

Ev Tipi Soğutma Cihazlarında, Yalıtım Malzemelerine Bağlı Enerji Verimliliğinin Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Murat KORU*¹, Mehmet Efe KANAT¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, 32260, Isparta

(Alınış / Received: 06.12.2017, Kabul / Accepted: 07.05.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 28.05.2018)

Anahtar Kelimeler
Nümerik analiz,
Vakum yalıtım
panelleri,
Enerji verimlilik
indeksi EEI,
Buzdolabı ve
dondurucular

Özet: Enerji ve enerjinin verimli bir şekilde kullanımı günümüzün en önemli konuları arasında yer almaktadır. Özellikle evsel ve endüstriyel soğutma uygulamalarında enerjinin daha verimli kullanımı için 1 Temmuz 2012 tarihinde enerji verimliliği strateji belgesi uyarınca A+ sınıfının altındaki buzdolaplarının satışı ve ithalatı yasaklanmıştır. Bu durum buzdolaplarında mevcut yalıtım malzemeleri poliüretan (PU) yerine çok daha düşük ısı iletkenliğe (4-8 mW/mK) sahip, vakum yalıtım panellerinin (VYP) kullanımını hızla artırmaktadır. Vakum yalıtım panelleri, bir iç dolgu malzemesine, gaz giderici ve geçirimsiz bariyere vakum uygulanması ile elde edilmektedir. Uygulanan vakum seviyesi ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesinde oldukça belirleyici olmaktadır. Bu tip bir panelin buzdolaplarının yalıtımında kullanılması ile enerji tüketim değerlerinin azalacağı ve enerji sınıfının yükseleceği net bir şekilde görülmektedir. Bu çalışma ile ev tipi bir soğutucunun yalıtımında mevcut yalıtım malzemesi olan PU ve VYP kullanımının hem nümerik hem de deneysel olarak analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bağlı olarak her iki yalıtım malzemesinin kullanıldığı bir buzdolabında TS EN 62552 standardına uygun olarak enerji ve performans testleri tamamlanmıştır. Enerji test sonuçlarında PU için günlük enerji tüketimi 1.144 kWh/24h olurken VYP kullanıldığında tüketimin 0.7352 kWh/24h olduğu tespit edilmiştir. Yıllık tüketimleri ise yalıtım malzemesine bağlı olarak sırasıyla 417.56 ve 268.34 kWh/yıl olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre VYP kullanılan ev tipi bir soğutucu için enerji tüketiminde yaklaşık %35.7'lik bir azalma görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara bağlı enerji verimlilik indeksleri hesaplanmıştır. PU yalıtım malzemesinin kullanıldığı buzdolabı için enerji verimlilik indeksi (EEI) A sınıfı olarak belirlenirken VYP kullanılan buzdolabı için EEI A++ sınıfı olarak belirlenmiştir. Bu durumda VYP kullanılan buzdolabının enerji verimlilik indeksi (EEI) PU kullanılan buzdolabına göre iki sınıf iyileşmiştir.

Numerical and Experimental Investigation of Energy Efficiency Depending On the Different Insulation Materials in Household Refrigerating Appliances

Keywords
Numerical
analysis,
Vacuum
insulation panels,
Energy efficiency
index EEI,
Refrigerator and
freezing

Abstract: Energy and efficient use of energy are among important subjects in recent years. Especially, import and selling of refrigerators below A+ are banned according to the strategic document on energy efficiency in order to provide efficient use of energy in home and industrial cooling applications. This situation rapidly causes an increase in use of vacuum insulation materials (VIP) with low thermal conductivity (4-8 mW/mK) instead of use of conventional insulation material (PU). Vacuum insulation materials are obtained by applying a getter to an internal fill material and a vacuum to an impervious barrier. Applied vacuum level is important to determine thermal conductivity. Use of such type of panel in the refrigerator insulations clearly shows that energy level will increase and energy consumption values will decrease. In this study, a numerical and experimental analysis and investigation of PU and VYP materials for the insulation of household refrigerating appliances are performed. According to the analysis results, energy and performance tests of a refrigerator on which each of the insulation materials are used are completed depending on TS EN 62552. It was determined that daily energy consumption of the refrigerator are 1.144 kWh/24h for the PU material and 0.7352 kWh/24h for the VYP material when energy test results were studied. It was also determined that annual energy consumption of the refrigerator will be respectively 417.56 and 268.34 kWh/year. According to these results, energy consumption for a home type cooling system is decrease 35.7% when VYP is used. In this study, using numerical and experimental results, energy efficiency indexes of the materials were also calculated. Energy efficiency index (EEI) of the refrigerator was determined as A when PU was used, However, it was determined as A++ when VYP was used. In this case, compared to the refrigerator with PU, it is seen that EEI of the refrigerator is improved double when VYP is used.

*İlgili yazar: muratkoru@sdu.edu.tr

1. Giriş

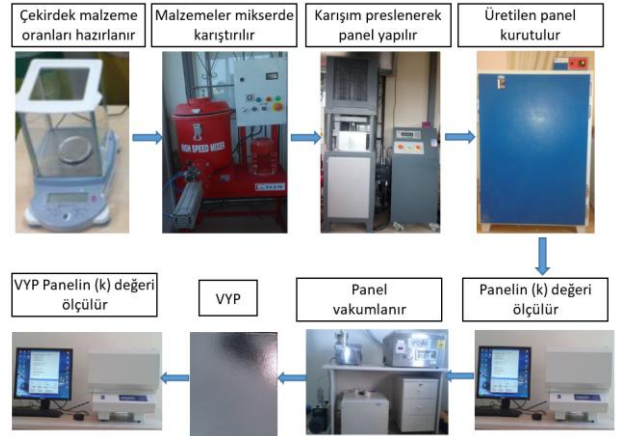
Son yıllarda konutlarda artan enerji tüketimini azaltmanın en etkili yollarından biri yüksek ısı dirence sahip, yeni nesil yalıtım malzemeleri ile mevcut kaynakların daha verimli kullanımını sağlamakla mümkün olmaktadır. Bu amaçla evsel kullanımda toplam enerji tüketiminde %31.1'lik payı ile en yüksek değere sahip buzdolapları, derin dondurucular ve bileşenlerinin enerji tüketiminin azaltılması için çalışmaların ve enerji etiketlenmesinin yapılması son derece önemlidir [1].

Ev tipi buzdolapları ve derin dondurucularda enerji tüketimini etkileyen en önemli iki faktör, yalıtım ve soğutma sistem elemanlarının niteliğidir. Günümüzde üretilen ev tipi buzdolaplarında yüksek verimli kompresörlerin kullanılması verimliliği artırabilmek için yapılan uygulamalarda açısından son derece önemlidir. Günümüzde kompresörlerin verimliliği neredeyse en üst seviyelere ulaşmıştır. Ancak kompresör sadece soğutucunun çalıştığı durumda etkili olabilmektedir. Ev tipi soğutucularda enerji tüketimini azaltmanın diğer etkili yolu ısı yalıtımının iyileştirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Eşdeğer iki soğutucunun yalıtımında biri diğerine göre daha yüksek ısı dirence sahip yalıtım malzemesi ile yalıtıldığında, iç ortam sıcaklığı istenilen değere daha kısa sürede ulaşmakta ve kompresörün devreden çektiği enerji miktarı azalmaktadır. Böylece düşük ısı iletkenliğe sahip bir yalıtım malzemesi ile yalıtılmış bir soğutucu arzu edilen sıcaklık değerini daha iyi muhafaza ederek daha az enerji tüketen bir sistem haline gelmektedir. Son yıllarda hızla kullanımı artan vakum yalıtım panelleri bu amaca yönelik yeni nesil bir malzeme olarak görülmektedir [2].

Vakum yalıtım tekniği 100 yıldan fazla süredir bilinen bir yöntemdir. Vakumu yalıtım amaçlı 1872 yılında ilk kullanan İskoçyalı fizikçi James Dewar'dır. Dewar geliştirdiği sistemde yalıtım boşluğuna kömür tozu ile doldurup vakum uygulamış ve elde edilen ürünü düşük sıcaklık uygulamalarında kullanmıştır [3]. Vakumlu yalıtım tekniği ile ilgili ilk patent 1972 yılında "Cryogenic Storage Apparatus" ismi ile alınmıştır. Bu tekniğin uzun yıllardır bilinmesine rağmen farklı alanlarda uygulamaya yönelik çalışmaları yaklaşık 30 yıl önce başlamıştır [3, 4]. Öte yandan VYP'leri, 90'lı yılların sonu, 2000'li yılların başlarında soğutma uygulamalarında (buzdolapları, soğutucular ve soğuk depolama sistemleri), önceleri prototip olarak daha sonra ise sınırlı sayıda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde VYP teknolojisi, frigofirik araçlarda, bina yalıtımlarında, özel yalıtım gerektiren uygulamalarda, organ ve ilaç nakillerinde ve beyaz eşyalarda uygulanmaktadır [5].

VYP'leri gözenekli yapıya sahip toz malzemenin ya da hücreli yapıdaki köpük malzemenin nispeten gaz geçirgenliği düşük zarf malzeme ile kaplanarak vakumlanması ve zarfın vakumu muhafaza edecek

şekilde atmosfere kapatılması ile üretilir. VYP uygulamaları genelde oluşturulan panellerin yalıtım boşluğuna yerleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Buzdolabı uygulamalarında paneller yalıtım boşluğuna yerleştirildikten sonra geriye kalan boşluklar poliüretan köpük ile doldurularak kombine bir yalıtım gerçekleştirilir. Vakumlu yalıtım panellerinde iç dolgu malzemesinin özelliğine göre gaz giderici malzemeler de kullanılabilir [6]. Vakum yalıtım panelleri yapılırken; nano ve mikronize tozlar, fiber, opaklaştırıcı, sızdırmaz zarf kullanılmaktadır. Opaklaştırıcı madde, ışınlama olan ısı transferini azaltmak için çekirdek malzeme bileşimine katılmaktadır. Fiber malzeme, VYP çekirdeklerinin basınç dayanımı ve çekme gerilmesi gibi mekanik özellikleri için önemlidir. Uygulanan vakum değeri ise ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesinde etkili olmaktadır. Şekil 1'de vakum yalıtım panellerinin üretim aşamaları gösterilmiştir [2].



Şekil 1. VYP Paneli üretimi Aşamaları [2]

Dörtok [6], tarafından yapılan çalışmada referans olarak A+ enerji sınıfına sahip no-frost bir derin dondurucunun enerji verimliliği araştırılmıştır. Dondurucunun soğutma çevrimi ve sistem elemanları tanımlanmış, dondurucularda enerji tüketimini etkileyen parametreler incelenmiştir. Dörtok'un çalışması dondurucu kabinin ısı yalıtımı ve soğutma sistemini oluşturan elemanların optimizasyonu üzerinedir. Referans kabinde, sadece poliüretan (PU) ve PU ile vakum yalıtım panellerinin (VYP) birlikte kullanıldığı iki farklı yalıtım sistemi kullanılmıştır. Çalışmada, dondurucunun dış boyutları sabit tutularak PU yalıtım kalınlıklarındaki değişimin enerji verimlilik indeksine olan etkileri araştırılmış ve uygun yalıtım kalınlıkları belirlenmiştir. Hesaplamalar değerlendirildiğinde, dondurucunun tavan ve taban gibi bazı bölgelerindeki PU yalıtım kalınlığının artışının enerji indeksine olan etkisi az miktarda olurken, özellikle arka duvardaki 70 mm kalınlık artışı ile enerji indeksinin ~%4.5 kadar iyileştiği görülmüştür.

Bayrakçı vd. [7], Standart olarak üretilmiş ve sadece ön kapaklarına VYP uygulanmış aynı model iki farklı buzdolabı üzerinde enerji testleri yapmışlardır.

Çalışmada her iki buzdolabının test sonuçlarının nasıl değiştiği ve enerji verimliliğindeki artış deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel test çalışma sonuçları incelendiğinde VYP uygulanan buzdolabında, enerji verimliliği açısından olumlu katkı olduğu açıkça görülmüştür. Standart olarak üretilen, konvansiyonel yalıtım malzemesi PU ile yalıtılmış buzdolabının enerji indeksi A+ iken, VYP uygulamasıyla bu indeks A++ olmuştur. Enerji verimlilik indeksinin (EEI) bir kademe iyileştiği görülmüştür. Enerji tüketim değerlerine bakıldığında orijinal buzdolabının günlük enerji tüketimi 0.8529 kWh/24h iken, VYP uygulanmış buzdolabında bu değer 0.8017 kWh/24h değerine düşmüştür [7].

Avcıoğlu [8], evlerde yaygın olarak kullanılan statik tip bir buzdolabının soğutucu bölmesindeki sıcaklık dağılımını incelemeye ve iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Probleme ait sayısal modelin oluşturulması deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması neticesinde elde edilen %10'un altında sıcaklık sapma değerleri, oluşturulan sayısal modelin doğruluğunu göstermektedir.

Yılmaz'ın [9] çalışması, günümüz teknolojisiyle üretilebilen üstün nitelikli ısı yalıtım malzemesi olan VYP'nin ev tipi soğutucularda kullanımına yönelik faaliyetleri içermektedir. Isı yalıtım malzemesi olarak PU ve VYP birlikte kullanılmıştır. Çalışma kapsamında özel olarak üretilen ev tipi bir dondurucuda yapılan bilgisayar destekli analizler ve deneysel çalışmalar incelenmiştir. Deneysel çalışmada VYP uygulamasının performansa ve enerji tüketimine olan etkileri belirlenerek buzdolabının enerji sınıfı belirlenmiştir. Sonuç olarak buzdolabının enerji sınıfı B'den A'ya yükselmiştir.

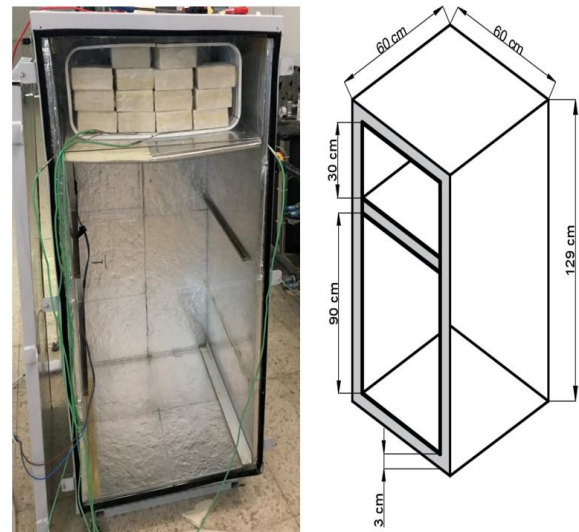
TEDAŞ tarafından aynı hacimde ve kapasitede A+ ve A+++ buzdolabının ortalama enerji tüketimlerini inceleyen bir değerlendirme sunulmuştur. Bu değerlendirmede A+ buzdolabı için ortalama tüketim 0.91 kWh/24h iken A+++ buzdolabında ise ortalama tüketimin 0.34-0.40 kWh/24h aralığında olduğunu belirtmiştir. Bu durumda günlük tasarruf 12.24 kWh, yıllık tasarruf ise 4467.6 kWh olmaktadır. Elektriğin kWh'inin ortalama 33 kuruş olduğu düşünüldüğünde konut için yıllık yaklaşık 1480 TL'lik bir tasarruf demektir. Buzdolaplarının enerji verimliliğini artırmak için kompresör ve otomasyon teknolojisi ile birlikte yalıtım teknolojisinin de geliştirilmesi gerekmektedir. Yeni nesil yalıtım malzemesi olan vakum yalıtım panelleri son yıllarda soğutma sektöründe, özellikle beyaz eşya grubunda yalıtım amaçlı olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Enerji esaslı tüm sektörlerde enerji tüketen cihazların enerji tüketim miktarlarını ve enerji sınıflarının belirlenmesi önemlidir. Özellikle nihai kullanıcının alacağı ürünün enerji sınıfına bakarak karar vermeye başlaması, teknolojik gelişmelerle beraber ısı direnci yüksek yalıtım malzemelerinin kullanımını da

arttırmıştır. Literatür çalışmaları da dikkate alındığında, bu çalışmada ev tipi bir soğutucuda farklı yalıtım malzemelerinin kullanımının enerji verimliliğine olan etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak PU ve VYP kullanılan iki farklı soğutucu için enerji verimlilik indeksleri belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında öncelikle tek kapılı, soğutucu ve dondurucu bölümünden oluşan statik tip bir buzdolabının ANSYS programı kullanılarak sayısal modeli oluşturulmuştur. Analizlerde iki farklı yalıtım malzemesi (PU, VYP) kullanılmış ve ısı kazançlar belirlenmiştir. Buzdolabı duvarlarından gerçekleşen ısı kazançlarının belirlenebilmesi amacıyla dolap, ön ve yan duvarlar, arka duvarlar, üst duvarlar ve alt duvarlar olmak üzere 4 bölgeye ayrılmıştır. Analizler, EC Directive 2010/30/EU standartlarına uygun olarak dondurucu bölge için -18°C'de soğutucu bölge için 5°C'de ve dış ortam sıcaklığı 25°C sınır şartlarında yapılmıştır. Yapılan bu analizlerin gerçek şartlara uygunluğunu sağlayabilmek amacıyla deneysel düzeneğe kullanılan PU, VYP ve PVC malzemelerinin ısı iletkenlikleri TS ISO 8301 standardına uygun olarak ısı akış ölçer yöntemi ile belirlenmiştir. Buzdolabında kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla PU;21.27, VYP; 4.576 ve PVC 175 mW/mK değerindedir. Bu değerler sayısal analizlerde kullanılmıştır. Analizler tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalara geçilmiştir.

Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için öncelikle ev tipi bir soğutucu tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Soğutucunun, kompresör, kondansör, evaporatör, genişleme valfi, vb. diğer parçaları hazır olarak tedarik edilmiş ve daha sonra bu parçalar kabin ile uyumlu bir şekilde montajlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Deneysel çalışmada kullanılan buzdolabı ve ölçüleri

Ev tipi soğutucunun yalıtılacak yüzeyleri portatif olarak hazırlanmış ve deneysel çalışmada iki farklı

yalıtım malzemesi (PU ve VYP) kullanılmıştır. PU yalıtım malzemesi ticari olarak temin edilmiş, VYP S.D.Ü. Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma Uygulama Merkezi (DEYMAM) bünyesinde hazırlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Deneysel olarak kullanılan yalıtım malzemeleri

Yalıtım malzemeleri 300x300x30mm boyutlarında hazırlanmıştır. VYP numuneleri nano fumed silika, cam elyaf, opaklaştırıcı ve bu malzemelerin farklı oranlarda karışımlarının preslenmesi ve aynı vakum (<0.1 Pa) değerlerinde vakumlanması ile elde edilmiştir.

Ev tipi soğutucuların testleri TS EN 62552 standardına göre iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar enerji ve performans testleridir. Ev tipi soğutucularda enerji verimlilik sınıflarının belirlenmesi için yapılan testlerde belirli koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar, test odası sıcaklığı, oda nemi ve hava dolaşım koşullarıdır. Diğer taraftan enerji testleri için gerekli olan M paketlerinin yerleşim planı da önemlidir. Ev tipi soğutucular için dört farklı sıcaklık aralığı ve bu sıcaklık aralıklarına bağlı olarak dört iklim sınıfı standart olarak belirlenmiştir (Tablo 1) [10].

Tablo 1. Ev tipi soğutma cihazları iklim sınıfları (TS EN 62552)

Sınıf	Sembol	Ortam sıcaklık aralığı °C
Genişletilmiş ılıman	SN	+ 10 ile + 32
İlman	N	+ 16 ile + 32
Alt tropikal	ST	+ 16 ile + 38
Tropikal	T	+ 16 ile + 43

Yapılan deneylerde periyodik kontrol sırasında ortam sıcaklığındaki değişimin maksimum $\pm 0.5^\circ\text{C}$ olmasına dikkat edilmiş ve ortam sıcaklığı ölçülmüştür. Deney odasının bağıl neminin % 45-75 arasında olmasına dikkat edilmiş ve nemölçer ile ölçülmüştür. Odanın hava dolaşım hızının belirtilen tolerans sınırları

<0.25m/s içerisinde olmasına özen gösterilmiştir [10].

Deneysel çalışmalarda enerji testleri için ortam sıcaklığı 25°C ortam bağıl nemi %50 olarak hazırlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri için Almemo Alborn 5590-2 Data logger sistemi ile kalibrasyonları yapılmış $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ölçme hassasiyetine sahip 1.5 mm çapında k tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Nem ölçümlerinde Testo-625 modeli nemölçer kullanılmıştır. Yine enerji testleri yapılırken dondurucu kısmının -18°C ve soğutucu kısmının 5°C olması için termostat ayarlanmıştır. Performans testleri, dondurucu ve soğutucu bölümlerinin alt ve üst sıcaklık değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda Tablo 1 verilen ılıman iklim sınıfı ve N soğutucu tipi için performans testleri 32 ve 15°C 'de yapılmıştır [10]. Enerji ve performans testleri yapılırken ev tipi soğutucunun dondurucu bölmesine standarttaki yerleşim planına uygun olarak 500 g'lık M paketleri (50x100x100 mm) yerleştirilmiştir. Bu paketlerin sıcaklıklarının ölçülmesi için dolgu malzemesi ile doğrudan temas edecek şekilde, paketlerin geometrik merkezine ısı çiftleri yerleştirilmiş böylece sıcaklıklar ölçülmüştür. Deneysel olarak kullanılan M paketleri, dikdörtgen paralel yüzlü, büyüklüğü, kütlesi ve ambalajı standarda uygun olarak seçilmiştir [10].

EC Directive 2010/30/EU standartlarına göre ev tipi bir soğutucunun enerji verimlilik sınıfı, "enerji verimlilik indeksi" adı verilen ve "EEI" ya da "I" ile gösterilen bir sayıya bağlı olarak belirlenir (Tablo 2).

Tablo 2. Enerji verimlilik indeksi [11]

Enerji verimlilik indeksi (EEI)	Enerji verimlilik sınıfı
EEI < 22	A+++
$22 \leq \text{EEI} < 33$	A++
$33 \leq \text{EEI} < 42$	A+
$42 \leq \text{EEI} < 55$	A
$55 \leq \text{EEI} < 75$	B
$75 \leq \text{EEI} < 95$	C
$95 \leq \text{EEI} < 110$	D
$110 \leq \text{EEI} < 125$	E
$125 \leq \text{EEI} < 150$	F
$\text{EEI} \geq 150$	G

Enerji verimlilik indeksinin hesaplanmasında, soğutma cihazının yıllık enerji tüketimi ile cihazın standart yıllık enerji tüketimi karşılaştırılır. Bir soğutucunun enerji verimlilik indeksi (EEI) denklem 1 ile hesaplanır [1].

$$\text{EEI} = \frac{AE_c}{SAE_c} \cdot 100 \quad (1)$$

Denklemden, AE_c cihazın yıllık enerji tüketimini ($AE_c = E_{24h}$ 365 kWh/yıl), SAE_c ise cihazın net hacmine ve bazı katsayılarla bağlı standart yıllık enerji tüketimini (kWh/yıl) ifade etmektedir. SAE_c , standart

yıllık enerji tüketimi 2 ve 3 no'lu denklemler kullanılarak hesaplanır [10].

$$SAE_C = V_{eq} \times M + N + CH \quad (2)$$

$$V_{eq} = \left[\sum_{c=1}^{c=n} V_c \times \frac{(25 - T_c)}{20} \times FF_c \right] \times CC \times BI \quad (3)$$

Denklemlerde kullanılan terimler aşağıda detay bir şekilde açıklanmıştır.

V_{eq} : Düzeltilmiş net hacim

M ve N: Cihazın sınıfına bağlı sabit (Tablo 3)

CH: Saklama kabı hacmi en az 15 litre olan bir soğutma bölümüne sahip ev tipi buzdolabında, 50 kWh/yıl'a eşittir.

n: Soğutucu bölüm sayısı

V_c : Her bölmenin net hacmi (lt)

T_c : Her bölmenin tasarım sıcaklığı (°C)

FF_c : Zorlamalı iç hava dolaşımı ile soğutulan bölmeler için 1.2 diğer bölmeler için 1 alınan bir faktör

CC: İklim sınıfına ve soğutucu bölme özelliklerine bağlı olarak değişen düzeltme faktörü (Tablo 4)

BI: Hacim düzeltme faktörü, genişliği 58 cm'nin altındaki ankastre cihazlar için 1.2 ve diğer cihazlar için 1 değerindedir.

Tablo 3. Cihaz sınıfına bağlı M ve N katsayıları [10].

Cihazın sınıfı		M	N
1	Bir veya daha çok taze gıda saklama bölümüne sahip buzdolabı	0.233	245
2	Buzdolabı-mahzen, mahzen ve şarap saklama cihazları	0.233	245
3	Buzdolabı-soğutucu ve 0 yıldızlı bölmeye sahip buzdolabı	0.233	245
4	Tek yıldızlı buzdolabı *	0.643	191
5	Çift yıldızlı buzdolabı **	0.450	245
6	Üç yıldızlı buzdolabı ***	0.777	303
7	Buzdolabı- derin dondurucu *(***)	0.777	303
8	Dikey derin dondurucu	0.539	315
9	Kutu tipi dondurucu	0.472	286
10	Çok kapılı veya diğer soğutucu cihazlar	(1)	(1)

Tablo 3'de enerji verimlilik indeksinin (EEI) hesaplanmasında kullanılan cihaz sınıfına bağlı M ve N katsayıları verilmiştir. İklim sınıfına ve soğutucu bölme özelliklerine bağlı olarak değişen düzeltme faktörü (CC) Tablo 4'de verilmiştir [10].

Tüm bu parametreler dikkate alınarak ev tipi soğutma cihazları için üretici ismi, model, verimlilik sınıfı, yıllık kWh cinsinden enerji tüketimi, soğutucu ve dondurucu bölmelerinin hacimleri ve akustik gürültü emisyon değerlerinin belirtildiği etiketler EC Directive 2010/30/EU standardına uygun olarak düzenlenmektedir

Tablo 4. İklim sınıfına ve soğutucu bölme özelliklerine bağlı düzeltme faktörü [10]

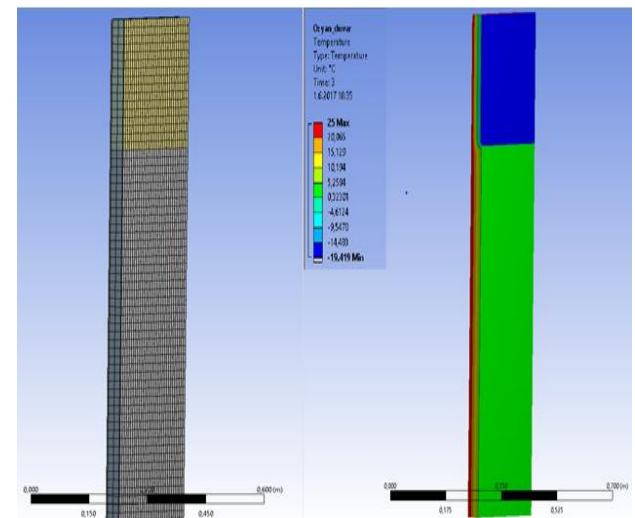
Bölme Özelliği	CC
Kiler bölümü	1.35
Taze gıda bölümü	1.30
0 derece bölümü	1.25
Yıldızsız bölümü	1.25
Tek yıldız (*) bölümü	1.20
2 yıldız (**) bölümü	1.15
3 (***) ve 4 yıldız (****) bölümü	1.10

3. Bulgular

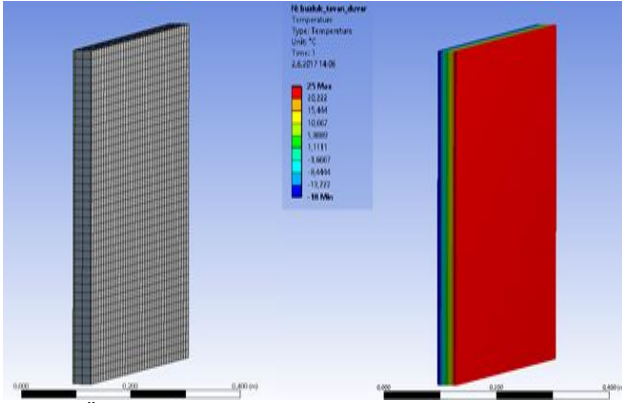
3.1. Sayısal çalışma

Sayısal çalışma ANSYS programı kullanılarak TS EN 62552 standardında belirtilen enerji testi sınır şartları dikkate alınarak yapılmıştır. Bu değerler standartta belirtildiği gibi ortam sıcaklığı 25°C, soğutucu kısmı sıcaklığı 5 °C ve dondurucu kısmı sıcaklığı -18 °C olarak alınmıştır. Hava akış hızının düşüklüğü, ortam sıcaklığı ve soğutucu yüzeyinden ölçülen sıcaklıklar arasındaki farkın düşüklüğü taşınım ve ışıma yoluyla gerçekleşen ısı transferlerinin ihmal edilmesini sağlamıştır. Uygulanan yalıtım kalınlıkları her iki malzeme içinde 30 mm olarak alınmıştır.

Buzdolabı dört farklı bölgeye ayrılmış ve her bölge analiz edilmiştir. Analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. Birinci bölge olarak sağ, sol yan duvarlar ve ön kapı analiz edilmiştir. Şekil 4'de yan duvarlar ve ön kapı için ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları verilmiştir. Sınır şartları dikkatli incelendiğinde dondurucu ve soğutucu bölümlerinin birlikte analiz edildiği görülmektedir. Yalıtım malzemesine bağlı toplam ısı akısı değerleri analiz sonuçları sırasıyla PU için 43.74 ve VYP için 9.58 W/m² olarak gerçekleşmiştir.

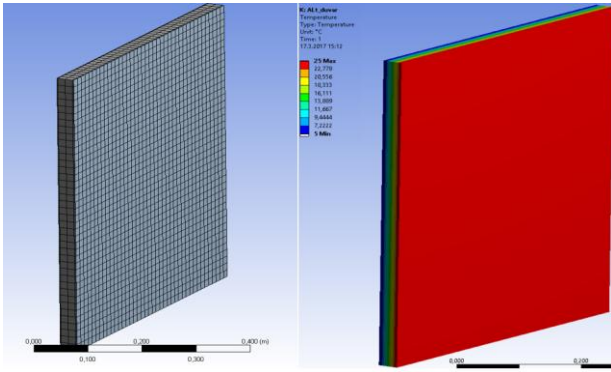


Şekil 4. Yan, ön duvar ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları



Şekil 5. Üst duvar ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları

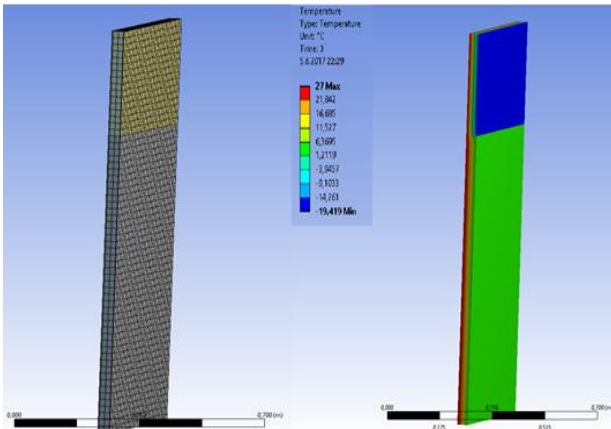
İkinci bölge üst duvar için ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları Şekil 5’de verilmiştir. Üst duvarda PU yalıtım malzemesi için yapılan analiz sonucunda toplam ısı akısı 30.15 W/m², VYP için ise toplam ısı akısı 6.54 W/m² olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Alt duvar ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları

Üçüncü bölge alt duvar ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları Şekil 6’da verilmiştir. Alt duvardan gerçekleşen toplam ısı akısı değerleri PU ve VYP için sırasıyla 14.00 ve 3.04 W/m² değerindedir.

Son bölge arka duvar ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları Şekil 7’de gösterilmiştir. Arka duvar için sayısal analiz sonuçları ise PU için 46.04 ve VYP için 10.19 W/m² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Arka duvar ağ yapısı ve sıcaklık sınır şartları

Ev tipi soğutucu iki farklı yalıtım malzemesinin kullanıldığı toplam 3 katmandan (PVC, PU veya VYP, koruyucu saç) oluşmaktadır. Katmanlar içten dış doğru sırasıyla 0.0028 m kalınlığında ve 175 mW/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip PVC, 0.03m kalınlığında 21.27 mW/mK ısı iletkenliğinde PU, 0.03m kalınlığında 4.576 mW/mK ısı iletkenlik değerinde VYP ve son katman olarak koruyucu saç elemandan oluşmaktadır. Dış yüzeylerden soğutucunun içine doğru bir ısı transferi söz konusudur. Bu ısı transferini modellemek için toplam ısı transfer katsayısı (U, W/m²K), iç ve dış yüzey sıcaklıkları ve ısı taşınım katsayılarından faydalanılmıştır. Hesaplamalar birim yüzey alan için yapılmıştır. Toplam ısı transfer katsayısı (U) denklem 4 ve toplam ısı dirençler (R, m²K/W) denklem 5 ile belirlenmiştir.

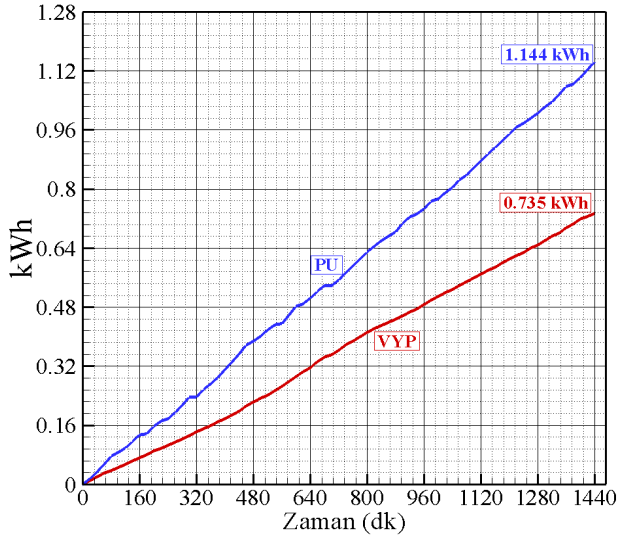
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{dış}} + \frac{L_Y}{k_Y} + \frac{L_{PVC}}{k_{PVC}} + \frac{1}{h_{iç}}} \quad (4)$$

$$R_{Toplam} = \frac{1}{h_{dış}} + \frac{L_Y}{k_Y} + \frac{L_{PVC}}{k_{PVC}} + \frac{1}{h_{iç}} \quad (5)$$

Denklem 4’de L_Y [m] kullanılan yalıtım malzemesi (PU, VYP) kalınlığı (m), k_Y Yalıtım malzemesi (PU, VYP) ölçülen ısı iletkenlik katsayısı [W/mK] poliüretanın veya VYP ısı iletim katsayısını, L_{PVC} PVC’nin kalınlığını k_{PVC}, PVC’nin ısı iletkenlik katsayısını göstermektedir. Dış ortam sıcaklığı 25°C ve kabin iç sıcaklığı -18 °C’dir. İç ortamdaki taşınım katsayısı h_{iç} 15 W/m²K, dış ortamdaki taşınım katsayısı da h_{dış} 9 W/m²K olarak kullanılmıştır [11]. Yapılan hesaplamalarda PU yalıtım malzemesi kullanıldığında U=0.623 W/m²K, R=1.604 m²K/W ve yalıtım malzemesi olarak VYP kullanıldığında U=0.148 W/m²K, R=6.750 m²K/W olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre yalıtım malzemesine bağlı toplam ısı direnç değerinde 4.2 kat bir artma meydana gelmektedir. Böylece soğutucunun enerji tüketim değerleri ciddi oranda azalmakta ve kullanılabilir hacim artmaktadır.

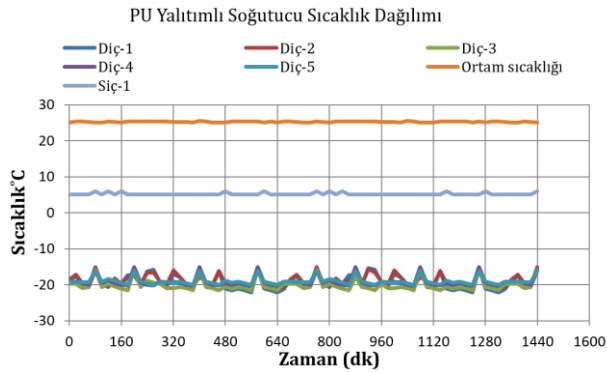
3.2. Deneysel çalışma

Deneysel çalışmalarda öncelikle enerji testleri yapılmıştır. Enerji testleri yapılırken test odası sıcaklığı 25°C ve bağıl nemi %53 olarak ayarlanmıştır. Termostat ayarı dondurucu bölüm için -18°C ve soğutucu bölüm için 5°C’yi sağlayacak konuma getirilmiştir. Öncelikle PU yalıtım malzemesinin kullanıldığı durum için testleri yapılmış ve 24 saatlik çevrimde soğutucu 1.144 kWh elektrik tüketmiştir. Daha sonra yalıtım malzemesi değiştirilmiş VYP kullanıldığı durum için 24 saatlik enerji testinde soğutucu 0.7352 kWh elektrik tüketmiştir (Şekil 8) .

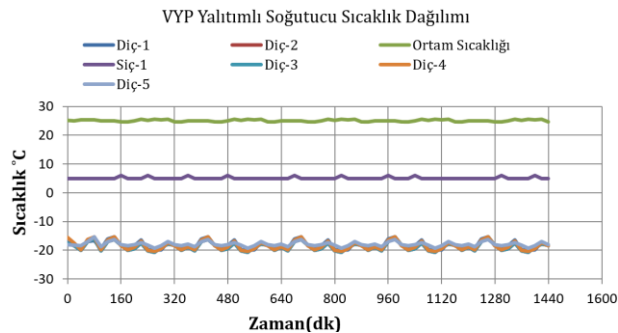


Şekil 8. PU ve VYP için zaman bağlı enerji test grafiği

Şekil 9 ve 10'da PU ve VYP'nin, 25°C ortam sıcaklığında buzdolabının soğutucu ve dondurucu bölümlerinden ölçülen sıcaklık değerleri verilmiştir. Şekil 9 ve 10 birlikte değerlendirildiğinde, özellikle dondurucu bölümünden ölçülen sıcaklıklar için, PU yalıtım malzemesi kullanılan durumda dondurucu sıcaklığı olan -18°C daha fazla sapmanın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kompresörün devreye girme sıklığı ve devrede kalma süresi ile ilişkilidir.



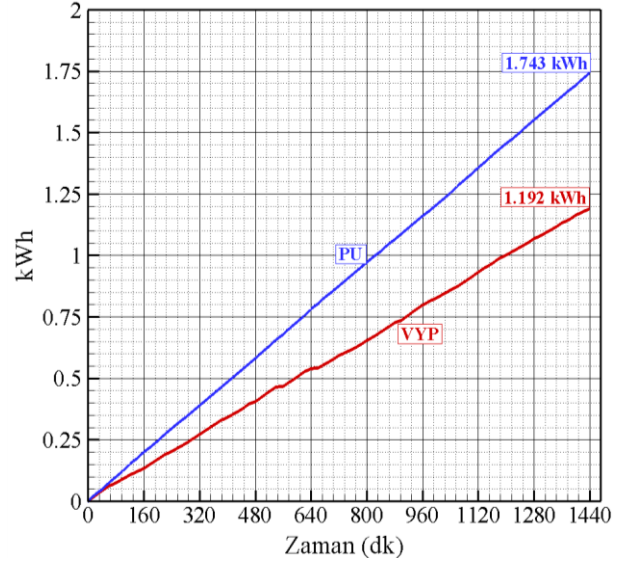
Şekil 9. PU yalıtımlı ev tipi soğutucu enerji testi



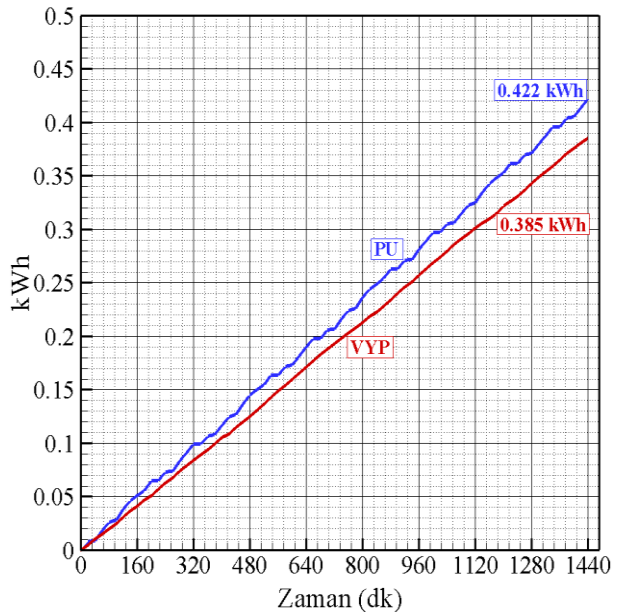
Şekil 10. VYP yalıtımlı ev tipi soğutucu enerji testi

Enerji testleri tamamlandıktan sonra Tablo 1'de belirtilen TS EN 62552 standardına uygun olarak ılıman iklim sınıfı için 32 ve 15°C test odası ortam sıcaklığında ve %55 bağıl nem değerinde performans testleri yapılmıştır. Performans testlerinde termostat

ayarını dondurucu bölüm için -18°C ve soğutucu bölüm için 4°C sağlayacak konuma getirilmiştir. PU ve VYP kullanılan durum için dış ortam sıcaklığının 32°C olduğu durumda, 24 saatlik performans testi sonuçları Şekil 11'de gösterilmiştir. PU kullanılan durumda ev tipi soğutucu 1.743 kWh elektrik tüketirken VYP kullanıldığı durumda tüketim 1.192 kWh olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 11. PU ve VYP için 32°C'de zaman bağlı performans test grafiği



Şekil 12. PU ve VYP için 15°C'de zaman bağlı performans test grafiği

Diğer performans testi için test odası ortam sıcaklığı 15°C ayarlanmıştır. Bu deneyde termostat ayarını dondurucu için -18°C ve soğutucu için 4°C değerlerini sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır. PU ve VYP kullanılan durum için yapılan 24 saatlik performans testi sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir. PU kullanılan durumda ev tipi soğutucu 0.422 kWh elektrik tüketirken VYP kullanıldığı durumda tüketim 0.385 kWh olarak gerçekleşmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada ev tipi bir soğutucuda farklı yalıtım malzemesi (PU, VYP) kullanımının enerji verimliliğine olan etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan vakum yalıtım panelleri, SDÜ DEYMAM merkezi bünyesinde imal edilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle buzdolabının ANSYS programı kullanılarak sayısal olarak analizi yapılmıştır. Buzdolabı toplamda ön ve yan duvarlar, arka, üst ve alt duvarlar olmak üzere dört bölgeye ayrılmıştır. Nümerik hesaplamalarda PU ile VYP kullanımı karşılaştırıldığında ön ve yan duvarlardan gerçekleşen ısı akısında %78 azalma gerçekleşmiştir. Benzer şekilde üst duvardan %78.3, alt duvardan %78.2 ve arka duvardan %77.8 ısı akısı değerlerinde azalma belirlenmiştir. En yüksek ısı akısı kondanser sıcaklığının da etkisi ile arka duvardan gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar yalıtım malzemesi olarak VYP uygulamasının PU uygulamasına göre, enerji verimliliği açısından olumlu katkısı olduğu açıkça göstermektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında deneysel olarak ev tipi bir soğutucu tasarımı, montajı yapılmış ve gaz şarjı ile çalışır hale getirilmiştir. Buzdolabı TS EN 62552 standartlarında belirtilen çalışma koşullarına bağlı enerji ve performans testlerine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarında PU yalıtım malzemesi kullanılan buzdolabının enerji verimlilik indeksi (EEI) A olarak hesaplanmıştır. Yalıtım malzemesi olarak vakum yalıtım paneli (VYP) kullanıldığında ise EEI, A++ olarak belirlenmiştir. Bu durumda VYP kullanılan sistemin enerji sınıfı PU kullanılan duruma göre iki sınıf iyileşmiştir. Enerji test sonuçlarında PU için günlük enerji tüketimi 1.144 kWh/24h olurken VYP kullanıldığında tüketimin 0.7352 kWh/24h olduğu tespit edilmiştir. Yıllık tüketimleri ise yalıtım malzemesine bağlı olarak sırasıyla 417.56 ve 268.34 kWh/yıl olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre VYP kullanılan ev tipi bir soğutucu için enerji tüketiminde yaklaşık %35.7'lik bir azalma görülmüştür.

Ev tipi soğutucu TS EN 62552 standardında belirtilen iklim sınıfına bağlı performans testlerine de tabi tutulmuştur. Bu testler 15 ve 32°C dış ortam sıcaklığında yapılmıştır. 15°C'de enerji tüketimindeki iyileşme %8.76 olarak gerçekleşirken 32°C'de iyileşme %36.8 olarak gerçekleşmiştir.

Yapılan ev tipi soğutucuda yalıtım malzemesine bağlı toplam ısı transfer katsayıları ve ısı direnç değerleri belirlenmiştir. PU için U ve R değerleri sırasıyla 0.623 ve 1.604 olurken, VYP'li durumda U ve R değerleri sırasıyla 0.148 ve 6.750 olarak hesaplanmıştır. Bu durum ısı direnç değerinin yaklaşık olarak 4.2 kat artmasına neden olmuştur. Bir başka deyişle VYP kullanıldığında sağlanabilen ısı direnç değerine PU ile ulaşabilmek için yalıtım kalınlığının 0.126 m olması gerekmektedir. Bu durumda ev tipi soğutucunun kullanılabilen hacminin

azalması veya dışarıya doğru hacmin artırılması gerekliliğini ortaya çıkaracaktır. Böyle bir durumda VYP kullanımı ciddi avantaj sağlamaktadır. Diğer taraftan VYP yoğunluğunun PU ile kıyaslandığında yüksek olması buzdolabının kütesinin artmasına (20 kg) neden olmaktadır.

Tüm bu değerlendirmeler dikkate alındığında konvansiyonel yalıtım malzemeleri yerine VYP kullanımı başta tasarruf olmak üzere sürdürülebilir çevre, karbon salınımının ve emisyonların azaltılması, uygulama kalınlıklarının azalması ile yer kazancı gibi avantajları olan ve gelecekte daha fazla uygulama alanı bulmaya aday bir malzeme olarak görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmayı 4574-YL1-16 no'lu proje ile destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi BAP Yönetim Birimine teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Mutlu, M., Kaynaklı, Ö., Kılıç, M., 2011. Elektrikli Ev Aletlerinin Enerji Etiketlenmesinin İncelenmesi. Ulusal İklimlendirme Kongresi.
- [2] Akdağ, A. E., 2016. Vakum yalıtım panellerinde farklı yüzey alanına sahip nano tozların ısı yalıtım performansına ve mekanik özelliklerine etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 236s, Isparta.
- [3] Fricke, J., Heinemann, U., and Ebert, H. P., 2008. Vacuum insulation panels-From research to market, Vacuum, 82(7), 680-690.
- [4] Soysal, A., 2000. Vakumlanmış İzolasyon Panellerinin Isı İletim Katsayılarının Deneysel Olarak İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, İstanbul.
- [5] Johansson, P., 2012. Vacuum Insulation Panels in Buildings Literature review. Report in Building Physics, Report 2012:1, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [6] Dörtok, H., 2013. No-Frost Derin Dondurucularda Enerji Verimliliği. İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 120s, İstanbul.
- [7] Bayrakçı, H. C., Davraz, M., Akdağ, A.E., 2015. Vakum Yalıtım Panellerinin Buzdolaplarında Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkisi. Tesisat Mühendisliği, 150, 19-28.
- [8] Avcioğlu, S., 2012. Ev Tipi Statik Buzdolabı Soğutucu Bölmesinde Sıcaklık Dağılımının Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi. İstanbul

Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Yüksek Lisans Tezi, 77s, İstanbul.

- [9] Yılmaz, U., 2008. Ev Tipi Dondurucularda Vakum İzolasyon Panel Kullanımının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisini Bilgisayar Destekli ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 187s, İzmir.
- [10] TS EN 65552 2013. Ev tipi soğutma cihazları karakteristikler ve deney yöntemleri.
- [11] EC Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of household refrigerating appliances. Journal of the European Union, No 1060/2010 of 28 September 2010.