

Çok katmanlı cam sistemlerinin ısı performansının farklı parametrelere bağlı sayısal ve deneysel incelenmesi

Numerical and experimental investigation of thermal performance of multilayer glass systems depending on different parameters

Nilsu OĞULTEKİN*¹ , Murat KORU¹ 

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta

• Geliş tarihi / Received: 08.03.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 03.05.2024

Öz

Ülkemizde binalar için harcanan enerjinin büyük bir kısmı ısıtma ve soğutma işlemleri için kullanılmaktadır. Bu enerji tüketimini azaltmak için doğru enerji kullanımı ve etkili ısı yalıtımı gerekmektedir. Bu çalışma, camlardan kaynaklanan ısı kaybı minimize etmek ve ısı yalıtımını artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. İki tür hesaplama yapılmıştır: deneysel ve sayısal. Çeşitli cam numuneleri kullanılarak bu hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalar için Comsol Multiphysics 5.4 ve Heat Transfer Modülü kullanılırken, deneysel hesaplamalar için ısı iletkenlik katsayıları ölçümü TS EN 12667 standardına uygun olarak HFM Fox-314 ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Isparta ili için yapılan ölçümler ve karşılaştırmalar sonucunda, ısı iletkenlik katsayısı 0.113 W/mK, ısı geçirgenlik katsayısı 0.388 m²K/W, ısı geçirgenlik katsayısı 1.1 W/m²K olan üç katmanlı 16 mm gaz dolgulu argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamasının en ideal olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 10 numunenin TS 825'e göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Binalarda enerji verimliliği, Binalarda ısı yalıtımı, Cam uygulamalarında ısı transferi, Çok katmanlı cam, ısı iletkenlik katsayısı

Abstract

Significant portion of the energy consumed in our country is used for heating and cooling processes in buildings. To reduce this energy consumption, proper energy utilization and effective insulation are essential. This study was conducted with the aim of minimizing heat loss through windows and enhancing thermal insulation. Two types of calculations were performed: experimental and numerical. Various glass samples were used for these calculations. Numerical calculations were conducted using Comsol Multiphysics 5.4 and the Heat Transfer Module, while experimental measurements of thermal conductivity coefficients were carried out in accordance with TS EN 12667 standards using the HFM Fox-314 measurement device. Based on the measurements and comparisons conducted for Isparta province, it was determined that the three-layered 16 mm gas-filled argon gas Solar Low-e coated glass with a thermal conductivity coefficient of 0.113 W/mK, a thermal transmittance coefficient of 0.388 m²K/W, and a thermal transmittance coefficient of 1.1 W/m²K is the most ideal application. Furthermore, it was observed that 10 samples outperformed the TS 825 standards.

Keywords: Energy efficiency in buildings, Heat transfer in glass applications, Multi-layered glass, Thermal conductivity coefficient, Thermal insulation in buildings

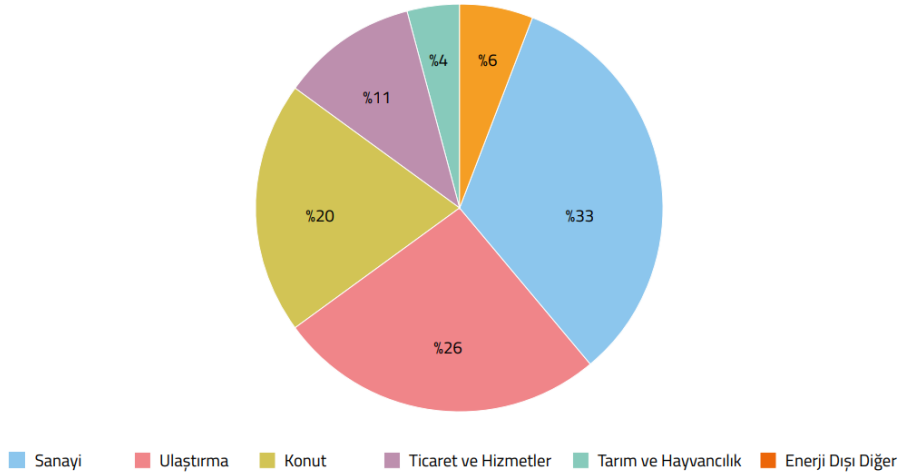
*Nilsu OĞULTEKİN; nilsuogultekin4@gmail.com

1. Giriş

1. Introduction

Dünya çapında artan nüfusla doğru orantılı olarak gelişen sanayi ve kentleşme, beraberinde enerjiye olan ihtiyacı getirmiştir. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması doğa ve insanlık için büyük bir önem taşımaktadır. Ayrıca bu kaynakların doğru ve verimli kullanılması da büyük önem arz etmektedir. Enerji verimliliği ürün miktarını, ürünün kalitesini azaltmadan tüketilen enerjiyi en aza indirmek olarak tanımlanabilir fakat tüm bunları yaparken ekonomik kalkınma ve sosyal refah engellenmemelidir. Gelişmiş ülkeler, sektörlerde kullanılan enerjinin verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalara başlamıştır. Enerji verimliliğinin daha karlı ve çevre dostu olduğunun anlaşılması ile birlikte bu konuda yapılan çalışmalarda son yıllarda bir artış görülmektedir. Ülkemizdeki enerjinin tüketim oranı incelendiğinde Uluslararası Enerji Ajansının yayınladığı verilere göre Türkiye’de kişi başına düşen enerji tüketimi yüzdesi 0.38 iken diğer gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde bu oran 0.09 ve 0.19’ dur (Ekosmart, t.y.).

Enerji, dünya ekonomisine ve siyasi politikalara yön vermeye başlamıştır. Ayrıca iklim değişikliği üzerine olan etkisi nedeniyle geleceğin ekonomi, sosyal ve coğrafi düzeninin belirleyicisi olacaktır. Dolayısıyla günümüz enerji ve verimlilik politikaları; yüksek maliyetli enerji arzı, yaşamın sürdürülebilirliğini ve ekonomik kalkınmayı tehdit etmektedir. Enerji, dışa bağımlı olan ve iklim değişikliğinden etkilenen ülkeler için önemli bir politika alanı haline gelmiştir. Son 20 yılda gelişmiş ülkeler ve tüm sektörlerin ortak çabalarıyla enerji yoğunluğunu azaltmaya yönelik yaptırımlarda artış görülmüştür. Dünya çapında enerji politikalarını incelediğimizde, enerji tasarrufu ve verimi konusunun önemli bir yeri olduğu görülmüştür. Ayrıca binalarda ısı verimliliği arttırmaya yönelik çalışmaların arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin yeşil binalara (yapılacağı konumun tabiatına uygun olan standartlarda yapılan, tasarlanan ayrıca enerji ihtiyaçlarında diğer binalara oranla tasarruflu, malzeme olarak çevre dostu malzemelerden seçilen, yenilenebilir özellikte olan binalar) olan talep gün geçtikçe artmaktadır.



Şekil 1. Sektörlere göre nihai enerji tüketimi (ETKB, 2018)

Figure 1. Final energy consumption by sectors

ETKB Tarafından hazırlanan 2018 Enerji denge tablosuna göre bina ve konut sektörü nihai enerji tüketiminin %20’i kaplamaktadır. Şekil 1’de 2018 nihai enerji tüketiminin sektörlere göre olan dağılımı verilmiştir (ETKB, 2018). Şekil 1 incelendiğinde konut sektöründe enerji tüketiminin payının fazla olduğu görülmektedir. Yapı sektöründeki aşırı enerji tüketimini azaltmak, enerjiyi daha tasarruflu ve verimli kullanmak için ısı yalıtımı, mekanik ve doğal havalandırmadan kaynaklanan ısı kayıplarını mümkün olduğunca en aza indirmek gerekmektedir. Binalarda ısı kayıplarını asgari bir sınırdan tutmak için başlıca yöntem ısı yalıtımıdır. Binalarda ısı yalıtım gereksinimleri hakkında piyasaya yol göstermek ve ısı yalıtımında denetim şartlarını belirlemek amacıyla TS 825 standardı kullanılmaktadır. TS 825 standardı, iklim bölgesine ve bina yapı elemanlarına göre maksimum U değerlerini de belirlemektedir. U değeri, ısının bir yapıdaki (tekil bir materyal veya bir kompozit olabilir) transfer hızının, yapının tamamındaki sıcaklık farkına bölünmesiyle elde edilen ısı geçirgenliğini ifade etmektedir. Ölçü birimi $W/m^2 K$ ’dir. Yapı ne kadar iyi yalıtımlı olursa, U değeri o kadar düşük olacaktır. TS 825 iklim bölgelerine göre duvarlar, çatı, döşeme ve pencerelere ilişkin tavsiye edilen U değeri gerekliliklerini tanımlamaktadır (TS 825, 2009).

Enerjide verim faktörü ve buna bağlı olan yatırım ve kullanım teşviğini artırmak adına kullanılacak olan sistemlerin enerji tasarruf oranlarında da iyileştirilmelere gidilmesi sektöre olumlu yansımacaktır. Binalar, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde toplam enerji sarfiyatının %40 'ı ile %60'ını oluşturmaktadır (Underwood ve Yik, 2004). Konut sektörlerinde oluşturulacak olan iyileştirmeler sayesinde enerjinin geri dönüşümü sağlanacak dolaylı olarak verimliliği de arttıracaktır. Enerji verimliliği ve ısı yalıtımı birbirlerini takip eden hususlardır. Yapıların ısıtılmasında, enerji verimliliğinin optimum seviyede olabilmesi için ısı yalıtımı, ürün tasarımlarında büyük önem kazanmıştır. Konut inşası sırasında gerekli standartlara göre yapılan yalıtımlar enerji verimliliğini artırarak uzun vadede kendi maliyetini karşılayarak ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Binalarda sağlanan ısı yalıtımı sayesinde ısı kaçakları önlenilmekte ve böylece kışın ısıtma, yazın soğutma için harcanan maliyet azaltılmaktadır. Binalarda kullanılan yapı elemanlarının ısı yalıtımı bakımından önemi büyüktür. Bina enerji verimliliğini arttırmak için yapılan uygulamalardan ısı yalıtımı bazında cam sektörü önemli bir yer teşkil etmektedir. Isı yalıtımının iyileştirilebilmesi için ısı transferinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Isı transferinin radyasyon, iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen iletimlerin toplamı olduğu bilindiğine göre bu iletimleri en aza indirmek için yapabileceklerimiz araştırılmıştır. Isı iletim türü olan taşınımın gerçekleşen geçişi azaltmak için akışkanın hareketinin azaltılması (yüksek viskozite), iletimle olan geçiş için λ iletim değerinin daha düşük olduğu gazların, gaz dolgusunda kullanılması, radyasyonla olan geçişin ise cam plakaların yüzeylerinin üzeri düşük emissiviteli kaplamalarla kaplanmasıyla azaltılabilir (Aksoy vd., 2001). Konuya binalar üzerinden yaklaşırsa, camlardan ışımayla oluşan ısı transferi gayet yüksek miktarlarda olduğu görülmüştür. Bu durum, konu kapsamında araştırmaları bulunan uzmanların dikkatini çekmiştir. Mevsim doğrultusunda güneş ışınımına dayalı kayıp ve kazançlar binaların soğutma ve ısıtma yükünü etkilemektedir. Roos ve Karlsson (1994), Yohanis ve Norton (1999), gibi araştırmacılar camların performansını belirleyebilmek doğrultusunda bahsi geçen parametrelerin kullanılması ile ulaşılan genelleştirilmiş enerji nizamlarını meydana getirmişlerdir. Duer vd. (2002), Maccari ve Zinzi (2001), ise termal iletim seviyesi ve hava sızdırmazlık düzeyi gibi parametreleri iklim koşullarını da göz önüne alacak şekilde yeni enerji modelleri meydana getirmişlerdir. Koçu ve Korkmaz (2002), ısı yalıtımı için kullanılan malzemelerin özellikleri ve sınıflandırılması ayrıca Konya ve çevresindeki binalarda ısı yalıtım uygulamalarının TS 825'e göre değerlendirilmesini yapmıştır. Konya ve çevresindeki binalarda ısı yalıtımı hakkında yapılan eksik ve hatalı uygulamaların çevre kirliliğine olan etkileri incelenmiştir. Isı yalıtımında kullanılması gereken maddeler, kurallar belirtilerek yapılması gerekli olan önemler sıralanmıştır ve önerilerde bulunulmuştur. Aşık ve Tezcan (2005) yaptığı çalışma Vallabhan vd. (1993)'nin geliştirdiği modeli daha az hesap vakti ve muhafaza etme alanına gereksinim duyacak şekilde geliştirmiştir. Lamine cam kırımların mekanik davranışlarını ele alarak pek çok çalışmanın yapıldığı görülmektedir (Aşık vd., 2014).

Tek katmanlı camlar yerine çok katmanlı camların kullanılmasının ses ve ısı yalıtımı hususunda daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Katman sayısı arttıkça yalıtımdaki verimlilik de artış göstermektedir. Çok katmanlı cam uygulamalarında cam plakalar arasında ısı transferinin daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Isı transferinin yavaşlatılması ısı yalıtımının başarısını artırmaktadır (Firatpen, t.y.). Çok katmanlı camlar hakkındaki deneysel çalışmalar için örnek vermek gerekir ise; Foraboschi (2013) ve Foraboschi (2014), tabakalı plakaların mekanik davranışını açıklamak üzere geliştirmiş olduğu modelin literatürde oldukça önemli bir yeri bulunmaktadır. Ayrıca çok katmanlı camlar hakkında literatüre büyük katkısı bulunan bir diğer çalışma ise iki, üç ve dört katmanlı cam uygulamalarındaki ısı akışını inceleyen Arıcı vd. (2015) çalışmasıdır. Araştırma altı farklı gaz dolgusu kalınlığı ve dört farklı bölgenin dış ortam sıcaklıkları baz alınarak yapılmıştır. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sunulmuştur:

Boşluk genişliğinin enerji tasarrufu üzerindeki etkisi, düşük sıcaklık farklarında daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Isı kaybının yaklaşık %50 veya %67 oranlarında çift katmanlı pencereler kullanılarak azaltılabileceği tespit edilmiştir. Soğuk olan bölgelerde ise çift katmanlı pencereler yerine üç ve dört katmanlı pencereler tercih edilmelidir. Isının yaklaşık %45-75'i (gaz dolgusu genişliği ve sıcaklık farkına bağlı olarak) radyasyonla aktarılır. Gaz dolgusu genişliği arttıkça bu oran artmaktadır. Ayrıca sıcaklık farkı azaldıkça bu oranın arttığı görülmüştür. Isı kaybı üzerindeki parametrelerin önem sırası şu şekilde sıralanmıştır. Katman sayısı, cam yüzeyinin emisyonu ve gaz dolgusu kalınlığı. Sonuç olarak, mühendisler çok katmanlı pencerelerde katman arttıkça ısı verimliliğinin daha iyi olacağını farkında olmasına rağmen endüstri, gaz dolgusu genişliği daha fazla ama çift katmanlı cam uygulamasına sahip olan pencereleri kullanma eğilimindedir. Çünkü katman sayısı arttıkça maliyette artmaktadır. Oysaki gaz dolgusu kalınlığı fazla ve nispeten daha pahalı olan Low-e kaplama yerine gaz dolgu kalınlığı daha az ama üç veya dört katmanlı cam uygulamasına sahip olan pencereler kullanılsa enerji tasarrufunda daha iyi bir seviyeye gelinebileceği belirtilmiştir.

Etzion ve Erell (2000), yaptığı bu çalışmada, Meksika bölgesi için hesaplanan dört adet farklı niteliklere sahip çift ve tek katmanlı cam numuneleri (Numune 1: tek katmanlı şeffaf cam, numune 2: şeffaf cam+ gaz dolgusu+ şeffaf cam, numune 3: şeffaf cam+ gaz dolgusu+ yansıtıcı özellikli cam, numune 4: şeffaf cam+ gaz dolgusu+ Low-e kaplama cam) üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çift katmanlı pencerenin kullanılması, tek bölmeli pencereye oranla iç ortamdaki ısı kazanımlarını %12'ye kadar azalttığını göstermiştir. Çift katmanlı cam uygulamalarında ise en yüksek enerji tasarrufu numune 3'te tespit edilmiştir. Numune 3'te %72.6'ya varan enerji tasarrufu elde edilmiştir. Numune 4'te ise numune 1'e oranla %28.6 oranında daha fazla enerji tasarrufu olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler doğrultusunda Meksika için en uygun numune 3'teki özelliklere sahip pencerelerin kullanılması önerilmiştir. Çok katmanlı camlarda katmanlar arasında hava dışında havadan daha ağır ısı iletkenlik katsayısı havadan daha düşük olan gazların (Argon, Xenon, Kripton vb.) kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur. Bu tip gazların kullanımı ile ısı iletkenlik değerlerinde uygulanan gazın türüne bağlı olmakla birlikte %15 oranında ısı performansta iyileşmeler tespit edilmiştir (Özharat, 2007). Özharat ve Ünal (2014), çift camlı pencerenin iki camı arasındaki gaz tabaka kalınlığının ısı transferi üzerindeki etkisini sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda kritik kalınlık değerleri, atmosferik basınçtaki hava ve argon için 12 mm, vakum basınçtaki kuru hava (vakum) için 24 mm olarak hesaplanırken ısı tasarruf oranları hava ile %55 lik düşük değerde iken, vakumlu hava ile % 63 lük yüksek bir değer olarak tespit edilmiştir.

U değeri (ısı iletkenlik katsayısı), bir binanın iç ve dış ortamı arasındaki hava sıcaklığı farkı nedeniyle meydana gelen enerji transferini tanımlar. Daha düşük bir U değeri, camın termal yalıtım performansının daha iyi olduğunu ifade etmektedir. Örneğin, yalıtım kaplamalı camın çift cam içinde kullanılmasıyla U değeri 1.0 W/m²K'ye düşürülebilirken, kaplamasız cam kullanılan çift cam uygulamaların bu değer 2.7 W/m²K seviyesindedir. Bu değer üçlü cam yapılarında 0.5 W/m²K'ye kadar daha da iyileştirilebilmektedir (Guardianglass, t.y.). Low-e kaplamalı camlarda ısı transferinde azalma olmaktadır. İç ortamdaki ısı kaçışında azalma olacağından iç ortamı ısıtmak için kullanılan enerjide de azalma olmaktadır. Ayrıca cam yüzeyinde taşınım ile olan ısı transferi daha az olacağından cam üzerindeki buğulanma riski de azalmaktadır. Böylece Low-e kaplamalı camlar sadece ısı kaybını önlemekle kalmaz, aynı zamanda yılın daha soğuk aylarında ısıyı içeride tutarak ısıtmaya da yardımcı olur (Pilkington, 2023).

Cam sektörünün ana prensibi konutlardaki ısı kontrolünün sağlanmasıdır. Cam tasarımlarında ısı kontrolünün amacı, bina pencerelerindeki camın dışarıya olan ısı kaçışını en aza indirmek ya da kaçışı yavaşlatarak ısıtma için kullanılan enerjinin azaltılması ve iç ortamdaki ısının dengede tutulmasıdır. Camlardaki yalıtımın verimliliğini arttıran en etkin çözüm katman sayısı, gaz dolgusu kalınlığının artırılmasıdır. Ayrıca gaz dolgusunun niteliği de önemli bir faktördür. Bu çalışmada bina iklimlendirme hususunda kullandığımız enerjinin azaltılması ve ısı kaçışının en çok olduğu camlardaki ısı transferini azaltarak enerji verimliliğini arttırmaya yönelik yaklaşımlar incelenmiştir. Çift ve üç katmanlı cam uygulamalarında iki cam arasındaki gaz katmanı kalınlığına, gaz dolgusu niteliğine (argon-kuru hava) ve kaplama özelliğine bağlı olarak Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazı ile ölçülen ısı iletkenlik katsayıları (k, W/mK) kullanılarak ısı geçirgenlik katsayıları (U, W/m²K) belirlenmiştir. Ölçüm cihazı ısı iletkenlik katsayısını ısı akış ölçer (IAÖ) yöntemini kullanarak belirlemektedir. Elde edilen sonuçların mukayesesi için yapılan sayısal çalışmada sonlu elemanlar programı Comsol multiphysics kullanılmıştır. Numuneler üç boyutlu olarak modellenip çözümlenmesi sonucu çıkan ısı transferi katsayısı, deneysel çalışma ile elde edilen değerlerle karşılaştırılarak değerlerin doğruluğu araştırılmıştır. Deneysel hesaplamalarda ısı iletkenlik katsayıları ölçümü için TS EN 12667'ye uygun olarak katman sayısına, gaz dolgusu kalınlığına ve cam kaplama özelliğine bağlı olarak TS 825'e göre belirtilen yöntem ve ilkeler kullanılmıştır. Hesaplamalar 6 mm'den başlayarak 16 mm'ye kadar farklı gaz katmanı kalınlıklarında, gaz dolgusu olarak argon ve kuru hava, Solar Low-e ve klasik kaplama özelliğine sahip cam numuneleri kullanarak yapılmıştır. Cam kalınlıkları 4 mm olarak sabit alınmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar doğrultusunda Isparta ili için optimum cam katman sayısı, gaz dolgusu kalınlığı ve cam kaplama türlerinden hangisinin daha iyi bir yalıtım performansının unsuru olduğu da belirlenmiştir. Türkiye'de cam uygulamalarındaki ısı transferi bağlamında birçok çalışma mevcuttur. Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı sadece sayısal çalışmalar sunmaktadır. Bu çalışmada sayısal analizler dışında deneysel olarak da çalışılmıştır. Ayrıca TS 825'de belirtilen ısı geçirgenlik katsayısının kanıtlanamayacak derecede aşağısına düşülmüştür. Bu değer güncel TS 825 (15.08.2016) standardında belirlenen 5 bölge için de uygun olduğu görülmüştür.

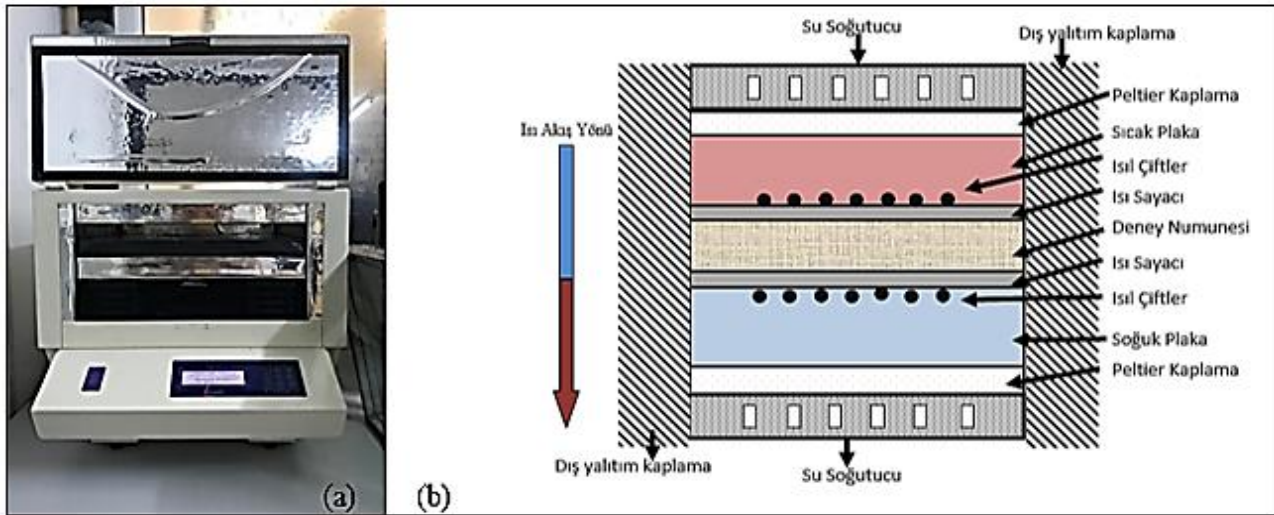
2. Materyal ve metod

2. Material and method

İncelemeler çift katmanlı cam uygulaması için farklı kalınlıklardaki gaz dolguları (6, 9, 11, 12, 14 ve 16 mm) ve üç katmanlı cam uygulaması için farklı kalınlıklardaki (9, 12, ve 16 mm) gaz katmanları, argon gazı ve kuru hava gaz dolgularıyla ve farklı kaplamalarla yapılan cam plakalar (klasik ısıcam, konfor ısıcam) için boyutları 300x300mm olan numuneler ile yapılmıştır. Şekil 2’de argon gaz dolgulu üç ve iki katmanlı cam numuneler verilmiştir. Deneysel hesaplamalar ısıl iletkenlik katsayıları ölçümü için TS EN 12667’ye uygun olarak katman sayısına, gaz dolgusu kalınlığına ve cam kaplama özelliğine bağlı ısıl iletkenlik katsayıları TS 825’e göre belirtilen şartlara uygun olarak ölçüm yapan Şekil 3’de görülen Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Ölçüm cihazı ısıl iletkenlik katsayısını ısı akış ölçer (IAÖ) yöntemini kullanarak belirlemektedir. Kullanılan cihazın kesinlik değeri $\pm 1\%$ olarak teknik özelliklerinde verilmiştir (Tainstruments, t.y.).



Şekil 2. Üç ve iki katmanlı argon gazlı camlar (a) Üç katmanlı cam örneği (b) İki katmanlı cam örneği
Figure 2. Three- and two-layer argon gas glasses (a) Example of three-layer glass (b) Example of two-layer glass



Şekil 3. Isıl iletkenlik katsayısı ölçen cihaz (a) HFM Fox-314 ölçüm cihazı (b) ısı akış ölçerin şematik diyagramı
Figure 3. Thermal conductivity coefficient measuring device (a) HFM Fox-314 heat flow measuring device (b) schematic diagram of heat flow meter

Şekil 3’de ısı akış ölçer cihazı ve şematik diyagramı verilmiştir. Şekil 3(b)’de görüldüğü gibi ısı akış ölçer farklı sıcaklık değerlerine ayarlanabilen iki plakaya sahiptir. Bu plakalar Peltier etkisi ile istenilen sıcaklık

değerlerine ayarlanabilmektedirler. Alt ve üst plaka olarak adlandırılan bu plakalara hem ısı çiftler hem de ısı akış ölçer sensörleri yerleştirilmiştir. Isı akışının plakalar üzerinden gerçekleşebilmesi için cihazın diğer yüzeyleri yalıtılmıştır. IAÖ ısı dengeye ulaştığında, plakalar ve test numunesinde üniform sıcaklık gradyanı oluştuğunda ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiş olacaktır. IAÖ cihazı ile ısı iletkenlik katsayısı Fourier ısı iletim denklemi, Eşitlik (1) ile belirlenmektedir.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Hava tabakası hesaplamalarında hava boşluğu katı cisim gibi davranacağından iletimle ısı transferini oluşturacaktır. IAÖ bu denklemi ve kalibre edilmiş bilgisayar yazılımını kullanarak ölçüm, kayıt, yazdırma işlemini gerçekleştirmektedir.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce ölçüm cihazı, çeşitli sıcaklıklarda ısı iletkenliği bilinen referans numunesi (IRMM-440) kullanılarak ve NIST 1450b kalibrasyon dosyası ile kalibre edilmiştir. Sonuçların doğruluğu ve ölçümlerin tekrarlanabilirliği test edilmiştir. Deneysel farklı kalınlık, gaz dolgusu, katman sayısı ve dış kaplama özelliklerine göre k değerlerinin belirlenmesine yönelik yapılmıştır.

Hesaplamalarda Isparta ili için dış hava sıcaklıkları TS 825'e göre baz alınır, İç taraf sıcaklığı ise Dünya Sağlık Örgütü'nün oturma odası ve diğer odalar için koyduğu ideal sıcaklık derecelerinin ortalaması olan 20 °C seçilmiştir. Dış ortam için zorlanmış taşınım, iç ortam için doğal taşınım kabul edilmiştir. Gaz katmanı içerisinde oluşan ısı transferi için doğal taşınım, iletim ve radyasyon/ışınım ile olan ısı transferi denklemleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların mukayesesi için cam numuneleri sonlu elemanlar programı Comsol multiphysics kullanılarak üç boyutlu olarak modellenip çözümlenmesi sonucu çıkan ısı transferi katsayısı daha önce elde edilen değerlerle karşılaştırılarak değerlerin doğruluğu araştırılmıştır.

Çok katmanlı cam sistemlerinde iki katman arasındaki hava tabakasının kalınlığının katman sayısı ve cam kaplama özelliğine bağlı olarak belirlenen k değerleri kullanılarak iletimle ısı transferi şartları için sayısal hesaplamalar Comsol multiphysics 5.6, heat transfer modülü kullanılarak yapılmıştır. Comsol multiphysics mühendislik simülasyon yazılım araçları tüm modelleme adımlarını bütünlük olarak sunar (geometri tanımları, ağ örme, fizik ayarları, çözüm ve sonuçların görüntülenmesi). Model oluşturma süreci önceden tanımlı fizik arayüzleri sayesinde hızlıdır ve akış problemlerinden ısı taşınımına, yapısal mekanikten elektromanyetik analizlere kadar geniş bir kapsama sahiptir. Malzeme özellikleri, kaynak terimler ve sınır şartları alan değişkenlerinin keyfi fonksiyonları olarak atanabilir (Eti Yazılım Merkezi, t.y.). Sırasıyla cam ve hava tabakası kalınlıkları, kullanılan cam türüne göre ısı iletkenlik katsayıları, hava tabakası ısı iletkenlik katsayıları, iç ve dış yüzeyler için taşınım ile olan ısı transfer katsayıları, kuru hava dolgusu ısı iletkenlik katsayısı veya argon dolgusu ısı iletkenlik katsayısı sınır şartları olarak belirlenmiştir. Program arayüzü aracılığıyla model ağ yapısına bölünmüş ve hesaplamalar için hazırlanmıştır. Program materyal kütüphanesinden alınan materyal özellikleri (Silica glass, Argon (gas), Air) seçildi ve cam kalınlıkları 4'er mm, gaz dolgu kalınlıkları için numune özelliklerine göre çift katmanlı camlar için 6, 9, 11, 12, 14 ve 16 mm üç katmanlı cam uygulaması için 9, 12, ve 16 mm alındı. Camın uzunluğu, H=1 m kabul edildi. Dış ortamla temas halinde olan yüzey için 0 °C olarak seçilmiştir. TS 825'de verilen değerler doğrultusunda h(W/m²K) ısı taşınım katsayısı 25 (W/m²K) belirlenmiştir. İç ortamla temas halinde olan yüzey için T_{ext}=20 °C olarak seçilip h (W/m²K) ısı taşınım katsayısı 7.69 (W/m²K) TS 825'e göre belirlenmiştir. İçerden dışarıya birleşik ısı transferi olduğu kabul edildi. Ortam sıcaklığında doğal taşınım sınır şartı uygulanmıştır (TS 825, 2019). Dış ortamla temas halinde olan cam yüzeyin taşınım ile olan ısı transferini hesaplamak için Eşitlik (2) tanımlanmıştır.

$$Q_{taşınım} = h \cdot A \cdot (T_{ext} - T) \quad (2)$$

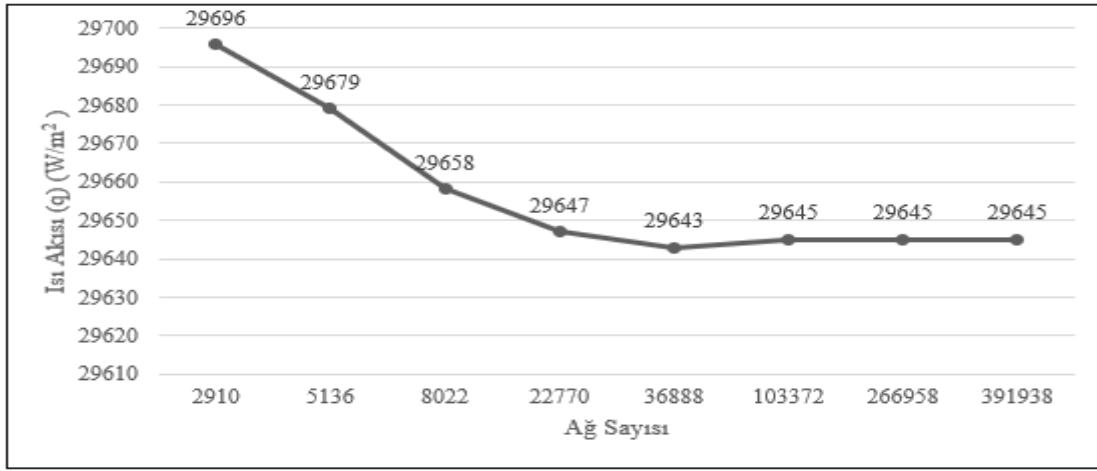
Bu denklemde T_{ext} ortam sıcaklığıdır ve bu değer dış ortamla temas halinde olan yüzey için 0 °C olarak h(W/m²K) ısı taşınım katsayısı 25 (W/m²K), iç ortamla temas halinde olan yüzey için T_{ext}=20 °C, h (W/m²K) ısı taşınım katsayısı 7.69 (W/m²K) olarak tanımlanmıştır.

Kaplama yapılan yüzeyler Eşitlik (3) ile tanımlanır.

$$Q_{ışınım} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

Bu denklemde σ Stefan-Boltzmann katsayısı, ε yayma oranı, T_{amb} ortam sıcaklığını ifade etmektedir. Buna göre bir yüzeyden ışınlama ile olan net ısı transferi, yüzeyin yapmış olduğu ışınlama ile yüzeye çevreden olan ışınlama farkıdır. Solar Low-e kaplamasının yayma oranı 0.05 alınırken, kaplamasız olan yüzeylerin yayma oranı ise 0.89 alındı (Altınışık, 2006).

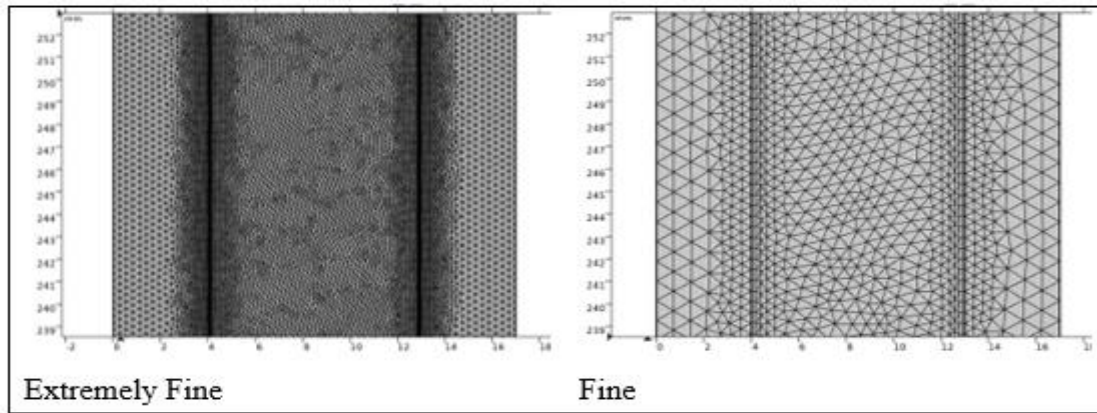
Sonlu hacimler ile ilgili yapılan sayısal çalışmalarda düzgün ve kaliteli bir ağ oluşturmak sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu yüzden sayısal çalışmalarda ağ kalitesi aranmaktadır. Ancak analizi yapılan geometrilerin karmaşıklığı arttıkça bu ağ kalitesini elde etmek zorlaşmaktadır. Sayısal çalışmaların doğrulanmasında başvurulan yöntemlerden birisi de ağdan bağımsızlık testleridir. Sayısal çözümlemelerde ağ sayısı artmasına rağmen sonuç belli bir değerden sonra değişmiyorsa, çözümlemelerde ağdan bağımsızlık elde edilmektedir. Comsol üzerinden hesaplamalar yapılmadan önce tüm numuneler için ağ bağımsızlık testi yapılmıştır. Şekil 4’de iki katmanlı argon gazlı klasik cam için yapılan ağ bağımsızlık test grafiği verilmiştir.



Şekil 4. İki katmanlı argon gazlı klasik cam ağ bağımsızlık test grafiği

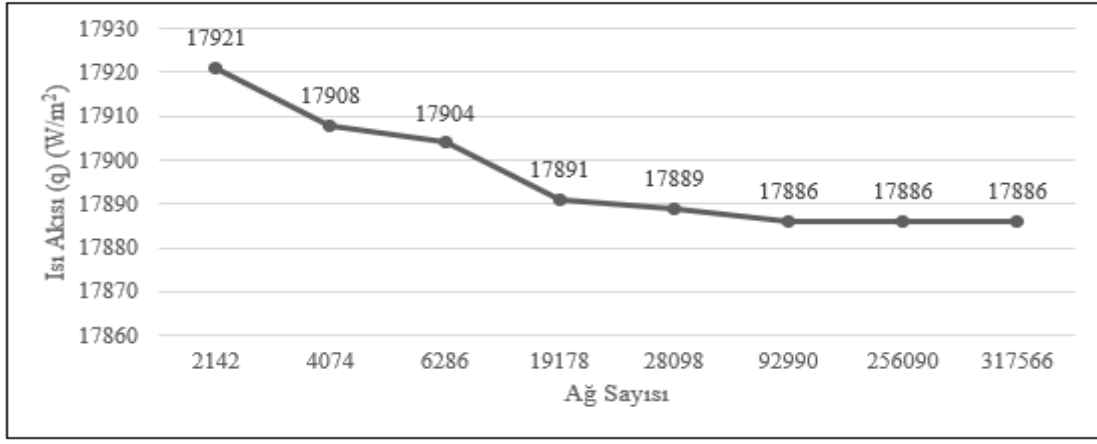
Figure 4. Two-layer classic glass with argon gas mesh independence test chart

Çift katmanlı argon dolgulu klasik camlar için yapılan ağ bağımsızlık testleri 8 farklı (Extremely Fine, Extra Fine, Fine, Finer, Normal, Coarser, Extra Coarser, Extremely Coarser) ağ yapılarıyla yapılmıştır. Şekil 5’de Extremely Fine, Fine, Coarser, Extra Coarser mesh yapılarına yer verilmiştir. Şekil 4’de görüleceği üzere 103372 adet ağ sayısından sonra yapılan çözümlemelerde W/m² değerinde değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden çift katmanlı argon dolgulu klasik cam uygulamalarında ağ eleman sayısı 103372 olarak seçilmiştir.



Şekil 5. Örnek Mesh Ağ Görünümleri

Figure 5. Example Mesh Views



Şekil 6. Üç katmanlı argon gazlı klasik cam ağ bağımsızlık test grafiği

Figure 6. Classical glass mesh independence test plot with three-layer argon gas

Şekil 6’de görüleceği üzere 92990 adet ağ sayısından sonra yapılan çözümlerinde W/m^2 değerinde değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden Üç katmanlı cam uygulamalarında ağ eleman sayısı 92990 olarak seçilmiştir. Ağ sayısının fazla olması çözümün daha doğru bir sonuç verdiği anlamına gelmemektedir. Çünkü analizi yapılan geometrilerin mesh yapısındaki karmaşıklık arttıkça ağ kalitesinin de bozulduğu durumlar yaşanmaktadır. Ağ sayısının artmasıyla mesh yapısının karmaşası artacaktır ve bu düzgün bir ağ kalitesini elde etmeyi zorlaştırmaktadır.

3. Bulgular ve tartışma

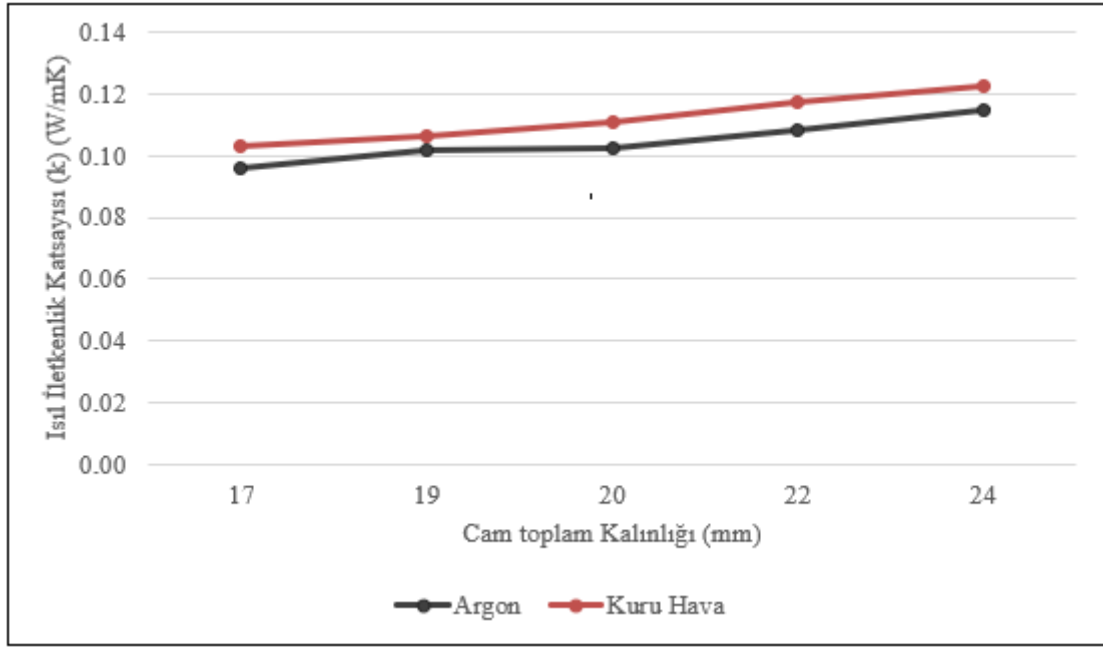
3. Results and discussion

Gaz katman kalınlığının, gaz dolgusu niteliğinin, cam uygulaması katman sayısının ve kaplama özelliğinin, Comsol Multiphysics 5.6, Heat Transfer Modülü programından ve Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla elde edilen ısı transferi katsayısı ve bu değere bağlı hesaplanan ısıl geçirgenlik katsayısı ve ısıl geçirgenlik direnci katsayısı üzerine olan etkisi incelenip değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Numunelerin ölçülen ısı transferi katsayısı (k) değerleri

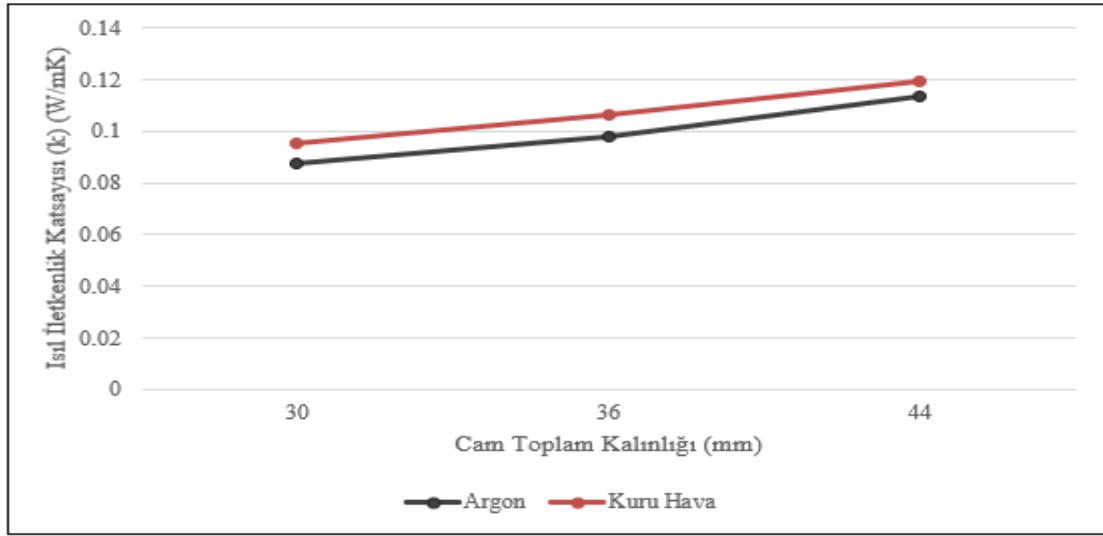
Table 1. Measured heat transfer coefficient (k) values of the samples

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değeri	Sayısal olarak ölçülen k değeri	Sayısal çalışmada kullanılan metodun deneysel olarak ölçülen değere göre doğruluk oranı
4x9x4_Klasik argon	0.095	0.099	%96
4x11x4_Klasik argon	0.102	0.101	%99
4x12x4_Klasik argon	0.102	0.113	%90
4x14x4_Klasik argon	0.108	0.118	%91
4x16x4_Klasik argon	0.114	0.116	%98
4x9x4_Klasik kuru hava	0.102	0.112	%91
4x11x4_Klasik kuru hava	0.106	0.104	%98
4x12x4_Klasik kuru hava	0.110	0.105	%95
4x14x4_Klasik kuru hava	0.117	0.106	%91
4x16x4_Klasik kuru hava	0.122	0.115	%94
4x9x4x9x4_Klasik argon	0.087	0.085	%98
4x12x4x12x4_Klasik argon	0.097	0.099	%98
4x16x4x16x4_Klasik argon	0.113	0.104	%92
4x9x4x9x4_Klasik kuru hava	0.095	0.097	%98
4x12x4x12x4_Klasik kuru hava	0.106	0.099	%93
4x16x4x16x4_Klasik kuru hava	0.119	0.1	%84



Şekil 7. İki katmanlı klasik camların Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla ölçülen k değerlerinin karşılaştırılması

Figure 7. Comparison of k values of two-layer conventional glasses measured with Lasercomp brand HFM Fox-314 measuring device



Şekil 8. Üç katmanlı klasik camların Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla ölçülen k değerlerinin karşılaştırılması

Figure 8. Comparison of k values of three-layer conventional glasses measured with Lasercomp brand HFM Fox-314 measuring device)

Tablo 1’de klasik kaplamaya sahip iki ve üç katmanlı, kuru hava ve argon gazı dolgusuna sahip cam numunelerinin ısı transferi katsayıları, sayısal ve deneysel hesaplamayla elde edilen sonuçları verilmiştir. Şekil 8’de iki katmanlı kuru hava ve argon gazı dolgulu camların deneysel hesaplama sonucu elde edilen sonuçları kendi içinde karşılaştırılması verilirken Şekil 8’da üç katmanlı kuru hava ve argon gazı dolgulu camların deneysel hesaplama sonuçları kendi içinde karşılaştırılması verilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucu iki katmanlı camlarda kuru hava yerine argon kullanıldığında k değeri bazında hesaplamalar yapıldığında; 9 mm, 11 mm, 12 mm 14 mm ve 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda sırasıyla %6.8, %4.13, %7.57, %7.6 ve %6.12 oranında daha iyi sonuç verildiği elde edilmiştir.

Üç katmanlı camlarda kuru hava yerine argon kullanıldığında ise k değerinde; 9 mm, 12 mm ve 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda sırasıyla %8.42, %8.5, %5.04 oranında daha iyi sonuç verildiği elde edilmiştir.

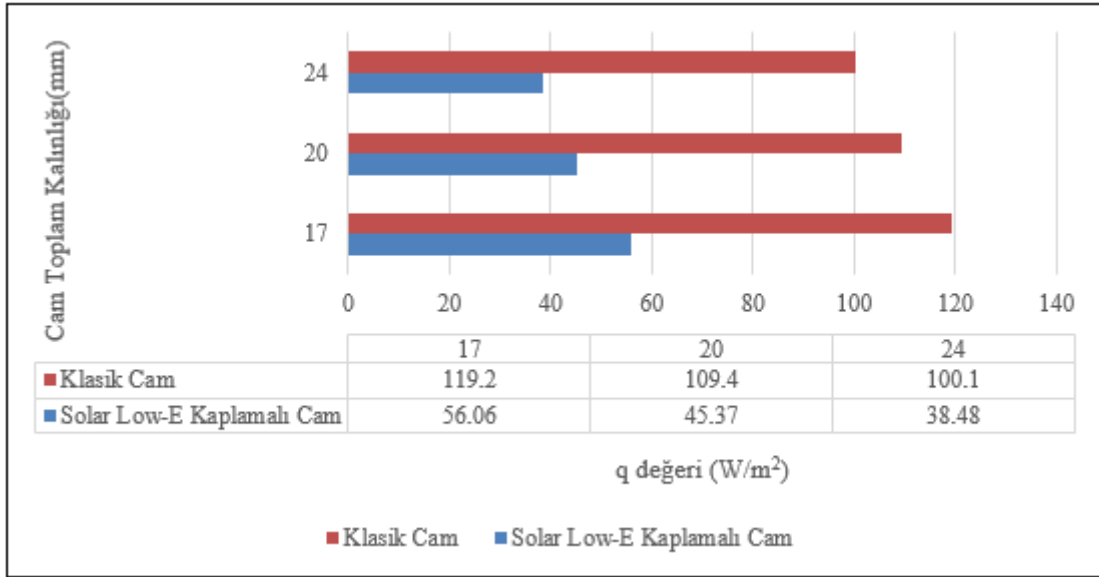
Tablo 2. Numunelerin ölçülen k değerlerine bağlı hesaplanan Isıl geçirgenlik direnci katsayısı (R) değerleri
Table 2. Thermal permeability coefficient (R) values calculated based on the measured k values of the samples

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal çalışmada kullanılan metodun deneysel olarak ölçülen değere göre doğruluk oranı
4x9x4_Klasik argon	0.177	0.171	%97
4x12x4_Klasik argon	0.195	0.176	%90
4x16x4_Klasik argon	0.208	0.206	%99
4x9x4x9x4_Klasik argon	0.342	0.353	%97
4x12x4x12x4_Klasik argon	0.367	0.363	%99
4x16x4x16x4_Klasik argon	0.388	0.422	%92
4x9x4_Klasik kuru hava	0.165	0.151	%91
4x12x4_Klasik kuru hava	0.18	0.193	%93
4x16x4_Klasik kuru hava	0.196	0.208	%94
4x9x4x9x4_Klasik kuru hava	0.313	0.34	%92
4x12x4x12x4_Klasik kuru hava	0.338	0.426	%79
4x16x4x16x4_Klasik kuru hava	0.369	0.469	%79
4x9x4_SolarE argon	0.372	0.359	%97
4x12x4_SolarE argon	0.51	0.446	%87
4x16x4_SolarE argon	0.563	0.463	%82
4x9x4x9x4_SolarE argon	0.533	0.528	%99
4x12x4x12x4_SolarE argon	0.664	0.613	%92
4x16x4x16x4_SolarE argon	0.697	0.665	%95

Tablo 1’de kaplama özelliğine bakılmaksızın katman sayısının ısı yalıtımı üzerine etkisi incelenirken Tablo 2’de kaplama özelliğinin ısı yalıtımı üzerine etkisi incelendiği için deney numuneleri ona göre seçilip karşılaştırılması yapılmıştır. Tablo 2 ‘de klasik ve Solar Low-e kaplamaya sahip iki ve üç katmanlı, kuru hava ve argon gazı dolgusuna sahip cam numunelerinin ısı geçirgenlik direnci katsayıları, sayısal ve deneysel hesaplamayla elde edilen sonuçları verilmiştir. Argon gaz dolgulu klasik camlarda iki katmanlı yerine üç katmanlı cam uygulandığında ısı direnç katsayısının, 9 mm gaz katmanı kalınlığında %51.55, 12 mm gaz katmanı kalınlığında %51.51, 16 mm gaz katmanı kalınlığında ise %51.18 oranında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Solar Low-E cam argon dolgulu iki katmanlı yerine Solar Low-E cam argon dolgulu üç katmanlı cam uygulandığında ısı direnç katsayısının, 9 mm gaz katmanı kalınlığında %30.2, 12 mm gaz katmanı kalınlığında %23.19, 16 mm gaz katmanı kalınlığında ise %19.22 oranında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Solar Low-E cam kuru hava dolgulu iki katmanlı yerine Solar Low-E cam kuru hava dolgulu üç katmanlı cam uygulandığında ısı direnç katsayısının, 9 mm g gaz katmanı kalınlığında %8.3, 12 mm gaz katmanı kalınlığında %5.84, 16 mm gaz katmanı kalınlığında ise %2.53 oranında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

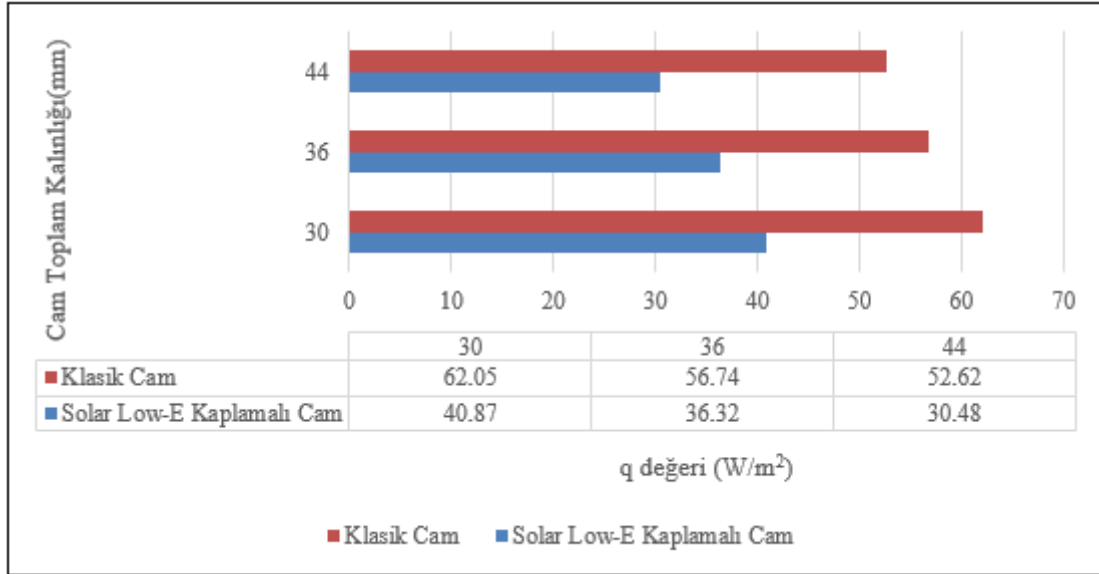
Çift katmanlı ve üç katmanlı cam numunelerinin değişen kaplama özellikleri ve gaz dolgusu nitelikleri parametreleri doğrultusunda hesaplanan ısı direnç değerlerinin karşılaştırılması sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- 1-Kuru hava dolgulu klasik camlarda iki katmanlı cam uygulaması yerine üç katmanlı cam uygulaması kullanılması halinde ortalama olarak % 44.85,
- 2-Argon dolgulu klasik camlarda iki katmanlı cam uygulaması yerine üç katmanlı cam uygulaması kullanılması halinde ortalama olarak % 51.41,
- 3-Kuru hava dolgulu Solar Low-e kaplamalı camlarda iki katmanlı cam uygulaması yerine üç katmanlı cam uygulaması kullanılması halinde ortalama olarak % 5.55,
- 4-Argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı camlarda iki katmanlı cam uygulaması yerine üç katmanlı cam uygulaması kullanılması halinde ortalama olarak %24.2 oranında daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.



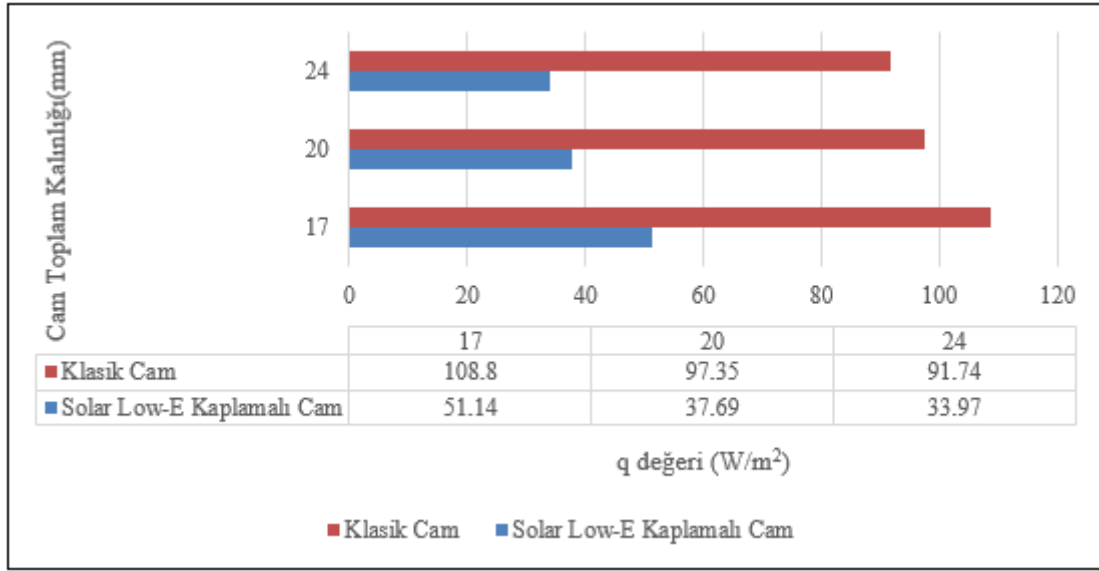
Şekil 9. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı camların q değerinin karşılaştırılması
Figure 9. Comparison of the q value of two-layer glasses with different filling thicknesses filled with dry air

Şekil 9’da iki katmanlı kuru hava dolgulu camların deneysel hesaplama sonucunda ölçülen ısı akış yoğunlukları verilmiştir ve aralarında karşılaştırma yapılmıştır. Isı akış yoğunluğu katsayısında (q), iki katmanlı kuru hava dolgulu klasik cam uygulamaları yerine iki katmanlı kuru hava dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında; 9 mm, 12 mm ve 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda sırasıyla %53, %58.52, %61.55 oranında daha iyi sonuç verildiği tespit edilmiştir.



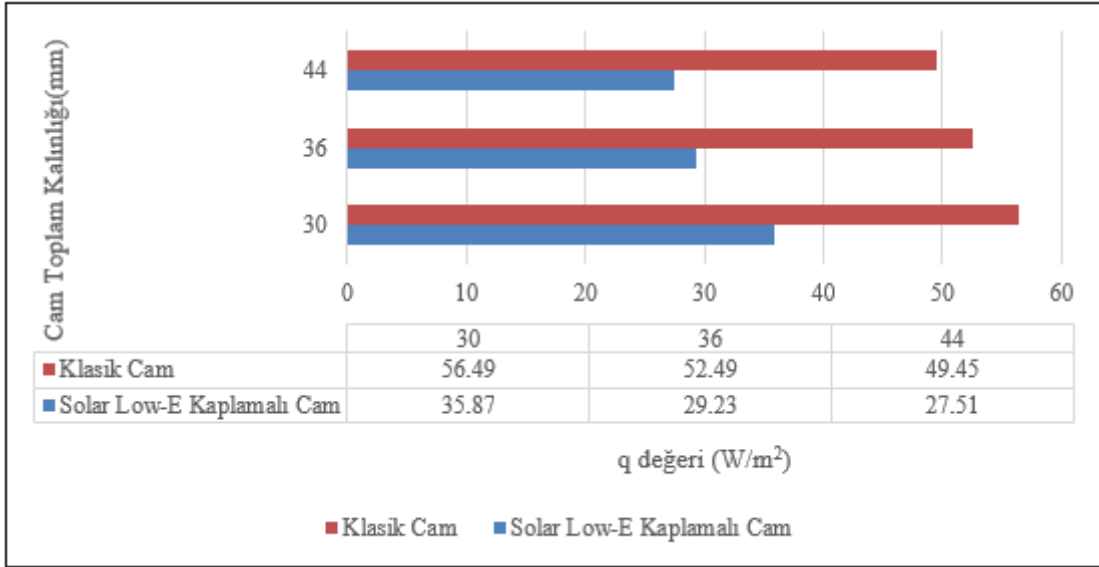
Şekil 10. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı camların q değerinin karşılaştırılması
Figure 10. Comparison of the q value of three-layer glasses with different filling thicknesses filled with dry air

Şekil 10’da üç katmanlı kuru hava dolgulu camların deneysel hesaplama sonucunda ölçülen ısı akış yoğunlukları verilmiştir ve aralarında karşılaştırma yapılmıştır. Isı akış yoğunluğu bazında hesapları yapıldığında üç katmanlı kuru hava dolgulu klasik cam uygulamaları yerine üç katmanlı kuru hava dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında; 9 mm, 12 mm ve 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda sırasıyla %34.15, %35.45, %42.07 oranında daha iyi sonuç verildiği elde edilmiştir.



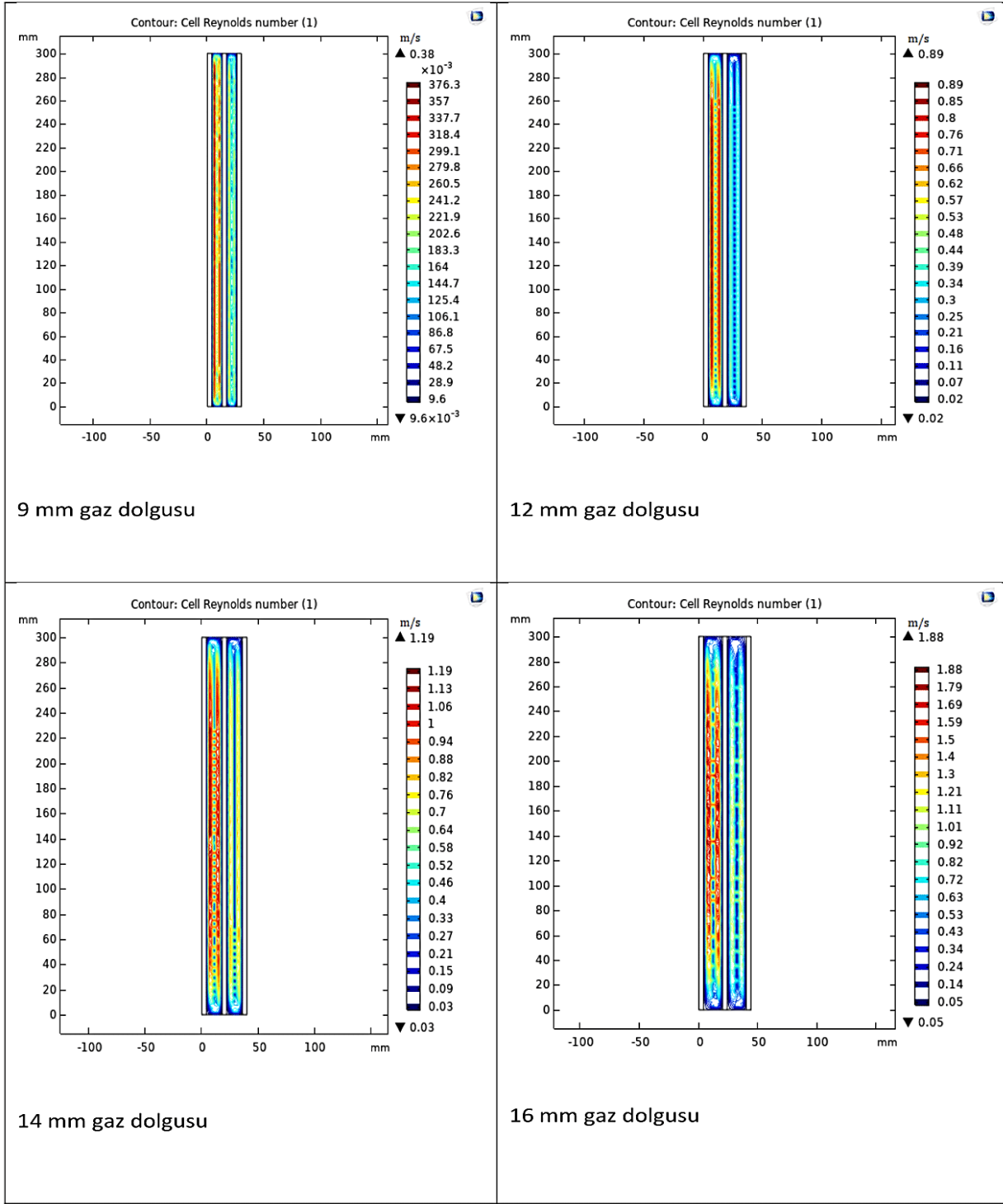
Şekil 11. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı camların q değerinin karşılaştırılması
Figure 11. Comparison of the q value of argon filled two-layer glasses with different filling thicknesses

Şekil 11 'de iki katmanlı argon dolgulu camların deneysel hesaplama sonucunda ölçülen ısı akış yoğunlukları verilmiştir ve aralarında karşılaştırma yapılmıştır. Isı akış yoğunluğu bazında hesaplamalar yapıldığında iki katmanlı argon dolgulu klasik cam uygulamaları yerine üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında; 9 mm, 12 mm ve 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda sırasıyla %53, %61.28, %62.97 oranında daha iyi sonuç verildiği elde edilmiştir.



Şekil 12. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı camların q değerinin karşılaştırılması
Figure 12. Comparison of the q value of argon-filled three-layer glasses with different filling thicknesses

Şekil 12'de üç katmanlı argon dolgulu camların deneysel hesaplama sonucunda ölçülen ısı akış yoğunlukları verilmiştir ve aralarında karşılaştırma yapılmıştır. Isı akış yoğunluğu bazında hesaplamalar yapıldığında üç katmanlı argon dolgulu klasik cam uygulamaları yerine üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında; 9 mm, 12 mm ve 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda sırasıyla %36.5, %44.31, %44.14 oranında daha iyi sonuç verildiği elde edilmiştir.



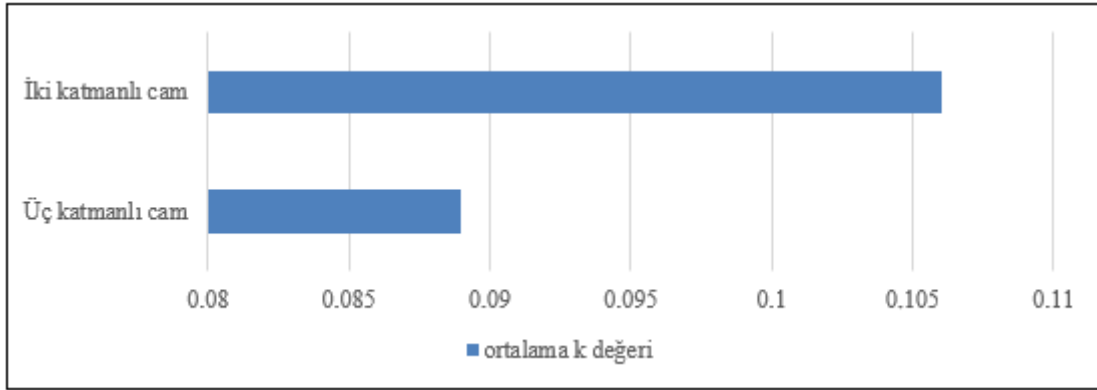
Şekil 13. Üç katmanlı argon dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili

Figure 13. Velocity profile of three-layer argon-filled conventional glasses with 9,12,14,16 mm interlayer thicknesses in gas filling

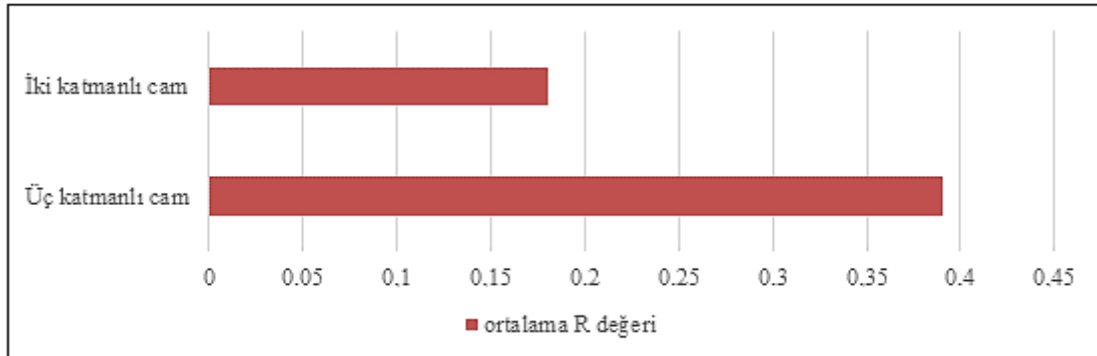
Şekil 13’de üç katmanlı argon dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profilleri verilip karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 13’de görüldüğü gibi gaz dolgu kalınlığı arttıkça gaz katmanının içerisindeki gazın hızının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum gaz dolgu kalınlığının artmasıyla birlikte katman arasında hava hareketi başlar ve kaldırma kuvveti, akışkan direncini yenemediğinde iletim yoluyla ısı transferi gerçekleşir. Kaldırma kuvveti, akışkan direncini yendiğinde Bernard hücreleri olarak adlandırılan ve sekizgen hücre biçiminde olduğu gözlemlenen laminar akış başlayacağı için taşınımın ısı transferi gerçekleşir. Kaldırma kuvveti, akışkan direncini yenemediği zaman Bernard hücreleri bozulur ve akış türbülanslı olur (Pul vd., 2015). Bundan dolayı hava tabakasının kalınlığı arttıkça ısı iletkenlik katsayısının

da arttığı gözlemlenmiştir. Optimum hava tabakası kalınlığına kadar taşınım ile olan ısı transferi engellenmektedir. Bu durum pencerelerde optimum hava tabakasının üzerine çıkılması negatif etki oluşturmaktadır. Dış duvarlardaki ısı kayıpları en fazla pencerelerde olduğu için, pencerelerde ısı kaybını azaltacak yalıtım tekniklerini geliştirmek önem arz etmektedir (Ertürk vd., 2016).

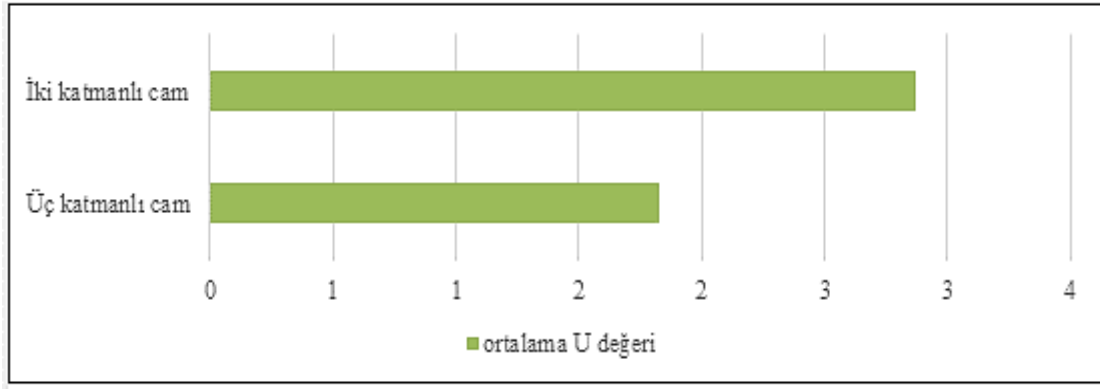
Bu çalışmada Isparta ili için optimum cam katman sayısı, cam kaplaması, gaz dolgusu kalınlığı, gaz dolgusunun niteliği de araştırılıp belirlenmiştir. Araştırmalar sonucu üç katmanlı cam uygulamaları, çift katmanlı cam uygulamalarına oranla ısı iletiminde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Isı iletimi üç katmanlı camlarda oldukça azalmıştır. Örneğin 9 mm gaz dolgusuna sahip argon dolgulu klasik cam uygulamalarında iki katmanlıda ısı iletim katsayısı 0.095 iken üç katmanlıda ısı iletim katsayısı 0.087 çıkmıştır. Isıl iletkenlik katsayısı ise maddenin ısıyı ne kadar ilettiğini gösteren bir niceliktir. Isıl iletkenlik katsayısının değeri ne kadar yüksekse madde daha iyi bir iletken, tam tersi ne kadar düşükse daha iyi bir yalıtıktır anlamına gelir. Ayrıca kullanılan cam sistemlerinde kalınlığın artması ve gaz dolgusunun kalınlığının 16 – 20 mm mesafelerini geçmeyecek biçimde artırılması ısı konforu ve ses kontrolü bakımından daha olumlu sonuç vermiştir. Örneğin iki katmanlı kuru hava dolgulu klasik cam uygulamalarında 9 mm gaz dolgusunda ısı geçirgenlik katsayısı 3.2 iken 16 mm gaz dolgusunda Isıl geçirgenlik katsayısı 2.63 çıkmıştır. U değerinin küçük olması maddenin ısıl geçirgenliğinin yani ısı kaybının da düşük olduğu anlamına gelir. İki katmanlı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığı olarak genellikle 12 mm veya 16 mm kullanılmaktadır. Gaz dolgusu kalınlığı arttıkça camın ısı yalıtım özelliği, değeri de artmaktadır. Ayrıca gaz dolgusu olarak kuru havanın dışında argon gazı da kullanıldığı görülmektedir. Kuru hava yerine argon gazının kullanıldığı cam uygulamalarında ısı yalıtımı daha iyi sonuç vermektedir. Örneğin aynı kaplamaya, katmana ve aynı kalınlığa sahip (iki katmanlı 11 mm gaz dolgulu klasik cam) cam uygulamalarında argon gazı kullanılan numunede k değeri 0.102 iken kuru hava ile doldurulan numunede bu değer 0.106 olarak ölçülmüştür.



Şekil 14. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama k değerlerinin karşılaştırılması
Figure 14. Comparison of average k values of two-layer and three-layer glass applications

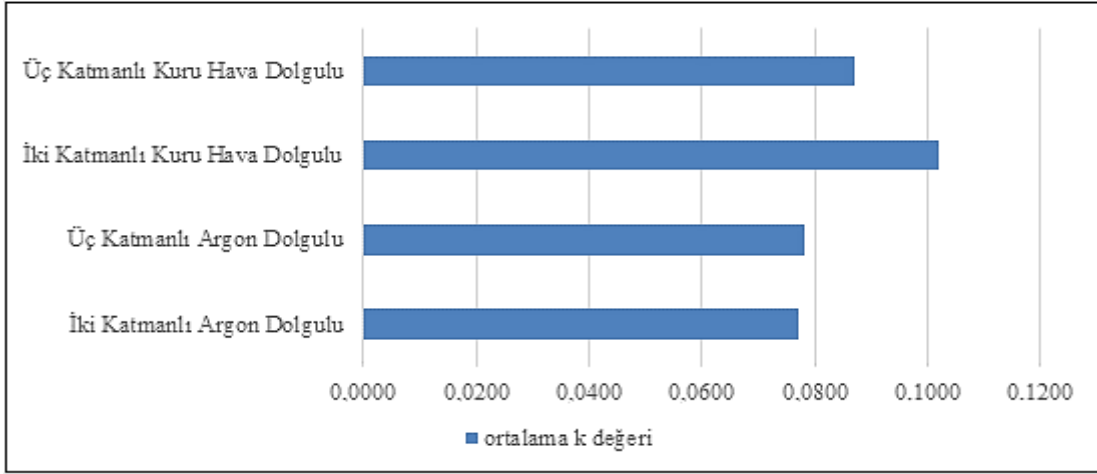


Şekil 15. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama R değerlerinin karşılaştırılması
Figure 15. Comparison of average R values of two-layer and three-layer glass applications

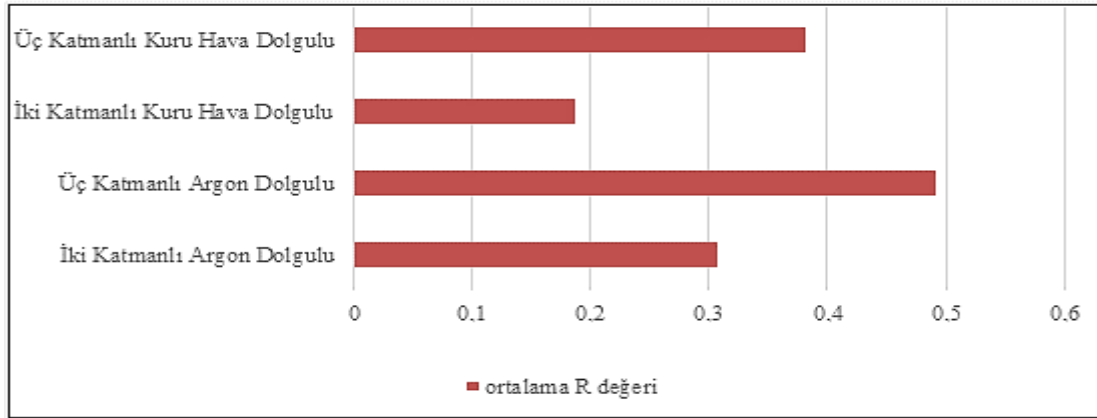


Şekil 16. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama U değerlerinin karşılaştırılması
Figure 16. Comparison of average U values of two-layer and three-layer glass applications

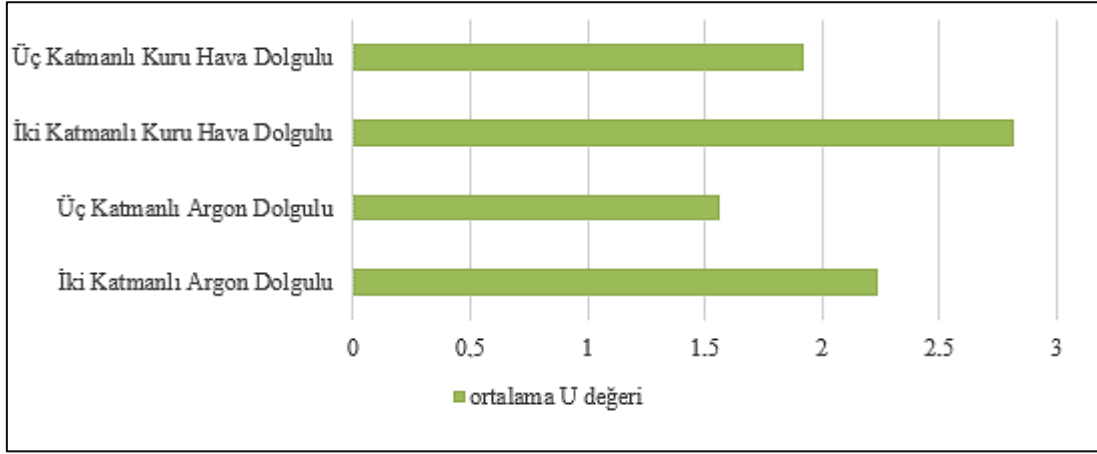
Isparta ili için yapılan hesaplamalarda ve Şekil 15- 17'de görüldüğü gibi iki katmanlı cam yerine üç katmanlı cam uygulamaları kullanıldığında ısı iletimi %12.5 oranında azalma, ısı direncinde %19.6 oranında artış, ısı geçirgenlikte ise %33 oranında azalma görülmüştür. Isı transferinde ise yaklaşık olarak %34 azalma olmuştur. Bu sonuçtan yola çıkacak olursak eğer, ısı tasarrufu için çift katmanlı camlar yerine üç katmanlı camın tercih edilmesi gerekmektedir.



Şekil 17. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama k değerlerinin karşılaştırılması
Figure 17. Comparison of the average k values of two- and three-layer glasses on the basis of gas fill

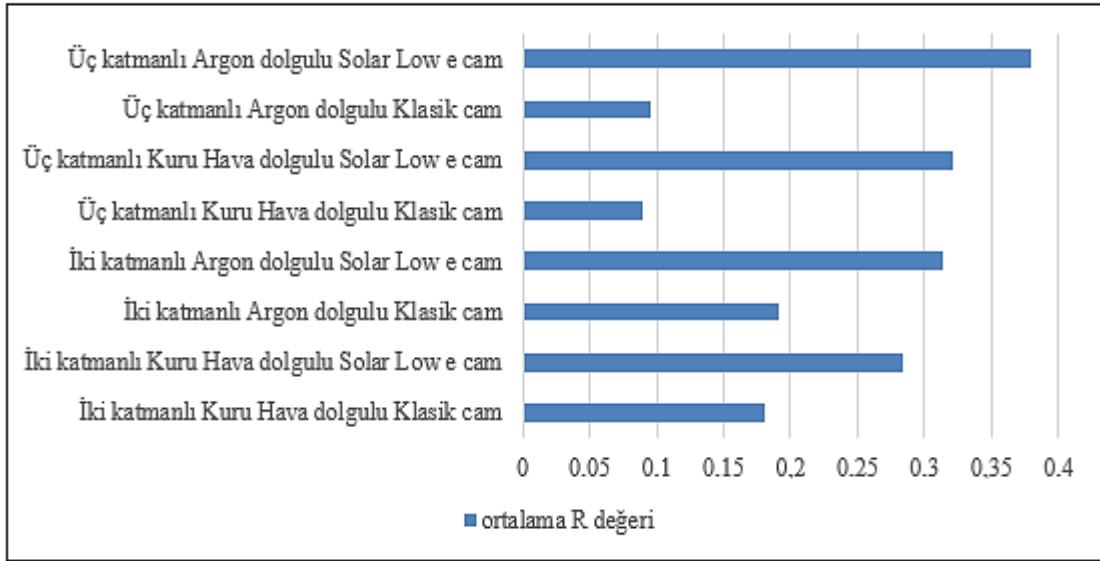


Şekil 18. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama R değerlerinin karşılaştırılması
Figure 18. Comparison of the average R values of two- and three-layer glasses on the basis of gas fill

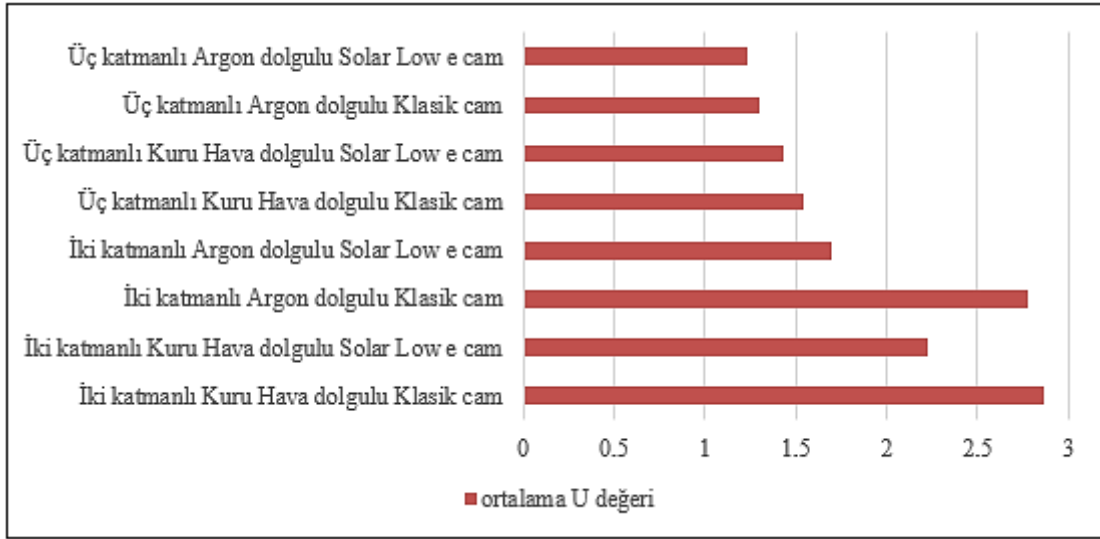


Şekil 19. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama U değerlerinin karşılaştırılması
Figure 19. Comparison of the average U values of two- and three-layer glasses on the basis of gas fill

Yapılan hesaplamalar sonucu ve Şekil 17- 19'da görüldüğü gibi üç katmanlı argon dolgulu cam uygulamasının daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Üç katmanlı argon dolgulu camın ısı iletimi, iki katmanlı argon dolgusuna oranla %2, iki katmanlı kuru hava dolgusuna oranla %31.5 üç katmanlı kuru hava dolgusuna ise %10 oranla daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Sonuç olarak ısı tasarrufu için üç katmanlı ve argon dolgulu cam uygulamalarının tercih edilmesi önerilmektedir.

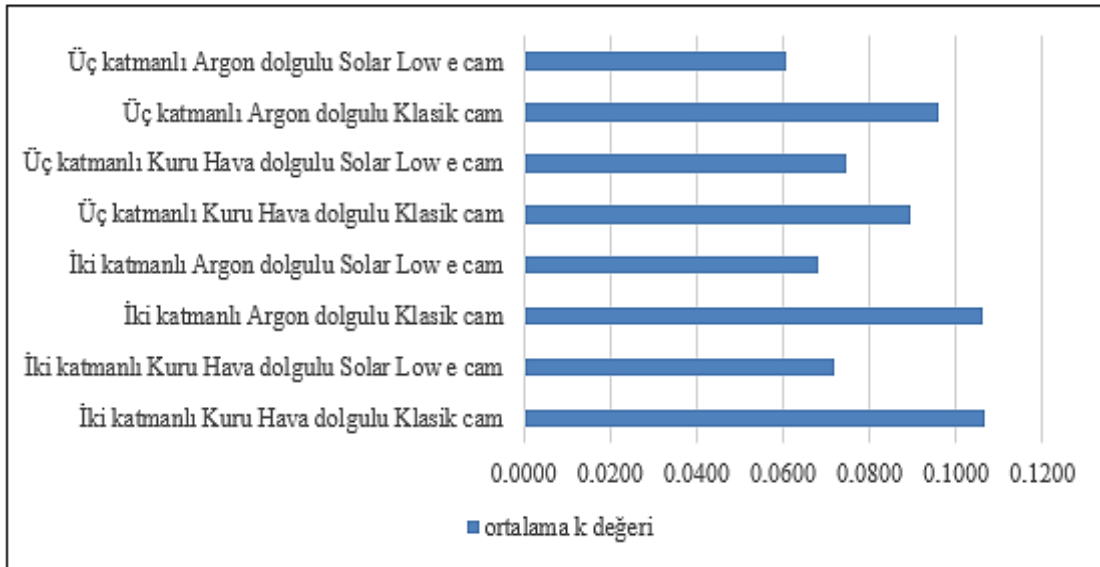


Şekil 20. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan R değerlerinin karşılaştırılması
Figure 20. Comparison of averaged R values of glass applications with different glass thicknesses according to glass coating qualities



Şekil 21. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan U değerlerinin karşılaştırılması

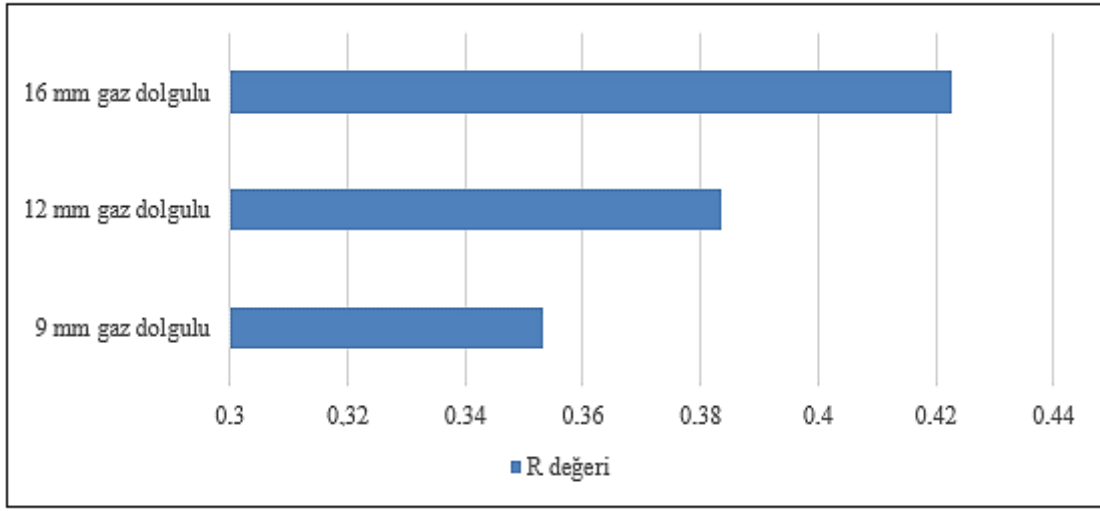
Figure 21. Comparison of averaged U values of glass applications with different glass thicknesses according to glass coating qualities



Şekil 22. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan k değerlerinin karşılaştırılması

Figure 22. Comparison of averaged k values of glass applications with different glass thicknesses according to glass coating qualities

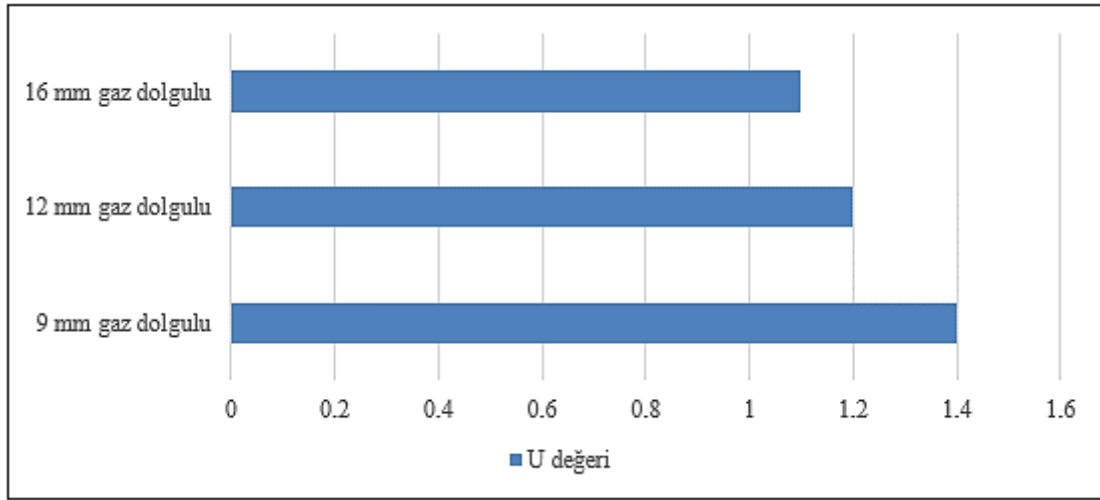
Isıl geçirgenlik katsayısının ve ısı iletkenlik katsayısının daha düşük olması yalıtkanlık bakımından daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca ısı direnç katsayısının daha büyük olması yalıtkanlık özelliğinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 20 - 22 incelendiğinde ısı geçirgenliğinin ve ısı iletkenlik katsayısının en küçük, ısı direncinin ise en büyük olduğu üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e cam uygulamasının olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 23. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre R değerlerinin karşılaştırılması

Figure 23. Comparison of R values according to gas fill thickness in three-layer argon filled Solar Low-e coated glass applications

Şekil 23’de üç katmanlı Solar Low-e kaplamalı ve argon dolgulu cam numunelerinin ısı direnci özelliği karşılaştırılmıştır. Bu bakımdan en yüksek performansı 16 mm’lik gaz dolgusu kalınlığına sahip cam numunesinin gösterdiği görülmüştür.



Şekil 24. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre U değerlerinin karşılaştırılması

Figure 24. Comparison of U values according to gas fill thickness in three-layer argon filled Solar Low-e coated glass applications

Şekil 24’de üç katmanlı Solar Low-e kaplamalı ve argon dolgulu cam numunelerinin ısı geçirgenlik özelliği karşılaştırılmıştır. Isı geçirgenliğinin en az olduğu yani en iyi performansı 16 mm’lik gaz dolgusu kalınlığına sahip cam numunesinin gösterdiği görülmüştür.

Şekil 23 ve 24’de görüldüğü gibi 16 mm kalınlığındaki gaz dolgusuna sahip cam uygulamasının düşük ısı geçirgenlik ve yüksek ısı direnç verileriyle diğer cam uygulamalarına oranla daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Isparta ili için hesaplanan ölçümler ve karşılaştırmalar ışığında ele alınan cam numuneleri arasından Isparta ili için en ideal üç katmanlı argon dolgulu, gaz dolgusunun 16 mm olduğu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamasının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca TS 825'te tavsiye edilen U değeri $1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den daha bir iyi sonuç veren üç katmanlı Solar Low-e 16 mm argon gaz dolgusuna sahip camın U değeri $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmıştır. TS 825 standardına bakıldığı zaman Isparta ilinin 3. Bölgede yer aldığı görülür. Standardın bölge göre verilen ısı geçirgenlik tablosunda 3. Bölgede yer alan Isparta ili için uygun görülen ısı geçirgenlik katsayısı değeri $1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir (Atmaca, 2016).

Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan U değerlerinden, TS 825'e göre tavsiyen edilen U değerine ($1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$) göre ısı geçirgenlik katsayısı uygun olan cam numuneler;

- 3 katmanlı klasik 11 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.7 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı klasik 12 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı klasik 14 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı klasik 16 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı klasik 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı klasik 16 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 2 katmanlı Solar Low-e 9 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 2 katmanlı Solar Low-e 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 2 katmanlı Solar Low-e 16 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı Solar Low-e 9 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı Solar Low-e 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 3 katmanlı Solar Low-e 16 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Yukarıda verildiği gibi 2 adet cam numunesinin (2 katmanlı Solar Low-e 9 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi ve 3 katmanlı klasik 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi) TS 825'te uygun görülen U değerine ($1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$), diğer 10 adet cam numunesinin ise bu uygun görülen U değerinden daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca Isparta ili için iki katmanlı, kaplamasız ve 16 mm kuru hava dolgu kalınlığına sahip cam uygulaması ($k=0.122$) yerine üç katmanlı solar low-e kaplamalı ve 16 mm argon dolgu kalınlığına sahip cam uygulaması ($k=0.063$) kullanıldığında verimin %48.3 oranında iyileştirildiği hesaplanmıştır.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021-YL1-0116 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış/yapacak oldukları katkılardan dolayı editör ve hakem/hakemlere teşekkür ederiz.

Semboller

Symbols

A	Alan (m^2)
$ETKB$	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
h	Isı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2\text{K}$)
k	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)
q	Isı akısı (W/m^2)
Q	Isı kaybı (W)
$Q_{ışınım}$	Işınım ile olan ısı kaybı (W)
R	Isıl geçirgenlik direnci ($\text{m}^2\text{K}/W$)
T	Sıcaklık (K)
T_{amb}	Ortam sıcaklığını (K)
T_{ext}	Ortam sıcaklığı (K)
$TS 825$	Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Türk Standardı

TS EN 12667	Yapı malzemeleri ve mamullerinin ısı performansları-Mahfazalı sıcak plaka ve ısı akış sayacı metotlarıyla ısı direncin tayini-Yüksek ve orta ısı dirençli mamuller
U	Isı geçirgenlik katsayısı (W/m^2K)
ΔT	Sıcaklık farkı (K)
Δx	Kalınlık farkı (m)
ε	Yayma oranı
σ	Stefan-Boltzmann katsayısı ($W/m^2 K^4$)

Yazar katkısı

Author contribution

Tüm yazarlar bu makalenin hazırlanmasına katkıda bulunmuş ve metin üzerinde iş birliği yapmıştır. Araştırmacılarından Nilsu OĞULTEKİN, literatür taraması ve teorik çerçeve oluşturma aşamalarında, Comsol programında çizimlerin yapılması, veri toplama sürecine katkı sağlamış ve yazım aşamasında görev almıştır. Doç. Dr. Murat KORU proje fikrinin oluşturulması ve geliştirilmesi, araştırmanın tasarımı ve yöntemleri üzerinde çalışmış, HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla ısı iletkenlik katsayılarının ölçülmesinde, verilerin toplanıp analiz edilmesinde, literatür taramasında, makale yazımının düzenlenmesinde, ilgili tablo verilerinin yorumlanmasında katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

References

- Aksoy, M. A., Keçeciler, A. & Onural, A. Ş. (2001). *Konutlarda Isı Yalıtımı Yöntemlerinde Ekonomik Uygulamalar*. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yalıtım Kongresi. Mart 23-25, Eskişehir, 81-86.
- Altınışık, K. (2006). *Isı yalıtımı*. Ankara: Nobel Yayınevi
- Arıcı, M., Karabay, H. & Kan, M. (2015). Flow and heat transfer in double, triple and quadruple pane windows. *Energy and Buildings*, 86, 394–402. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.043.
- Aşık, M. Z. & Tezcan, S. (2005). A mathematical model for the behavior of laminated glass beams. *Computers and Structures*, 83, 1742-1753. doi:10.1016/j.compstruc.2005.02.020.
- Aşık, M. Z., Dural, E., Yetmez, M. & Uzhan, T. (2014). A mathematical model for the behavior of laminated uniformly curved glass beams. *Composites Part B: Eng*, 58, 593-604. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.11.004.
- Atmaca, U. (2016). Ts 825 binalarda ısı yalıtım kuralları standardındaki güncellemeler. *Tesisat Mühendisliği*, 154, 21-35.
- Duer, K., Svendsen, S., Moller, M. & Birck, J. (2002). Energy labelling of glazings and windows in Denmark: calculated and measured values. *Solar Energy*, 73(1), 23–31. doi:10.1016/S0038-092X(02)00031-2.
- Ekosmart (t.y.). *Enerji verimliliği*. <https://ekosmart.com.tr/enerji-verimliliği.html> (Son erişim tarihi: 13.08.2023)

- Ertürk, M., Pul, H., Daşdemir, A., Coşkun, C. & Oktay, Z. (2016). Pencerelerde Birbirine Paralel Farklı Tabaka Halinde Hava Boşluğunun Enerji Tüketimine Etkisinin Araştırılması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4 (2016) 646-654.
- Eti Yazılım Merkezi (t.y.). *Comsol Multiphysics*. <http://www.eti.com.tr/urun.aspx?Marka=Comsol&ContentId=617&CategoryId=15&MnId=244>. (Son erişim tarihi: 01.03.2023)
- ETKB-Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı. (2018). *2018 Yılı Enerji Dengesi*. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari> (Son erişim tarihi: 06.12.2021)
- Etzion, Y. & Erell, E. (2000). Controlling the transmission of radiant energy through windows: a novel ventilated reversible glazing system. *Building and Environment*, 35(5), 433–444. doi:10.1016/S0360-1323(99)00039-6.
- Fıratpen (t.y.). *Pencerelerde camın önemi ve cam çeşitleri*. <https://www.firatpen.com.tr/pvc-pencerelerde-camin-onemi-ve-cam-cesitleri>. (Son erişim tarihi: 06.12.2021)
- Foraboschi, P. (2013). Three-layered sandwich plate: exact mathematical model. *Composites Part B: Engineering*, 45, 1601-1612. doi:10.1016/j.compositesb.2012.08.003.
- Foraboschi, P. (2014). Three layered plate: elasticity solution. *Composites Part B: Engineering*, 60, 764-776. doi:10.1016/j.compositesb.2013.06.037.
- Guardianglass (t.y.). *Low-E Glass Providing The Comfort Factor*. <https://www.guardianglass.com/eu/en/our-glass/glass-types/low-e-glass#benefits>. (Son erişim tarihi: 02.08.2023)
- Koçu, N. & Korkmaz, Z. (2002). Konya Çevresinde Yapılarda Isı Yalıtım Uygulamalarının TS 825'e Göre Değerlendirilmesi ve Çevre Kirliliğine Etkisi. *Tesisat Mühendisliği*, 74, 1-12.
- Maccari, A. & Zinzi, M. (2001). Simplified algorithms for the Italian energy rating scheme for fenestration in residential buildings. *Solar Energy*, 69, 75-92. doi:10.1016/S0038-092X(01)00045-7.
- Özrahat, E. (2007). *Değişik Gazlar İçin Çift Camlı Pencere Boyutlarının Sayısal İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü)
- Pilkington (2023). *Low-emissivity Glass*. <https://www.pilkington.com/en/global/knowledge-base/types-of-glass/energy-efficient-glass/low-emissivity-glass>. (Son erişim tarihi: 03.08.2023)
- Pul, H., Daşdemir, A., Ertürk, M., Keçebaş, A., Uygunoğlu, T. (2015, Nisan). İl bazında çift ve üç camlı pencereler için optimum hava tabakası kalınlığı analizi. *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir
- Roos, A. & Karlsson, B. (1994). Optical and thermal characterization of multiple glazed windows with low U-values. *Solar Energy*, 52(4), 315-325. doi:10.1016/0038-092X(94)90138-4.
- Tainstruments (t.y.). *Fox314 heat flow meters*. <https://www.tainstruments.com/fox-series-314/> (Son erişim tarihi: 13.08.2023)
- TS 825, (2009). Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. TS, Revize Tadilatı, Ankara.
- Underwood, C.P. & Yik, W.H. (2004). *Modelling Methods For Energy In Buildings*. Blackwell Science Yayınları, Blackwell Yayınevi.
- Vallabhan, C.V.G., Das, Y.C., Magdi, M., Aşık, M. & Bailey, J.R. (1993). Analysis of laminated glass units. *Journal of Structural Engineering*, 119(5), 1572-1585.
- Yohanis, Y. G. & Norton, B. (1999). Utilization factor for building solar-heat gain for use in a simplified energy model. *Applied Energy*, 63(4), 227–239. doi:10.1016/S0306-2619(99)00032-X.