı, $k=0,096$ W/(mK) olan malzemenin ise 27°C’ye indiği görülmektedir. Bu durum talep edilen sıcaklığa yaklaştıkça ısı iletim katsayısının etkisinin azalması olarak değerlendirilebilir. Kalınlığın ısı iletimine olan etkisi analiz parametrelerinde kabul edilen kalınlıklarda incelendiğinde yok sayılacak kadar az olduğu görülmüştür.



Şekil 13. 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 14'te 90 mm kalınlıktaki taban duvarına ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C'de 650 W'lık bir ısı yükü oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C'ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yükü 300 W'a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C'de ısı yükü 200 W'a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yükü 80 W'a kadar düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 1300 W değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C'ye artırıldığı durumda ısı talep 600 W'a düşmektedir. ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede ise 0 °C'de 400 W'lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 200 W'a düşmektedir.

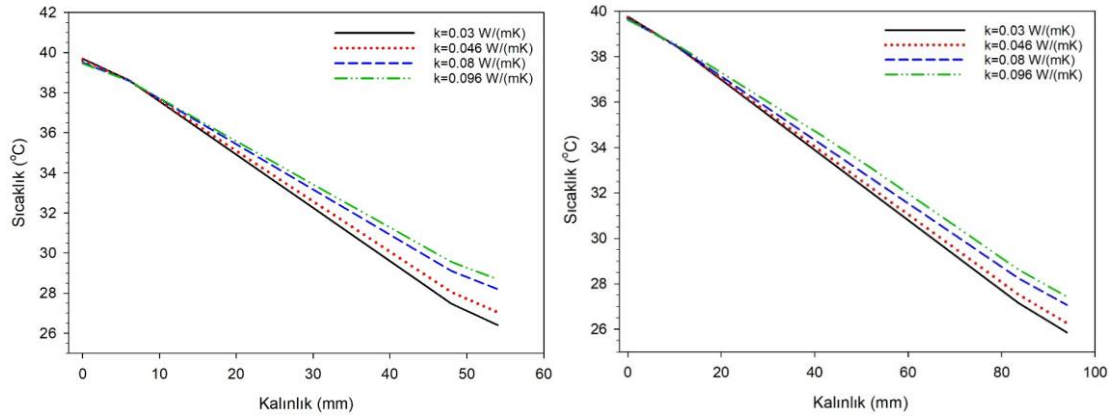


Şekil 14. Tabana ait yaz ve kış koşullarında t=90 mm kalınlıktaki ısı yükleri

3.3. Tavan için bulgular

Vagon geometrisinin bir diğer parçası olan tavan duvarının 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı için dört farklı yalıtım malzemesine göre yaz koşullarında karşılaştırılması Şekil 15.a'da sunulmuştur. Radyasyon yaz ve kış koşullarında kabin içinde sıcaklığı arttırmaktadır. Bu durum kış koşullarında olumlu, yaz koşullarında olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeple tavan duvarının yalnızca yaz koşullarında incelenmiştir. Diğer duvarlardan farklı olarak tavan duvarı analiz parametrelerine radyasyon etkisi eklenmiştir. Grafikler incelendiğinde tavan duvarında iç ve dış duvarların yan ve taban duvarından daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmektedir. Bu durum kabin içi sıcaklığın yaz koşullarında olması gereken 25 °C'nin üzerine çıkartmaktadır.

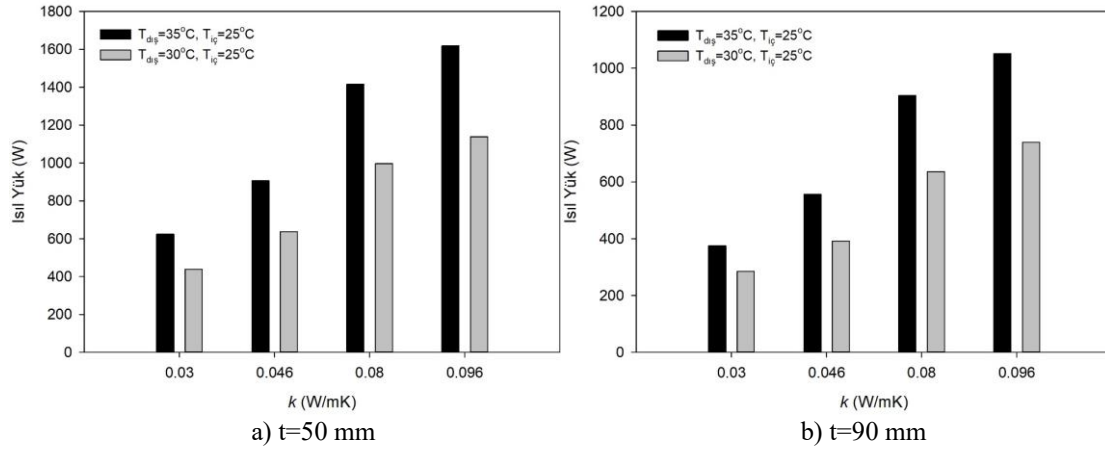
Beklenildiği üzere ısı iletim katsayısı $0,03 \text{ W/(mK)}$ 'ya sahip malzeme, iç ortamın istenilen sıcaklığa daha yakın bir değerde tutulmasını diğer malzemelerden daha iyi sağlamaktadır. Isı iletim katsayısı $0,03 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme 26°C 'ye yaklaşmakta ancak $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme 28°C 'nin üzerinde kalmaktadır. Farklı malzeme kullanımından kaynaklanan sıcaklık farkı 2°C 'nin üzerine çıkmaktadır. Radyasyon etkisi ile değerlendirildiğinde farklı ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin iletme olan etkisi tavan geometrisi incelendiğinde daha net olarak görülebilmektedir. Tavan duvarı için diğer bir yalıtım malzemesi kalınlığı olan 90 mm için analiz sonuçları Şekil 15.b'de verilmiştir.



Şekil 15. Yaz koşulunda ($T_{dış}=35^\circ\text{C}$, $T_{iç}=25^\circ\text{C}$) sıcaklık dağılımı a) $t=50 \text{ mm}$ b) $t=90 \text{ mm}$

Yan ve taban duvarlarında olduğu gibi ısı iletim katsayısının iç sıcaklığın korunmasındaki önemi grafiklerden anlaşılmaktadır. Daha önceki bulgularda olduğu gibi ısı iletim katsayısı $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ olan iyi yalıtkan malzeme, iç ortam sıcaklığını hedef sıcaklığa yakın tutma konusunda $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzemeden daha iyi performans göstermektedir. Isıyı daha iyi ileten ve yaz simülasyonlarında kabin içinde daha sıcak bir ortam oluşmasına neden olan malzeme $0,096 \text{ W/(mK)}$ ısı iletim katsayısına sahiptir. Isı iletim katsayıları kademeli olarak $0,03 \text{ W/(mK)}$ 'den $0,096 \text{ W/(mK)}$ 'e yükseldikçe, eğriler de kademeli olarak yükselmektedir. Grafikler benzer bir eğilimde olsalar da eğriler arasında gözle görülür bir ayrım vardır. Önemli olan bir diğer nokta, kalınlığın etkisidir.

Şekil 16'de ise belirtilen koşul altındaki ısı yüklerinin değeridir. Tavan için radyasyonun analize eklenmesi ısı yükü fazlasıyla arttırmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 35°C iken, ısı iletim katsayısı $0,096$ olan malzeme 1700 W ısı yükü oluştururken ısı iletim katsayısı $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme 600 W bir ısı yükü oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı azaldığında ısı yükü $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ için 400 W $0,03$ için 200 W azalmaktadır. Tavan için yalıtım malzemesi kalınlığının artırılması $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme için 600 W , $0,03$ malzeme için 200 W azalmaya neden olmaktadır.

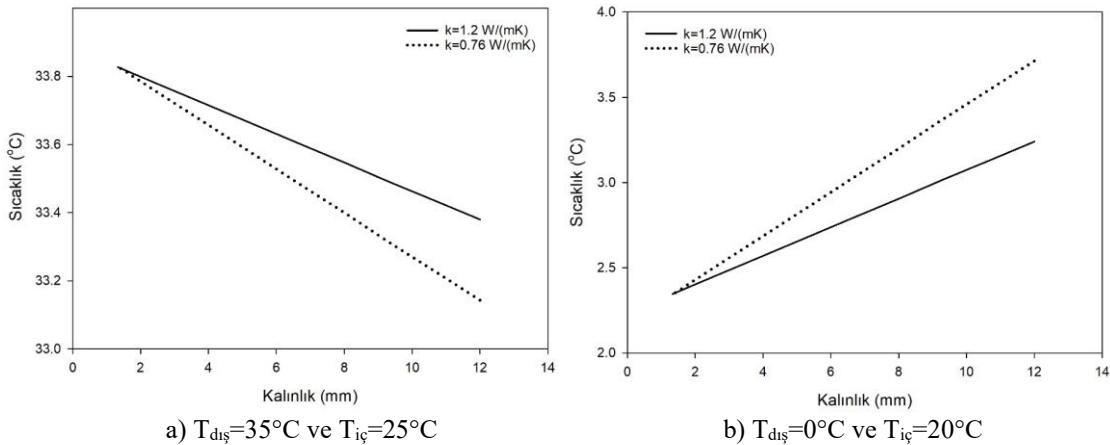


Şekil 16. Tavana ait yaz koşullarında farklı kalınlıktaki ısı yükleri

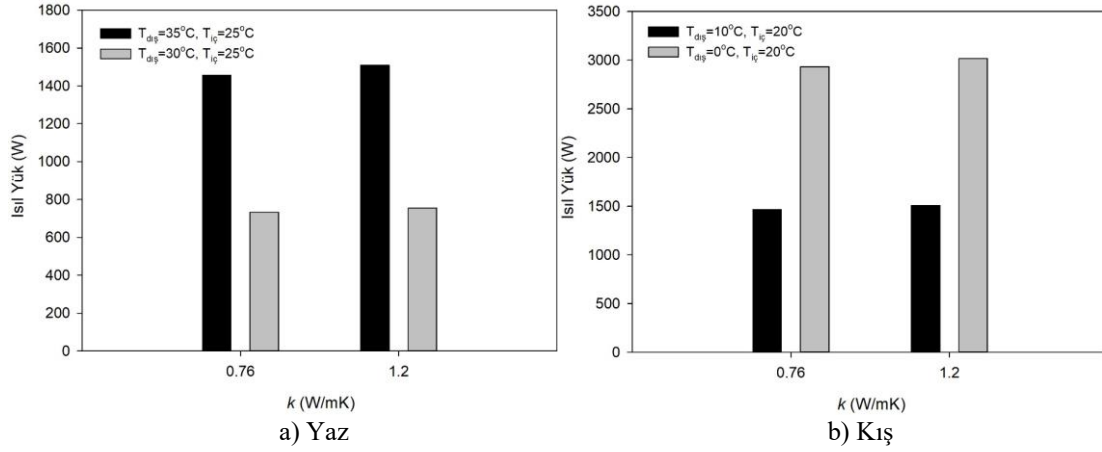
3.4. Pencere için bulgular

Bir diğer ayrı ve önemli bölüm olan pencerelerdeki ısı tepki Şekil 17’de gösterilmiştir. Diğer bölümlerde olduğu gibi, pencere özelinde de ısı kayıpları yaz ve kış koşulları için ayrı ayrı incelenmiştir. Burada, farklı kalınlıktaki camdan ziyade, farklı ve alternatif olarak kullanılan iki malzeme dolayısı ile iki farklı ısı iletim katsayısı incelenmiştir. Kullanılan iki malzemeden birisinin iletim katsayısı 1,2 W/(mK) iken diğerinin ısı iletim katsayısı 0,76 W/(mK)’dir. Isı iletim katsayısı daha yüksek olan camın (1,2 W/(mK)), direncinin daha düşük olması sebebiyle, cam iç yüzeyini istenilen ortam sıcaklığından kışın daha düşük değerlerde tutabildiği, yazın ise daha yüksek değerlerde tutabildiği görülmektedir. Daha yalıtkan olan malzemenin de tersine, cam iç yüzeyini, yazın daha düşük sıcaklarda tutabildiği tespit edilmiştir. Ancak her iki durumda da cam iç yüzey sıcaklıklarının hedef iç ortam sıcaklıklarında çok uzak oldukları hem yaz hem de kışın dış ortam sıcaklığından sadece 2-3°C farklı bir iç yüzey sıcaklığına sahip oldukları gözlenmiştir.

Yaz ve kış koşullarında aynı kalınlıkta farklı ısı iletim katsayılarına sahip camın ısı yüklerinin miktarı Şekil 18’de verilmiştir. Literatürde belirtilen 0,76 W/(mK) ve 1,2 W/(mK) ısı iletim katsayısına sahip camların ısı yüklerinin arasında ciddi bir fark olmadığı görülmüştür.



Şekil 17. Pencerenin yaz ve kış koşullarında farklı ısı iletim katsayıları için analiz sonuçları



Şekil 18. Pencereye ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri

4. Sonuç

Bu çalışmada tren zarfının detaylı incelenebilmesi için tren gövdesi 4 farklı bölüme ayrılmıştır. Tavan, taban, yan duvar ve pencere olarak ayrılan bölümler 50 mm, 70mm, 80 mm ve 90 mm yalıtım kalınlıkları dikkate alınarak modellenmiştir. Isı kaybına etkisi olan diğer bir parametre ise ısı iletim katsayısıdır ve bu çalışmada 4 farklı malzeme için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Tasarlanan modeller dört farklı çevre koşulu için modellenmiş ve analizler bu koşullar gözetilerek tamamlanmıştır. İç ve dış ortam sıcaklıkları için yaz ve kış koşullarında 4 farklı sıcaklık belirlenmiştir. Tavan geometrisinde iç ve dış ortam sıcaklıklarına ek olarak güneş yükü parametrelere dahil edilmiştir. Ticari bir yazılım olan ANSYS içerisindeki “sürekli rejim ısı (steady-state thermal) modülü” kullanılarak parametrik bir analiz yapılmıştır. Analizden elde edilen veriler değişkenlere göre karşılaştırılabilecek şekilde grafiklere dönüştürülmüştür. Çalışma yolcu vagonu zarfında kullanılan yalıtım malzemesi çeşidinin ve kalınlığının enerji tüketimini kayda değer bir şekilde azalttığını göstermektedir. Isı iletim katsayısı azaldıkça yani seçilen malzeme yalıtkan bir malzeme olduğunda beklenildiği şekilde vagon zarfının iç ortam sıcaklığını istenilen sıcaklığa daha yakın bir değerde tutabildiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ısı iletim katsayısı arttığında vagon zarfında iletilen ısı miktarı artmakta ve iç ortam sıcaklığı istenilen değerden uzaklaşmaktadır. Zarf yapısında kullanılan malzemenin ve kalınlığın değiştirilmesi ile yolcuların konfor şartlarını değiştirmeden tüketilen enerji azaltılabilmektedir. 0.03 W/m K’lik ısı iletim katsayısı ile poliüretan sert köpük istenilen yalıtımın sağlanmasında daha etkin olurken, 0.096 W/mK’lik ısı iletim değeri ile yalıtım malzemesi A’nın etkinliğinin düşük olduğu görülmüştür.

Kaynakça

- [1] A. Uğur, "Demiryolu sektöründe Dünya gelişme beklentileri ve Türkiye'nin durumunun araştırılması," *Alphanumeric Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 369-398, 2019, doi: 10.17093/alphanumeric.582290.
- [2] M. Aliahmadipour, M. Abdolzadeh, and K. Lari, "Air flow simulation of HVAC system in compartment of a passenger coach," *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 973-990, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.086.
- [3] C. Dullinger, W. Struckl, and M. Kozek, "A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 78, pp. 616-629, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.065.
- [4] J. P. Powell, A. González-Gil, and R. Palacin, "Experimental assessment of the energy consumption of urban rail vehicles during stabling hours: Influence of ambient temperature," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1-2, pp. 541-547, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.057.
- [5] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, and A. Palombo, "Enhancing trains envelope – heating, ventilation, and air conditioning systems: A new dynamic simulation approach for energy, economic,

- environmental impact and thermal comfort analyses," *Energy*, vol. 204, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117833.
- [6] R. N. Hofstadter, J. Amaya, and M. Kozek, "Energy optimal control of thermal comfort in trams," *Applied Thermal Engineering*, vol. 143, pp. 812-821, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.084.
- [7] N. Vetterli, U. P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, and G. Zweifel, "Energy efficiency of railway vehicles," in *Future Buildings and Districts – From Nano to Urban Scale, CISBAT 2015*, Lausanne, Switzerland, 9-11 September 2015, pp. 955-960.
- [8] H. Amri, R. N. Hofstadter, and M. Kozek, "Energy efficient design and simulation of a demand controlled heating and ventilation unit in a metro vehicle," in *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, Vienna, Austria, 29 June - 01 July 2011: IEEE, pp. 7-12, doi: 10.1109/fists.2011.5973605.
- [9] D. Marcos, F. J. Pino, C. Bordons, and J. J. Guerra, "The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1-2, pp. 646-656, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.054.
- [10] W. Liu, Q. Deng, W. Huang, and R. Liu, "Variation in cooling load of a moving air-conditioned train compartment under the effects of ambient conditions and body thermal storage," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 6-7, pp. 1150-1162, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.12.010.
- [11] M. Shravanth Vasishth, G. A. Vashista, J. Srinivasan, and S. K. Ramasesha, "Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study," *Energy*, vol. 118, pp. 684-691, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.10.103.
- [12] F. Ampofo, G. Maidment, and J. Missenden, "Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 5-6, pp. 633-645, 2004, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.10.018.
- [13] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer*, 4 ed. New York, ABD: McGraw-Hill Education, 2011.
- [14] ANSYS Fluent, *User's Guide, Release 14.0.1*, ANSYS Inc., Lebanon, NH.

Özgeçmiş



Mustafa DÖNMEZ

1995 Ankara doğumludur. Lisans derecesini Karabük Üniversitesi'nden 2018 yılında, Yüksek Lisans derecesini Eskişehir Teknik Üniversitesi'nden 2023 yılında almıştır. Halen Özben Savunma firmasında çalışmaktadır
E-Posta: mustafadonmezrse@gmail.com



Mehmet Mete ÖZTÜRK

1978 Eskişehir doğumludur. Lisans derecesini Dokuz Eylül Üniversitesi'nden 2001 yılında, doktora derecesini 2009 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nden almıştır. 2022 yılında doçent unvan almış olup halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır.
E-Posta: mete.ozturk@ogu.edu.tr

**Bahadır DOĞAN**

1985 Kahramanmaraş doğumludur. Doktorasını 2017 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde tamamlamıştır. 2022 yılında doçent unvan almış olup halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır.

E-Posta: bdogan@ogu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa DÖNMEZ: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama. Mehmet Mete ÖZTÜRK: Kavramsallaştırma, Gözden geçirme ve düzenleme, Kontrol. Bahadır DOĞAN: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol.