

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇOK KATMANLI CAM SİSTEMLERİNİN ISIL
PERFORMANSININ FARKLI PARAMETRELERE BAĞLI
SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Nilsu OĞULTEKİN

Danışman
Doç. Dr. Murat KORU

ISPARTA - 2022



© 2022 [Nilsu OĞULTEKİN]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Çok Katmanlı Cam Uygulamaları.....	5
1.2. Cam Uygulamalarında Isı Transferi.....	7
2. KAYNAK ÖZETLERİ	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Isıl Performansın Farklı Parametrelere Bağlı Olarak Sayısal ve Deneysel İncelenmesi	30
4.1.1. Farklı gaz dolgularının ısı iletkenlik katsayısına etkisi.....	30
4.1.2. İki katmanlı ve üç katmanlı camların ısı geçirgenlik direncinin incelenmesi	34
4.1.3. Farklı cam kaplamalarının ısı transferine olan etkisinin incelenmesi.....	50
4.1.4. Gaz dolgusu kalınlığının ısı geçirgenlik katsayısına etkisi.....	56
4.1.5. TS 825'e göre Isparta ili için verilen pencere U değerleri ve analizler sonucu bulunan U değerlerinin karşılaştırılması	57
4.2. Deneysel Bulguların Karşılaştırılması	60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	71

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇOK KATMANLI CAM SİSTEMLERİNİN ISIL PERFORMANSININ FARKLI PARAMETRELERE BAĞLI SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Nilsu OĞULTEKİN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendiliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat KORU

Çağımızın en büyük sorunu enerji kaynaklarının azalması ve bu kaynaklara erişim zorluğudur. Enerji, dünya çapında ülkelerin ekonomik ve siyasal politikalarını belirleyen bir etmendir. Ülkeler geliştikçe enerjiye olan ihtiyaçları da artmaktadır. Gelişmekte olan ya da gelişmiş olan ülkelerde enerji ihtiyacında artış gözlenir. Her geçen gün artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve birim başına düşen enerji maliyetini azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve verimlerinin artırılması üzerine çalışmalara hız verilmiştir. Fosil kaynaklı enerjilerin rezervlerinin azalması, enerji maliyetlerinde yaşanan artış, yenilenebilir enerji projelerine öncelik verilmesini sağlamıştır. Ülkemizde üretilen enerjinin %35’lik kısmı binalar için kullanılırken binalarda kullandığımız enerjinin %65’i ise iklimlendirme için tüketilmektedir. Bina iklimlendirmelerinde enerji verimliliğinde uygulanacak tedbirler, enerji sarfiyatının önüne geçilmesini sağlayarak küresel olarak karbon ayak izinin, ulusal olarakta enerji ithalatının azalmasını sağlayacaktır. Bu bağlamda ısı kayıplarının araştırılması ve bu kayıpların azaltılması için yapılan çalışmalara ağırlık verilmesi doğru bir karar olacaktır.

Bu çalışmada pencerelerin, bina ısı verimliliğine olan etkisi incelenecektir. Argon, kuru hava dolgulu, farklı gaz dolgusu kalınlıklarına sahip konfor cam ve ısıcam kaplamalı, çok katmanlı pencerelerin ısı iletim katsayılarıyla ilgili sayısal analizler sunulacaktır. Ayrıca gaz dolgusundaki sıcaklık dağılımı gözlemlenerek, tasarımları ve simülasyonları için de Comsol multiphysics programı kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Binalarda ısı yalıtımı, Çok katmanlı cam, Isıl iletkenlik katsayısı, Cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığı, Sayısal analiz

2022, 71 sayfa

ABSTRACT

Master's Thesis

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCE OF MULTILAYER GLASS SYSTEMS DEPENDING ON DIFFERENT PARAMETERS

Nilsu OĞULTEKİN

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat KORU

The biggest problem of our age is the scarcity of energy resources and the difficulty of access to these resources. Energy is a factor that determines the economic and political policies of countries around the world. As countries develop, their need for energy increases. There is an increase in the need for energy in developing or developed countries. In order to meet the ever-increasing energy needs and to reduce the energy cost per unit, studies on the development of renewable energy resources and increasing their efficiency have been accelerated. The decrease in the reserves of fossil-based energies and the increase in energy costs have led the prioritization of renewable energy projects. While 35% of the energy produced in our country is used for buildings, 65% of the energy we use buildings is consumed for air conditioning. Measures to be implemented in energy efficiency in building air conditioning will reduce the carbon footprint globally and energy imports nationally by preventing energy consumption. In this context, it would be the right decision to investigate heat losses and to focus on studies to reduce these losses.

In this study, the effect of windows on building thermal efficiency will be examined. Numerical analysis of the heat transmission coefficients of argon, dry air filled, comfort glass and insulating glass coated, multilayer windows with different gas filling thicknesses will be presented. In addition, the temperature distribution in gas filling will be observed and the Comsol multiphysics program will be used for their design and simulation.

Key Words: Energy efficiency, Thermal insulation in buildings, Multilayer glass, Thermal conductivity coefficient, Gas fill thickness in glass applications, Numerical analysis

2022, 71 pages

TEŞEKKÜR

Tezimin yürütülmesinde desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım sayın Doç. Dr. Murat KORU'ya çalışma süresince bana desteklerinden dolayı sayın Oya OĞULTEKİN'e ve Ali OĞULTEKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

2021-YL1-0116 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Nilsu OĞULTEKİN
ISPARTA, 2022



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Sektörlere göre nihai enerji tüketimi.....	4
Şekil 1.2. Yalıtım sistemi sektör SWOT analizi	5
Şekil 1.3. Çok katmanlı cam uygulamaları	6
Şekil 1.4. İç piyasadaki yalıtım camları satış oranları	7
Şekil 1.5. İletim yoluyla ısı transferi.....	8
Şekil 1.6. Taşınım yoluyla ısı transferi	11
Şekil 1.7. Işınım yoluyla ısı transferi	12
Şekil 1.8. Çift katman ve Güneş kontrollü camlarda ısı transfer hareketi	14
Şekil 1.9. Üç katman ve Güneş kontrollü camlarda ısı transfer hareketi	14
Şekil 3.1. Çok katmanlı cam numune örnekleri.....	21
Şekil 3.2. Isıl iletkenlik katsayısı ölçen cihaz	22
Şekil 3.3. Isı akış ölçer şematik diyagramı	22
Şekil 3.4. İki katmanlı argon gazlı cam numunesi ölçüm sonucu.....	23
Şekil 3.5. Klasik cam değerleri	24
Şekil 3.6. Solar Low-E kaplamalı cam değerleri	25
Şekil 3.7. 3D çift katmanlı cam çizimi.....	25
Şekil 3.8. İki katmanlı ve üç katmanlı camların ağ yapısı	27
Şekil 3.9. İki katmanlı argon gazlı klasik cam ağ bağımsızlık test grafiği	27
Şekil 3.10. Örnek Mesh Ağ Görünümleri	28
Şekil 3.11. Üç katmanlı argon gazlı klasik cam ağ bağımsızlık test grafiği	28
Şekil 3.12. Örnek mesh ağ görünümleri.....	29
Şekil 4.1 Üç ve iki katmanlı argon gazlı camlar	30
Şekil 4.2. Kuru hava dolgulu ve argon dolgulu farklı Kalınlıklardaki iki katmanlı klasik camların Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla elde k değerlerinin karşılaştırılması	32
Şekil 4.3. Kuru hava dolgulu ve argon dolgulu farklı kalınlıklardaki üç katmanlı klasik camların Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla elde k değerlerinin karşılaştırılması	33
Şekil 4.4. Çift katmanlı ve üç katmanlı argon dolgulu klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması	36
Şekil 4.5. Çift katmanlı argon dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili	37
Şekil 4.6. Üç katmanlı argon dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolguları içerisindeki hız profili	38
Şekil 4.7. Çift katmanlı ve üç katmanlı kuru Hava dolgulu klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması	39
Şekil 4.8. Çift katmanlı kuru hava dolgulu 9,12 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili	40
Şekil 4.9. Çift katmanlı kuru hava dolgulu 14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili	41
Şekil 4.10. Üç katmanlı kuru hava dolgulu 9,12 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolguları içerisindeki hız profili	41

Şekil 4.11. Üç katmanlı kuru hava dolgulu 14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolguları içerisindeki hız profili.....	42
Şekil 4.12. Çift Katmanlı ve Üç Katmanlı argon Gazı dolgulu farklı kalınlıklardaki Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması	43
Şekil 4.13. Çift katmanlı argon dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili	44
Şekil 4.14. Üç katmanlı argon dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolguları içerisindeki hız profili	45
Şekil 4.15. Çift Katmanlı ve üç katmanlı kuru hava dolgulu farklı kalınlıklardaki Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması	46
Şekil 4.16. Çift katmanlı kuru hava dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili	48
Şekil 4.17. Üç katmanlı kuru hava dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolguları içerisindeki hız profili	49
Şekil 4.18. 9 mm kalınlıkta kuru hava dolgulu cam uygulamaları numuneleri ..	50
Şekil 4.19. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması	51
Şekil 4.20. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması	52
Şekil 4.21. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması	53
Şekil 4.22. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil 4.23. Kuru hava dolgulu 9 ve 12 mm kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E ve klasik camların sıcaklık profili.....	55
Şekil 4.24. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama k değerlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 4.25. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama R değerlerinin karşılaştırılması	61
Şekil 4.26. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama U değerlerinin karşılaştırılması	61
Şekil 4.27. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama k değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 4.28. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama R değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 4.29. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama U değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 4.30. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan R değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 4.31. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan U değerlerinin karşılaştırılması	63

Şekil 4.32. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan k değerlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 4.33. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre R değerlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 4.34. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre k değerlerinin karşılaştırılması	65
Şekil 4.35. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre U değerlerinin karşılaştırılması	65



ÇİZELGELAR DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Ülkelere göre hesaplanan enerji yoğunluğu, TEP/Nüfus Oran Çizelgesi	3
Çizelge 4.1. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması	31
Çizelge 4.2. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması.....	31
Çizelge 4.3. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması	31
Çizelge 4.4. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması.....	32
Çizelge 4.5. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması.....	35
Çizelge 4.6. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması.....	35
Çizelge 4.7. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması	39
Çizelge 4.8. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması	39
Çizelge 4.9. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması.....	42
Çizelge 4.10. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması	42
Çizelge 4.11. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması.....	46
Çizelge 4.12. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması.....	46
Çizelge 4.13. TS 825’de verilen bölgeler.....	57
Çizelge 4.14. Bölgelere göre en fazla değer olarak kabul edilmesi tavsiye edilen U değerleri	58
Çizelge 4.15. TS 825’e göre tavsiyen edilen U değerine uygun olan cam numuneler.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ETKB Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

h Isı taşınım katsayısı ($W/m^2 K$)

k Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)

L Geometriye ait karakteristik uzunluk (m)

max Maksimum

OECD Petrol İhraç Eden Ülkeler Birliği

P Basınç (Pa)

PVB Polivinil Butinal

q Isı Akısı (W/m^2)

Q_{iletim} İletimle olan ısı kaybı (W)

$Q_{sızıntı}$ Hava sızıntısı ile olan ısı kaybı (W)

R Isıl Geçirgenlik Direnci (m^2K/ W)

ref Referans

SWOT Sektör Analiz Raporu (Strength, Weakness, Opportunity, and Threat)

TEP Ton Eşdeğer Petrol

TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Türk Standardı

U Isıl Geçirgenlik katsayısı (W/m^2K)

V Hava debisi (m^3/s)

ΔT Sıcaklık Farkı

Δx Kalınlık Farkı (m)

1. GİRİŞ

Dünya çapında artan nüfusla doğru orantılı olarak gelişen sanayi ve kentleşme, beraberinde enerjiye olan ihtiyacı getirmiştir. İhtiyaç duyulan bu enerji ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıtlar, dünyada belli bir rezerv dahilinde bulunmakta ve yenilenebilirliği mümkün olmamakla birlikte, çevre üzerinde de geriye dönüşü olmayan olumsuz etkiler yaratmaktadır (Eroğlu vd., 2018). Karbon ayak izini artıran ve buna paralel doğa biyoçeşitliliğini azaltan fosil enerji kaynakları, aynı zamanda küresel iklim problemlerine de neden olmaktadır.

1970’li yıllarda OPEC (petrol ihraç eden ülkeler örgütü) petrol üretimini düşürüp batılı ülkelere ambargo koymasının ardından artan petrol fiyatları ile birlikte fosil yakıtlara olan bağımlılıktan dolayı yaşanan küresel enerji krizi göz ardı edilemeyecek bir problem olmaya başlamıştır (Anonim, 2021a). Hem geçmişte yaşanan bu kriz hem de fosil enerji kaynaklarında yakın gelecekte yaşanacak rezerv sıkıntıları ve bu enerji kaynaklarının çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı doğa dostu ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanılması bir seçenek halinden çıkıp zorunluluk haline gelmiştir.

Temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları her ne kadar doğa ve insanlık için büyük bir önem arz ediyor olsada bu kaynakların doğru ve verimli kullanılması da o kadar önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında verim önemli bir faktördür. İktisatta bir terim olan crowding-out (dışlama etkisi)’a göre eğer devlet fazla borçlanma yapıyorsa, özel sektörün kaynak elde edemediği sonuçlarını doğurur. Bu terimi enerji alanına uyguladığımızda fosil enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynaklarına nazaran daha ucuz olması (yatırım maliyetlerinden dolayı) yeni sistem ve teknolojilerin piyasaya girişini zorlaştırmaktadır (Bayındır, 2010). Bu nedenle sistem verimlerinin iyileştirilmeleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim teşviğini artıracaktır.

Enerji verimliliğinde yapılacak olan yatırım ve kullanım teşvikleri doğrultusunda enerji tasaarrufu sağlanmış olacaktır. Bu durum tüm sektörlerle olumlu yansıyacaktır. Binalar, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde toplam enerji sarfiyatının %40’ı ile %60’nı oluşturmaktadır (Underwood ve Yik, 2004). Konut sektörlerinde oluşturulacak

olan iyileştirmeler sayesinde enerjinin geri dönüşümü sağlanacak dolaylı olarak verimliliği de arttıracaktır.

Binaların ısıtılmasında kullandığımız enerjinin verimliliğinin daha iyi olması için bina içinde ve dışında kullanılan ekipmanların tasarımının önemi vurgulanmaya başlanmıştır. Örneğin binalarda kullanılan pencerenin tasarımına, cam için kullanılan maddenin özelliğine göre ısı kaçaklarını daha aza indirmek mümkündür. Isı kaçaklarının en aza indirgenmesiyle kışın ısıtma, yazın soğutma için harcanan maliyetlerde de azalma görülecektir. Buna bağlı olarak binalarda kullanılan yapı elemanları ısı yalıtımı bakımından önem arz etmektedir.

Bu tezde bina iklimlendirme hususunda kullandığımız enerjinin azaltılması ve verimi etkileyen faktörler hakkında çalışmalar yapılmıştır. Isı kaçağının en çok olduğu camlardaki ısı verimliliğini artırmaya yönelik yaklaşımlar incelenmiştir.

Fosil kaynaklı yakıtların rezervlerinin, artan enerji talebi ile birlikte azalması ve küresel bir sorun olan enerji arz-talep dengesi için kurulan üretim yapılarının çevreye verdiği etkilerin azaltılmak istenilmesi nedeniyle enerjinin verimli bir şekilde kullanılması büyük önem teşkil etmektedir.

Enerji verimliliği ürün miktarını, ürünün kalitesini azaltmadan tüketilen enerjiyi en aza indirmek olarak tanımlanabilir. Gelişmiş ülkeler, sektörler için kullanılan enerjinin verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalara ağırlık vermeye başlamıştır. Enerji verimliliğinin daha karlı ve çevre dostu olduğunun anlaşılması ile birlikte, bu konuda yapılan çalışmalarda son yıllarda bir artış görülmektedir.

Ülkemizdeki enerji verimliliği durumu incelendiğinde Uluslararası Enerji Ajansının yayınladığı verilere göre Türkiye’de kişi başına düşen enerji tüketimi yüzdesi 0.35 iken diğer gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde bu oran 0.09 ve 0.19’dur. (Anonim, 2021b). Çizelge 1.1’de gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerdeki enerji yoğunluğu ve kişi başı enerji tüketim değerleri verilmiştir.

Çizelge 1.1. Ülkelere göre hesaplanan enerji yoğunluğu, TEP/Nüfus Oran Çizelgesi

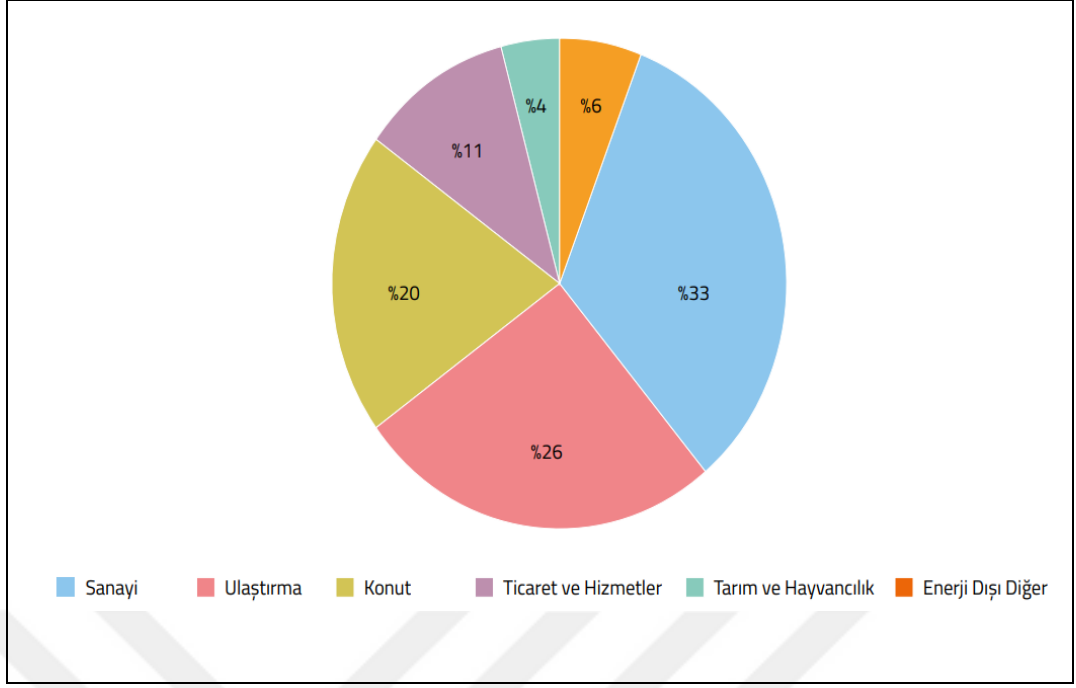
	Enerji Yoğunluğu (%)	Kişi Başına Tüketim (TEP/Nüfus)
Türkiye	0.38	1.06
Japonya	0.09	4.09
ABD	0.25	7.98
Yunanistan	0.2	2.62
OECD Ülkeleri	0.19	4.68
Dünya	0.29	1.64

Dünya çapında enerji politikalarını incelediğimizde, enerji tasarrufu ve verimi konusunun önemli bir yeri olduğu görülmüştür. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) 11. Kalkınma Planı'na (2019-23) (Anonim, 2019) göre;

- Örnek enerji verimliliği uygulamalarının tanıtımı ve yaygınlaştırılması amacıyla, enerji verimliliği projeleri yarışmalarla desteklenecek, uygulamaya yönelik mevzuat ve teknik altyapının oluşturulması sağlanacaktır.
- Enerji verimliliğinin, bölgesel ısıtma ve soğutma sistemlerinin ülke genelinde yaygınlaştırılmasına yönelik ısı piyasası mevzuatı oluşturulacaktır.
- Enerji verimliliği kazanımları ve orman varlığının artırılması gibi ilave tedbirlerle karbon salımının azaltılmasına dair önlemler geliştirilecektir.
- Mevcut binalara enerji verimliliğini teşvik edici desteklemeler yapılacaktır.
- Kamu Binalarında Enerji Verimliliği Projesi uygulanacaktır.
- Konut üretiminde kalite, sağlamlık, erişilebilirlik, enerji verimliliği, afetlere dayanıklılık standartları geliştirilecek ve her aşama gözetilecektir.

Yukarıda verilen maddeler doğrultusunda bina, konutlarda 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.

ETKB Tarafından hazırlanan 2018 Enerji denge Çizelgesuna göre bina ve konut sektörü nihai enerji tüketiminin %20'i kaplamaktadır. Şekil 1.1'de 2018 nihai enerji tüketiminin sektörlere göre olan dağılımı verilmiştir (Underwood ve Yık, 2004).



Şekil 1.1. Sektörlere göre nihai enerji tüketimi

Şekil 1.1 incelendiğinde konut sektöründe enerji tüketiminin payının fazla olduğu görülmektedir. Yapı sektöründenki 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 zarfı bölümüne göre maksimum U değerlerini de belirlemektedir. U değeri, ısıнын 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).

Enerji verimliliği ve ısı yalıtımı birbirlerini takip eden hususlardır. Bu nedenle yalıtım sistemleri verimliliği etkileyen en büyük unsur olmakla birlikte avantajları olduğu

kadar zayıf yanları da bulunmaktadır. Şekil 1.2’de yalıtım sistemleri sektörünün güçlü, zayıf yanları ile sektöre ait fırsat ve tehditlerin bulunduğu SWOT analizi verilmiştir.



Şekil 1.2. Yalıtım sistemi sektör SWOT analizi

Konut sektöründe enerji verimliliğini etkileyen faktörlerin başında ısı yalıtımı gelmektedir. Konut inşası sırasında gerekli standartlara göre yapılan yalıtımlar, enerji verimliliğini artırarak, uzun vadede kendi maliyetini karşılayarak ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Yalıtım sistemlerinde enerji verimlilik uygulamalarında cam sektörü önemli bir yer teşkil etmektedir.

Cam sektörünün ana prensibi konutlardaki ısı kontrolünün sağlanmasıdır. Cam tasarımlarında en çok dikkat edilen özelliklerden biri olan 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 ısıнын dengede tutulmasıdır. Camlardaki yalıtımın verimliliğini arttıran en etkin çözüm katman sayısı, gaz dolgusu kalınlığının artırılmasıdır. Ayrıca gaz dolgusunun niteliği de önemli bir faktördür.

1.1. Çok Katmanlı Cam Uygulamaları

Çift katmalı cam pencereler, iki cam plakanın arasına mekânın basıncına göre kuru hava ya da diğer uygun gazlarla yapılan hava dolgusuyla, fabrika ortamında birleştirilen yalıtımlı cam uygulamasıdır. Şekil 1.3’de görüleceği gibi çok katmanlı

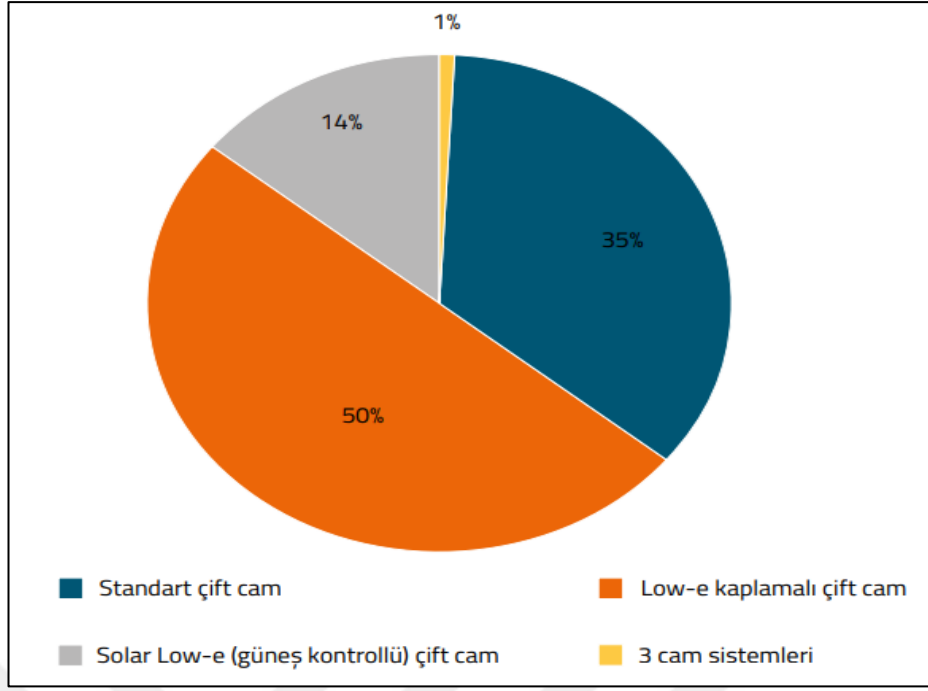
cam pencereler, alüminyum gaz dolgu ıtasının tabaka kalınlığı ve içerisinde yer alan nem önleyici malzemeler, sızdırmazlık özelliğı için poliizobutilen, polisülfüd ya da özel silikonlarla birleştirilir. şekil 1.3'te çok katmanlı cam uygulamaları verilmiştir.

Çift katmanlı cam pencerelerde renkli/renksiz, güneş ve ısı kontrol kaplamalı (Low-E) ya da buzlu, temperli, emaye ve lamine cam plakalarla oluşturulabilir. İstenilen özelliklere göre ya da yapılacak camın kullanım alanına göre farklı kaplamalar da yapılabilir. Çift katmanlı cam pencerelerde cam plakaları arası dış ortamla iç ortam arasında gerçekleşecek olan ısı transferini yavaşlatarak ve en aza indirgeyerek ısı yalıtımı sağılamaktadır. Elde edilen yalıtımın verimliliğini, başarısını plakaların arasındaki gaz dolgusunun kalınlığı, gazın özelliğı ve varsa plakaların kaplamasının yayılım katsayısı belirlemektedir (Anonim, 2021c).



şekil 1.3. Çok katmanlı cam uygulamaları (Anonim, 2021c)

Pencerelerde kullanılan camın serüveni önce tek katmanlı camla başlamış olup teknolojik gelişmelerle birlikte şekil 1.4'de de görüldüğü gibi çift katmanlı ve çok katmanlı cam ürünleri üzerine birçok çalışmalar yapılarak kullanımı yaygınlaşmıştır. şekil 1.4'de iç piyasadaki yalıtım camlarının konutlardaki kullanım oranları verilmiştir.



Şekil 1.4. İç piyasadaki yalıtım camları satış oranları (Anonim, 2021c)

Tek katmanlı camlar yerine çok katmanlı camların kullanılmasının ses ve ısı yalıtımı hususunda daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Katman sayısı arttıkça yalıtımdaki verimlilikte artış göstermektedir. Çok katmanlı cam uygulamalarında cam plakalar arasında ısı transferinin daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı transferinin yavaşlatılması ısı yalıtımının başarısını artırmaktadır (Anonim, 2021c).

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 taşınım ile olan geçişi azaltmak için akışkanın hareketinin azaltılması (yüksek viskozite), İletimle 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).

1.2. Cam Uygulamalarında Isı Transferi

Isı, bir enerjidir ve farklı sıcaklıklara sahip mekânlarda, sıcaklığın yüksek olduğu taraftan düşük olduğu tarafa doğru geçme eğilimi gösterir. Isı bu geçiş esnasında,

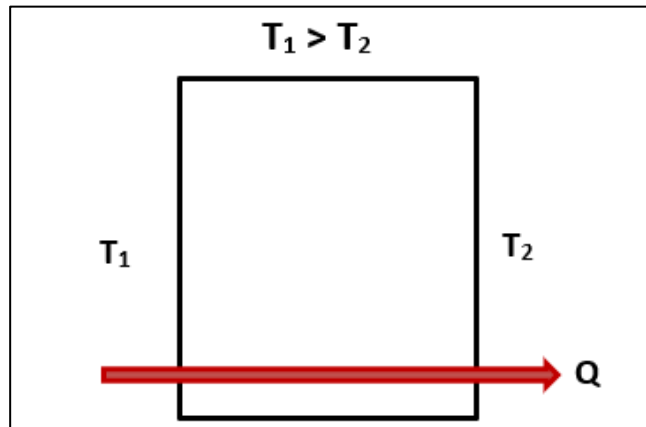
mekânlar arasındaki malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarına ve kalınlıklarına bağı olarak bir dirençle karşılanır (Özer, 2006).

Isı yalıtımı, kapalı mekânların iç sıcaklıklarını istenilen düzeyde tutabilmek için, dış iklim koşullarına ve çevre sorunlarına karşı yapılan, ısıtma-soğutma işlemlerinde kullanılan enerji tasarrufunu sağlamak ve hava kirliliğini azaltmak için yapılarda alınan her türlü önlemler bütünüdür. Yalıtım aynı zamanda yapıyı dış etkilere koruyarak ömrünü uzatmakta ve yapı fiziği şartlarını yerine getirildiği için de işletme maliyetlerini düşürmektedir (Incropera vd.,2010).

Enerjinin çeşitli formlarını, bir yerden başka bir yere ve bir formdan başka bir forma transferi ile tanımlanan ısı, iş, sıcaklık ile ilgilenen bilim dalına termodinamik denir (Kaplan vd., 2005). Termodinamik, iki veya daha fazla sistem arasındaki farklı sıcaklık değerleri nedeniyle oluşan enerji iletimini, ısı olarak tanımlamaktadır. Isı transferi ise farklı sıcaklık değerlerinden doğan enerji aktarımı olarak tanımlanmaktadır. Bir form içinde veya birden fazla ortam arasında sıcaklık değerlerinde farklılık mevcut ise ısı transferi her daim gerçekleşir. Isı transferi üç yolla oluşur. Bunlar;

- İletim
- Taşınım
- Işınım

Bir katı veya durgun akışkan içerisinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, ısı transferi iletim ile gerçekleşir. Şekil 1.5’de ortamlar arasındaki ısı iletimi verilmiştir.



Şekil 1.5. İletim yoluyla ısı transferi

Şekil 1.5’de T_1 ve T_2 değerleri iki farklı ortama ait olan sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. $T_1 > T_2$ bağıntısından dolayı ısı transferi T_1 yönünden T_2 yönüne doğru gerçekleşmektedir.

Kaldırma kuvvetinin oluşturduğu akış zayıftır ve ısı geçişi akışkan boyunca iletimle gerçekleşir. Rayleigh sayısı arttıkça, hücrel akış artar ve yan yüzeylerde ince sınır tabakalar biçiminde yoğunlaşır. Orta bölge hemen hemen durgun kalır ancak köşelerde ek hücreler oluşabilir ve yan yüzeylerdeki sınır tabakalar sonunda türbülansa geçmektedir (Çengel, 2003).

Isı transferini uygun an denklemleriyle de incelemek mümkündür. Bu denklemler, aktarılan enerjinin birim zamandaki miktarını hesaplamak için de kullanılabilir. Isı iletimi için kullanılan an denklemi Fourier Yasasıdır (Khan, 2018).

Rayleigh sayısının 1708’den küçük olduğu koşullarda kaldırma kuvveti akışkan direncinin yenemediğinden, iletimle ısı transferi gerçekleşir. Rayleigh sayısı 1708 değerinin üzerinde olduğu durumlarda kaldırma kuvveti akışkan direncini yener. Rayleigh akışkan hareketi belli bir bölgede düzenli olarak dönen hücreler şeklinde başlar ve daha büyük Rayleigh sayılarında ise hava tabakasının katı bir cisim gibi davranmayıp akışkan gibi davranmasına neden olur. Bu hücrel yapı bozulacağından akışkan hareketi türbülanslı olur (Koçu, 2000). Denklem (1.1)’de Rayleigh sayısı (Ra) taşınım sınırlarının belirlenmesinde kullanılan faktördür.

$$Ra = \frac{g\beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \times Pr \quad (1.1)$$

Bu denklemde L karakteristik uzunluk(m), Ra Rayleigh sayısı, g yerçekimine bağlı ivme (m/s^2), β olan termal genleşme katsayısı ($1/K$), ν kinematik viskozite ($m^2 \cdot s^{-1}$), T_s yüzey sıcaklığı (K), T_∞ hareketsiz sıcaklığı (nesnenin yüzeyinden uzaktaki sıvı sıcaklığı) (K), Pr Prandtl numarasını ifade etmektedir.

İdeal akışkanlardaki genleşme katsayısının (β) belirlenmesinde kullanılan faktörler Denklem (1.2) ve Denklem (1.3)’de verilmiştir.

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{film}}} \quad (1.2)$$

$$T_{\text{film}} = T_{\text{iç}} + \frac{T_{\text{dış}}}{2} \quad (1.3)$$

Denklem (1.2) ve Denklem (1.3)'de β ideal akışkanlardaki genleşme katsayısını, T_{film} mutlak sıcaklığını (K) (ideal gazlar için), $T_{\text{iç}}$ iç ortam sıcaklığını (K), $T_{\text{dış}}$ dış ortama sıcaklığını (K) ifade etmektedir.

Taşıyım yoluyla olan ısı transferinin sınır noktasının ölçülmesi için kullanılan faktörlerden bir de Nusselt sayısıdır. Nuseelt sayısı ile ısı taşıyım katsayısı hesaplamak için kullanılan Denklem (1.4) ve Denklem (1.5)' de verilmiştir.

$$Nu = 0.42 \, Ra_L^{1/4} \, Pr^{0.012} \left(\frac{H}{L_h}\right)^{-0.3} \quad (1.4)$$

$$h_h = k \, Nu / L_{\text{hava}} \quad (1.5)$$

Denklem (1.4) ve Denklem (1.5)'de $H(m)$ ara boşluk yüksekliği, $L_{\text{hava}} (m)$ ara boşluk kalınlığı, $h_h (W/mK)$ havanın ısı taşıyım katsayısı ve Nu Nuseelt sayısını ifade etmektedir.

Isı geçişinin optimum değeri (Q_{opt}) Denklem (1.6)'da, toplam ısıl iletkenlik katsayısı (k_T) Denklem (1.7)'de ve gaz dolgusuna kadar olan optimum toplam ısı transferi (Q_{T1}) Denklem (1.8)'de gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{\text{opt}} = k_T A_{\text{pencere}} (T_1 - T_2) \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{k_T} = \frac{1}{h_{\text{iç}}} + \frac{l_{\text{cam}}}{k_{\text{cam}}} + \frac{l_{\text{hava}}}{k_{\text{hava}}} + \frac{l_{\text{cam}}}{k_{\text{cam}}} + \frac{1}{h_{\text{dış}}} \quad (1.7)$$

$$\dot{Q}_{T1} = \dot{Q}_{\text{opt}} + \dot{Q}_{\text{ışınım}} \quad (1.8)$$

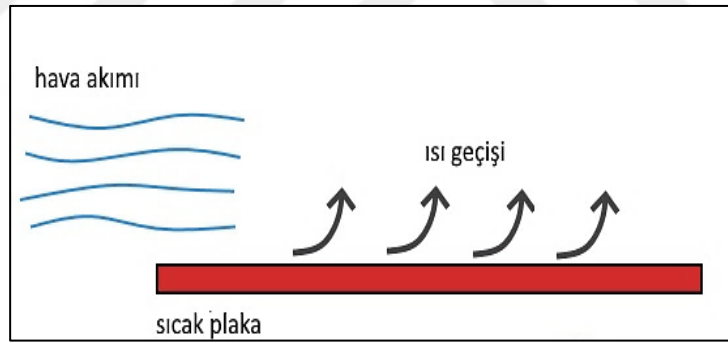
Denklem (1.6), Denklem (1.7), Denklem (1.8)'de $k_t (W/m^2K)$ toplam ısı geçişi katsayısı, A_{pencere} pencere yüzey alanı, $h_{\text{iç}} (W/mK)$ iç ortam ısı taşıyım katsayısı, $h_{\text{dış}}$

(W/mK) dış ortam ısı taşınım katsayısı, k_{hava} (W/m²K) havanın ısı geçişi katsayısı, k_{cam} (W/m²K) camın ısı geçişi katsayısı, l_{cam} (m) camın uzunluğu, l_{hava} (m) hava tabakasının uzunluğunu ifade etmektedir. Optimum gaz dolgusu hesaplamalarında gaz dolgusu adeta katı bir cisim gibi hareket edeceğinden iletim yoluyla ısı transferi gerçekleşir.

Birden fazla gaz dolgusu olan penceredeki ısı transferi ($\dot{Q}_A$) Denklem (1.7)'de, toplam ısı transfer katsayısı (k_{T2}), optimum gaz dolgusu sayısı ve engel sayısına bağlı olarak Denklem (1.9)'da verilmiştir.

$$\dot{Q}_A = k_{T2} A_{\text{pencere}} (T_{iç} - T_{dış}) \quad (1.9)$$

Bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise, ısı transferi taşınım ile gerçekleşir. Şekil 1.6'da taşınım ile olan ısı transferi olayının gerçekleşmesi verilmiştir.



Şekil 1.6. Taşınım yoluyla ısı transferi

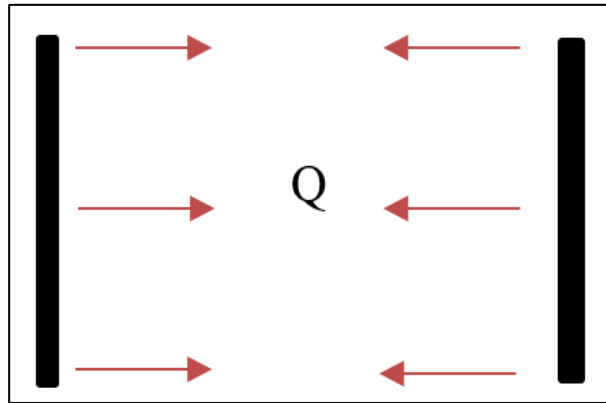
Taşınım ile ısı geçişi, iki mekanizmadan oluşmaktadır. Rastgele moleküllerin hareketleri (yayılım) sonucunda enerji aktarımının yanı sıra, akışkanın kitle veya makroskopik hareketi ile de enerji aktarımı olur. Bu akışkan hareketi herhangi bir anda, çok sayıda molekülün, topluca veya kümelenmiş olarak hareket etmesi ile ilgilidir. Küme içindeki moleküller, hareketlerini korudukları için, toplam ısı geçişi, moleküllerin hareketleriyle ve akışkanın kitle hareketiyle oluşan enerji aktarımlarının bir toplamıdır. Bu toplam aktarıma taşınım denir. Akışkanın kitle hareketi ile oluşan aktarıma ise adveksiyon denir. Bu çalışmada hareket halindeki bir akışkan ile onu çevreleyen yüzey arasında sıcaklık farkı olduğu zaman gerçekleşen taşınım ile ısı

geçişinden de yararlanılmıştır. Taşınım ile gerçekleşen ısı geçişi, akışın türüne göre sınıflandırılabilir. Akış, bir fan, bir pompa veya atmosferik rüzgârlar gibi bir dış etki ile oluşuyorsa orada zorlanmış taşınım söz konusudur. Buna karşılık, doğal taşınım da akış, akışkan içindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farklarından kaynaklanan kaldırma kuvvetleriyle ilişkilidir. Taşınımın üçüncü çeşidi ise zorlanmış ve doğal taşınımın birlikte yer aldığı bileşik taşınımdır (Özrahat, 2007). Bu durum Newton'un soğutma yasasıyla açıklanmaktadır. Isı taşınımının katsayısı h sembolü ile gösterilmektedir. h değeri yüzeyin özeliğine, akışkanda oluşan hareketin türüne ve akışkanın termodinamik niteliklerine göre Denklem (1.10)'daki belirlenen sınır koşullara bağlıdır.

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (1.10)$$

Denklem (1.10), taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferinin tüm çeşitleri için geçerlidir. Burada, taşınım ile oluşan ısı akısı q (W/m^2), akışkan ve yüzey sıcaklıklarının arasında oluşan fark ($T_s - T_\infty$) ile doğru orantılıdır.

Farklı sıcaklıklardaki iki yüzey arasında ısı transferi ışıınım ile gerçekleşir. Şekil 1.7'de ışıınım ile olan ısı transferi olayının gerçekleşmesi verilmiştir.



Şekil 1.7. Işıınım yoluyla ısı transferi

Bileşik ısı transferi, katılar ve sıvılar arasındaki ısı iletiminden dolayı, katılar ve sıvılar içindeki sıcaklıkların değişimlerini tanımlamak için kullanılır. Hava akışına bırakılmış bir katı nesnenin ısıtılması ya da soğutulması bileşik ısı transferine verilebilecek genel bir örnektir. Bileşik ısı transferi analizi için iletim ve taşınım ile olan ısı transferinin

birlikte analiz edilmesi gerekir. Akışkan ve katı ara yüzeyinde ısı akısı ve sıcaklıklarda süreklilik şartları sağlanmalıdır. Bileşik ısı transferinin gündelik hayatta da birçok alanda gerçekleştiği görülmektedir. Taşınım ve iletim birlikte gerçekleştiği birçok farklı durum olmakla birlikte, en sık karşılaşılan uygulamalardan birisi de ısı değiştiricilerdir. Isı değiştiricilerinin boru duvarında iletimle ısı geçişi gerçekleşmektedir. Üzerinde akan akışkandan kaynaklı da taşınım ile ısı geçişi meydana gelmektedir. (Özrahat, 2007).

Bir binadaki bileşik ısıtma yükü ölçülürken iletim ile gerçekleşen ısı kayıpları ve hava sızıntısıyla meydana gelen ısı kayıpları toplanır. Toplama işleminden çıkan sonuçtan, güneşten doğan saatlik ısı kazançları ve iç ortamdaki ısı kazançlarından çıkartılarak ısıtma yükünün yıllık değeri hesaplanır. Böylelikle insanlardan, güneşten, aydınlatmadan vb. ekipmanlardan araç gereçlerden gelen ısı kazanç olarak ısıtma enerjisi de hesaplanır. Isı kayıpları ise Denklem (1.11) ve Denklem (1.12)'den hesaplanmaktadır.

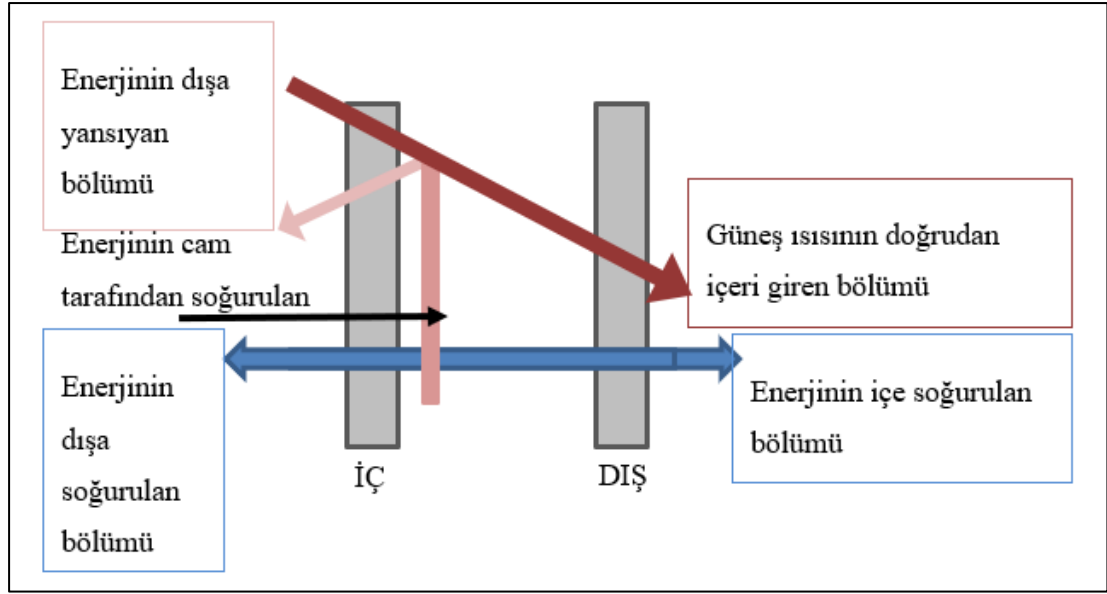
$$\dot{Q}_{\text{iletim}} = U A \Delta T \quad (1.11)$$

$$\dot{Q}_{\text{sızıntı}} = 1.2 V \Delta T \text{ (kW)} \quad (1.12)$$

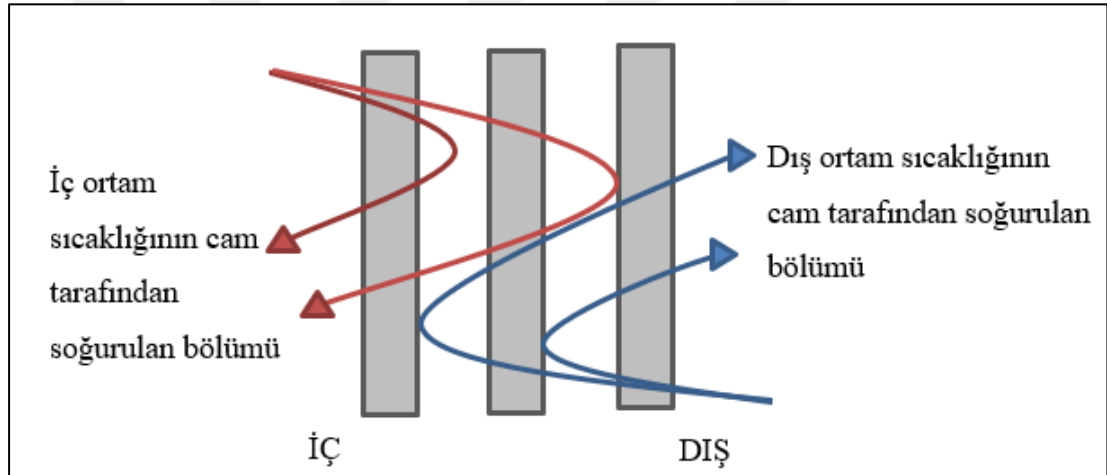
Denklem 11 ve 12'de $\dot{Q}_{\text{iletim}}$ iletim ile gerçekleşen ısı kayıplarının bileşkesi, $\dot{Q}_{\text{sızıntı}}$ hava sızıntısıyla meydana gelen ısı kayıplarının bileşkesi, U (W/m²K) ısıl Geçirgenlik katsayısı, V (m³/s) hava debisini ifade etmektedir.

Özetle ısı transferi radyasyon, iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı geçişlerinin toplamı olarak tanımlanır. Isı transferi ile gerçekleşen iletimi asgari düzeyde tutmak verimi arttıracaktır.

Taşınım ile olan geçiş azaltmak için akışkanın hareketinin azaltılması (yüksek viskozite), İletimle olan geçiş için λ değerinin daha düşük olduğu gazların, gaz dolgusunda kullanılması, ışınlama ile olan geçişin ise cam plaka yüzeyleri üzerinde düşük yayılım özelliğine sahip bir katman ile kaplanmasıyla azaltılabilir. Şekil 1.8'de çift katmanlı ve güneş kontrollü tabakaya sahip camların ısı hareketi, şekil 1.9'da ise üç katmanlı ve güneş kontrollü tabakaya sahip camların ısı hareketi verilmiştir.



Şekil 1.8. Çift katman ve Güneş kontrollü camlarda ısı transfer hareketi



Şekil 1.9. Üç katman ve Güneş kontrollü camlarda ısı transfer hareketi

Konfor genel olarak, bireyin bulunduğu ortamla ilgili sorunu olmaması olarak adlandırılabilir. Bir odada bulunan hava, odadaki bireylerin kendisini daha hoş, iyi hissetmesini ayrıca çalışma verimini önemli derecede etkileyen bir unsurdur. Oda içindeki Hava belli bir orana geldiğinde insanlar kendisini daha iyi, daha konforlu hissettikleri görülmüştür. Buna “konfor aralığı” denmektedir. İç ortam hava sıcaklığı, çevre ortamlardaki yüzeylerin sıcaklığı, havanın hızı ve havanın nemiyle konfor aralığı belirlenmektedir. Oda sıcaklığı ise normal giyimli ve herhangi bir fiziksel performans göstermeden oturan kişi için en kabul edilebilir oda hava sıcaklığı kışın 20–21 °C, yazın ise (dış sıcaklık ortalama 24 °C varsayılarak) 21–22 °C’dir. Yazın havaların ısınıp sıcaklığın artmasıyla bireyler daha ince kıyafetler giymeyi tercih etmektedir.

Vücut sıcaklığı stabil kaldığından, çevreye aynı miktardaki ısı yayılması esas alındığında, çevre sıcaklığı daha yüksek olabilmektedir (Oğan, 2008).

Bir odanın çevre yüzeylerinin (duvarlar, kapılar, pencereler, tavan, zemin) sıcaklıkları genelde insan vücut yüzey sıcaklığından düşük olduğunda, oda konforsuz olarak algılanır. Konfor koşullarının sürekliliğini, en ekonomik ve en verimli şekilde sağlamak için ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma gibi bina enerji sistemlerinin optimum koşullarda olması gerekir (Oğan, 2008).



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Enerji, dünya ekonomisine ve siyasi politakalara 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.

Hooper (1973), meydana getirdiği çalışmada lamine cam kırışların davranışını ele alarak lamine camlarla alakalı ilk çalışmayı literatüre kazandırmıştır. Lamine camların karmaşık mekanik davranış göstermesi sebebiyle gerçekleştirilen araştırmaların geneli deneysel nitelik taşımaktadır.

Doğrusal olmayan davranış sebebiyle eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmenin ardından da düzlem kalırlar varsayımı lamine camlar için geçerliliğini yitirmiştir. Bu sebep ile alan yazısında mevcut bulunan kuramlar yerine yeni ve gerçeğe daha yakın neticeler verecek yeni bir modele gereksinim hissedilmiştir. Lamine cam birimlerin doğrusal olmayan davranışı Vallabhan vd. (1993), tarafından geliştirilmiştir.

Geçtiğimiz yıllarda alanında uzman pek çok kişi nümerik metotlar kullanmak sureti ile lamine camın davranışını modelledikleri görülmektedir. Vallabhan vd. (1993), en alt seviye potansiyel enerji teoremi ve varyasyonel yöntemler kullanmak sureti ile matematiksel model meydana getirmişlerdir.

Edel (1997), meydana getirdiği çalışmasında çok katmanlı camların geçiş sıcaklıklarıyla alakalı e nokta eğilme deneyleri gerçekleştirmiş ve ulaştığı neticeleri geliştirdiği sonlu elemanlar model sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Deney ve meydana getirilen model neticelerinden lamine camın davranışının geçiş sıcaklığının altında camın davranışına yakın iken geçiş sıcaklığının üstünde tabakalı camın davranışına yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Konuya binalar üzerinden yaklaşılsa, camlardan ısımayla oluşan ısı transferi gayet yüksek miktarlarda olduğu görülmüştür. Bu durum, konu kapsamında araştırmaları bulunan uzmanların dikkatini çekmiştir. Mevsim doğrultusunda güneş ışınlamına 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 (2003), lamine cam plakların doğrusal olmayan davranışı daha az hesaplama alanına ve zamanına gereksinim olacak biçimde çözümlemiştir. 1914'den bu yana otomotiv sanayisinde kullanılan çok katmanlı camların düzen ve güven nitelikleri sebebi ile bugün sürekli olarak çoğalan bir biçimde mimari ve yapı sanayilerinde kullanımına rastlanılmaktadır.

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 kirişlerin mekanik davranışlarını ele almak doğrultusunda pek çok çalışmanın yapıldığı görülmektedir (Aşık vd., 2014).

Çok katmanlı camlar hakkındaki deneysel çalışmalar için örnek vermek gerekir ise; Foraboschi (2013), tabakalı plakların mekanik davranışını açıklamak üzere geliştirmiş olduğu modelin literatürde oldukça önemli bir yeri bulunmaktadır. Yine Forabosch

(2014), üç katmanlı sandviç plakların davranışlarıyla az hesaplama vaktine gereksinim hiseden bir model meydana getirmiştir.

Arıcı vd. (2015), bu çalışmada iki üç ve dört katmanlı cam uygulamalarındaki ısı akışı üzerinde durulmuştur. Araştırmalar altı farklı gaz dolgusu kalınlığı ve dört farklı bölgenin dış ortam sıcakları 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 olacağının 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.

Tarihsel süreç içerisinde camın birçok tanımına rastlanılmaktadır. Kimi zaman pencere formunda, kimi zaman ise bardak gibi bir obje halinde görüldüğüne rastlanılmaktadır.

Karasu vd. (2017), yaptıkları çalışmada, camın bilimsel olarak, atomik ölçüde kristal olmayan, ısıtıldığında camsı geçiş gösteren tüm katı maddeler şeklinde tanımlanması gerektiğini belirtmektedir. Teknolojide meydana gelen gelişmelerle birlikte her alanda kullanılan çok katmanlı camların üst düzey güvenlik ve emniyet nizamları sebebiyle sürekli olarak artan bir şekilde mimari, havacılık, otomobil ve uçak endüstrisinde kullanıldıkları da görülmektedir. Cam tabakaları birbirine bağlayan elastomerik PVB ara tabaka yalnızca tabakaları bir arada tutmak ile kalmayarak bunun yanında ısı, ses yalıtımı sağlamaya, güneş ısı kazancına ve ultraviyole ışınları soğurmaya yardımcı olmaktadır. Kırılmalar meydana gelse dahi PVB ara tabaka cam parçaları bir arada tutup parçalanıp, dağılmasının önüne geçerek ölüm ve yaralanmaların engellenmesi sağlamaktadır. Çok katmanlı camlar bu özellikleri sebebiyle aynı zamanda deprem ve kasırgalara karşı muhafaza etme görevi de üstlenmekte ve büyük binaların ön cephelelerinde, otobüs yan camlarında, otobüs duraklarında, deprem bölgelerindeki binalarda yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Camların kullanılmasındaki en mühim sebep kuşkusuz emniyetli olmalarından kaynaklanmaktadır. Bahsi geçen sebeplerden ötürü araştırmacılar, ortalama kırk yıldır çok katmanlı cam yapıların davranışı üzerine araştırmalar yürütmektedirler. Matematiksel karmaşıkları sebebiyle meydana getirilen çalışmaların genelinde çok katmanlı camların doğrusal olmayan davranışları yerine doğrusal davranışları ele alınmıştır.

Pencere camlarının çift ve üçlü cam olarak kullanılmasının yalıtıma katkısı yüksek olacaktır. Günümüzde cam üniteleri çift cam ve üçlü cam olarak üretilmektedir. Düz çift cam üniteleri, yerini ısı kontrol kaplamalı ve ısı-güneş kontrol kaplamalı çift veya üçlü cam ünitelerine bırakmaktadır. Isı ve güneş kontrol kaplamalı cam üniteleri kullanımı ile de ısı kayıpları, standart çift cam ünitelere kıyasla %50 oranında azalmaktadır (Özrahat, 2007).

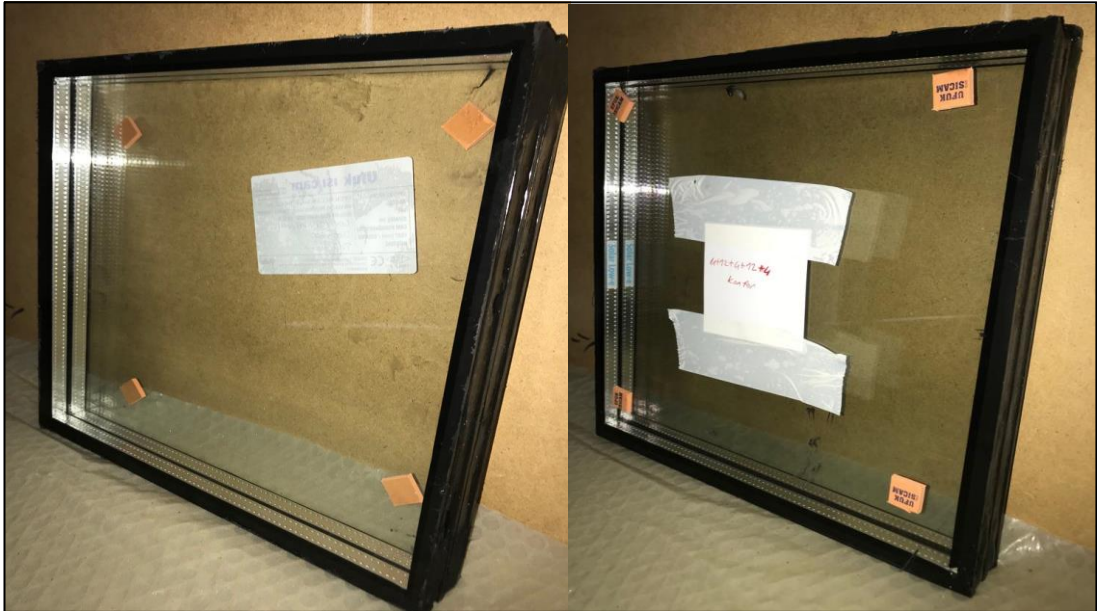
Kaplamalı camlarla ısı yalıtımının yanı sıra, güneş kontrolü de sağlanabilmektedir. Kış aylarında bina ısısının dışarıya kaçışı yavaşlatılırken, yazın da güneş enerjisinin bina içine girişi azaltılmakta, böylece iç ortamın ısınması geciktirilmektedir. Bu türdeki kaplamalı camlarla oluşturulan yalıtım camı ünitelerinin kullanımıyla, kışın ısıtma giderlerinden, yazın ise klima kullanılan ortamlarda elektrik giderlerinden tasarruf sağlanmaktadır. Güneş kontrol camları ile Low-E ısı kontrol kaplamalarının birlikte kullanıldığı yalıtım camı üniteleri veya güneş ve ısı kontrol özelliklerini tek bir kaplamada toplayan ünitelerle bu ihtiyaca yönelik çözüm sağlanabilir. Özellikle Akdeniz ve Ege kıyıları gibi yaz mevsiminin uzun ve sıcak olduğu bölgelerde konutlar ve işyerlerinde klima kullanımı çok yaygın olduğundan buralarda pencerelere takılacak güneş kontrol camları soğutma enerjisi tüketimini düşürecek, aynı zamanda ülke düzeyinde enerji tasarrufuna katkı sağlayacaktır. Güneş kontrolünde, güneş enerjisi toplam geçirgenlik yüzdesi belirleyicidir. Bu değer 300 eğimle geldiği kabul edilen toplam güneş enerjisinin içeriye etkiyen yüzdesidir. Toplam güneş enerjisi geçirgenliğinin yüksek olması kötü güneş kontrolü, düşük olması ise iyi güneş kontrolü, yani daha verimli, rahat çalışma ve yaşama ortamı, soğutma için daha küçük çaplı bir tesisat ve daha az elektrik enerjisi demektir. Bilindiği gibi, soğutma için harcanan enerji ısıtma için harcanan enerjiden ortalama 3-4 kat daha pahalıdır (Anonim, 2015).

Dylewski ve Adamczyk (2018), ısıtma için harcanan maliyetin ekolojik ve ekonomik olarak özelliklerine bakmıştır. İdeal yalıtım kalınlığı hesaplanırken sadece ekonomik özelliklerine bakılmaması gerektiğini aynı zamanda da ekolojik özelliklerine de bakılması gerektiğini belirtmiştir. Isıtma için kullanılan kaynakların ve yalıtım amaçlı kullanılan malzemelerin Yaşam döngüsünün analizi yapılırken (LCA) çevreye olan zarar veya yararlarını da araştırılmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda ekolojik sebeplerin, ekonomik nedenlerden daha çok önem arz ettiği ve yatırımların ekolojik etkenlere göre yapılması gerektiğini ortaya koymuştur.

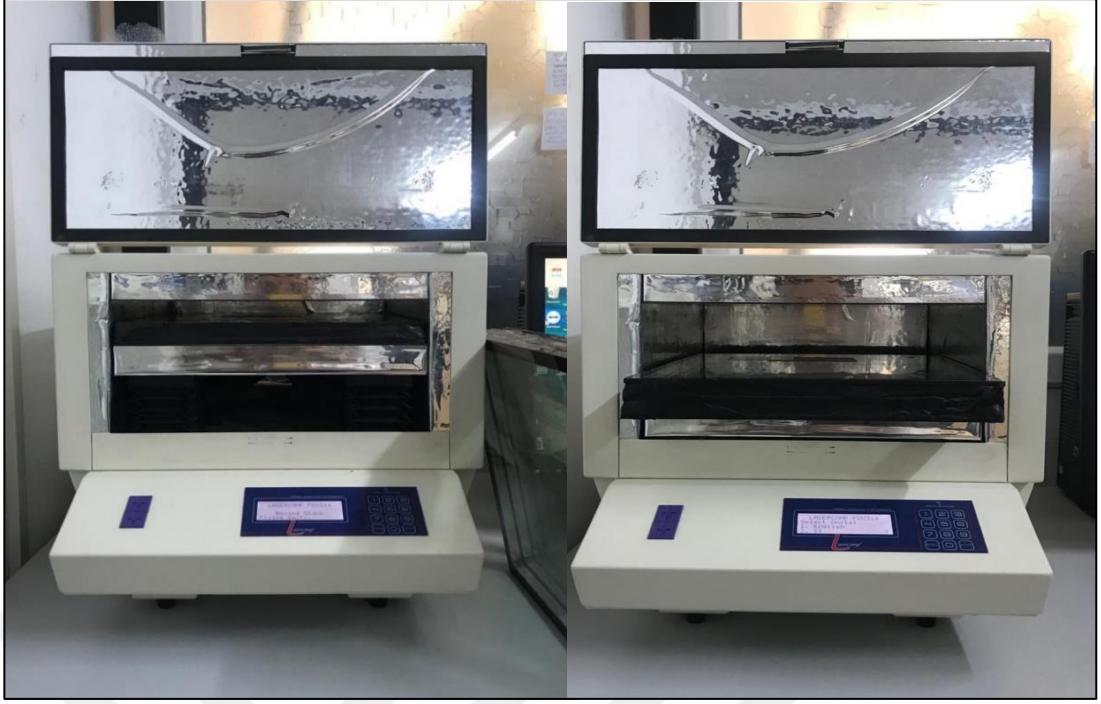
Yukarıdaki özetlenen çalışmalarda görüleceği üzere, Isparta ili için cam uygulamalarında argon (Ar) veya kuru hava gaz dolgularından, iki katmanlı veya üç katmanlı cam uygulamalarından, gaz dolgusu kalınlıklarından hangilerinin verimlilik konusunda daha iyi bir sonuç vereceği hususunda literatürde yapılmış bir çalışma yoktur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

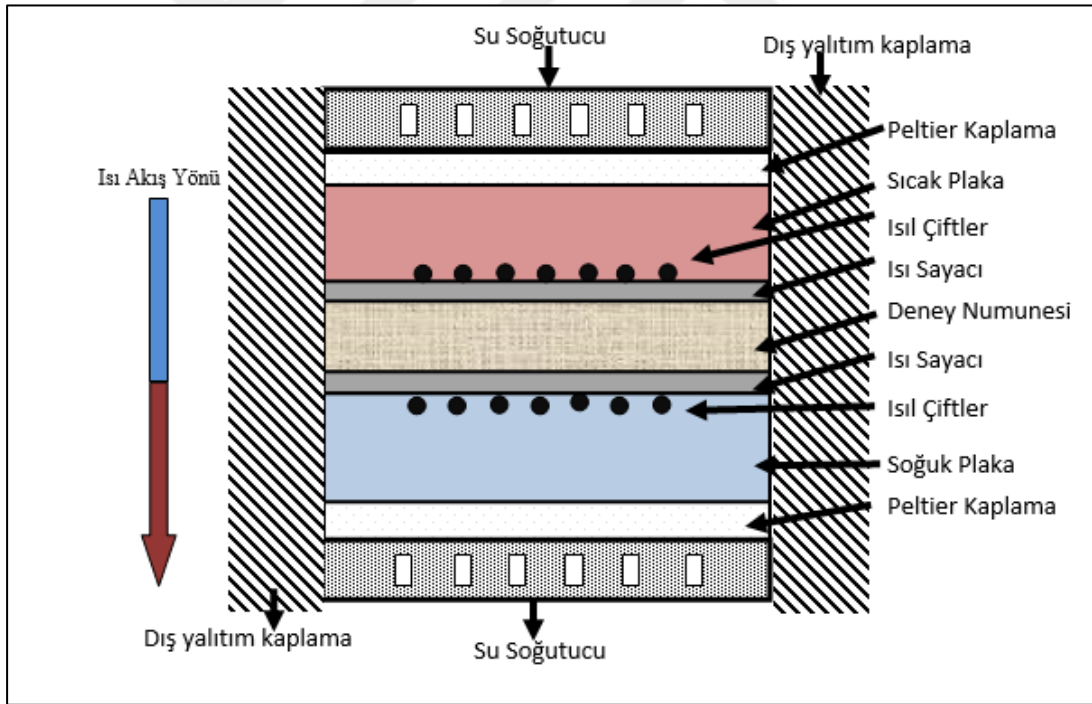
Bu tez çalışmasında çift ve üç katmanlı cam uygulamalarında gaz dolgusunun, gaz dolgu tabakasının kalınlığı ve cam kaplamasının toplam ısı transferine olan etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Şekil 3.1’de üç katmanlı cam numune örneklerini verilmiştir. Isparta ili için optimum cam katman sayısı, gaz dolgusu kalınlığı ve cam kaplama türlerinden hangisinin daha iyi bir yalıtım performansı unsuru olduğu da belirlenmiştir. 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 (6, 9, 11, 12, 14 ve 16 mm) gaz katmanları, argon gazı ve kuru hava gaz dolgularıyla ve farklı kaplamalarla yapılan cam plakalar (klasik ısıcam, konfor ısıcam) için boyutları 300x300mm² olan cam numunelerle yapılmıştır. Deneysel hesaplamalarda ısı iletkenlik katsayıları ölçümü için ts EN 12667’ye uygun olarak katman sayısı, gaz dolgusu kalınlığına ve cam kaplama özelliğine bağlı ısı iletkenlik katsayıları TSE 825’e göre belirtilen şartlara uygun ölçüm yapan Şekil 3.2’de de görülen Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Ölçüm cihazı ısı iletkenlik katsayısını ısı akış ölçer (IAÖ) yöntemini kullanarak belirlemektedir.



Şekil 3.1. Çok katmanlı cam numune örnekleri



Şekil 3.2. Isıl iletkenlik katsayısı ölçen cihaz



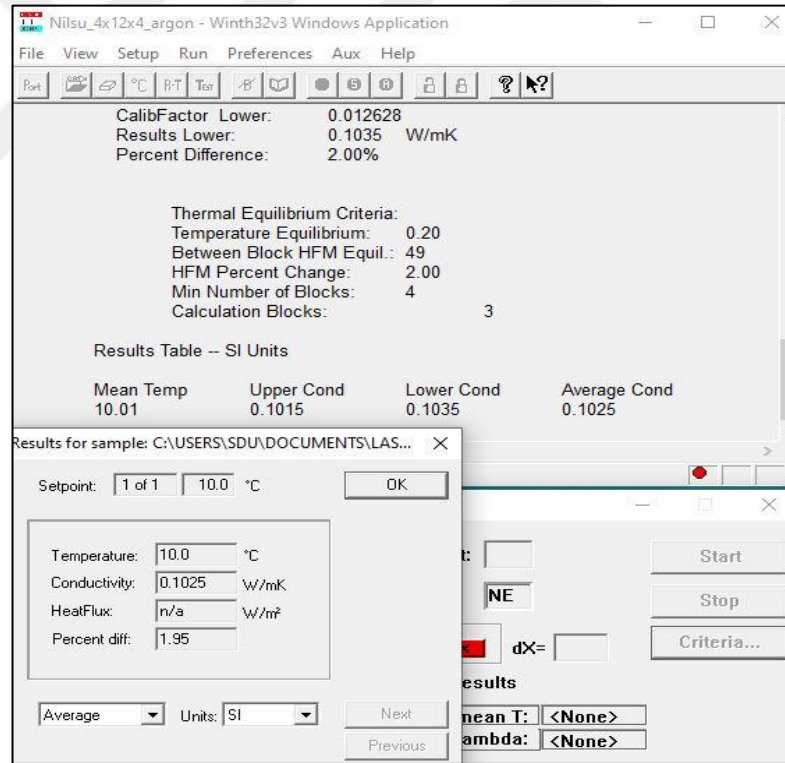
Şekil 3.3. Isı akış ölçer şematik diyagramı

Şekil 3.3’de Isı akış ölçerin şematik diyagramı verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi Isı 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 Denklem (3.1)'deki denklem ile belirlenmektedir.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1)$$

IAÖ bu denklemi ve kalibre edilmiş bilgisayar yazılımını kullanarak ölçüm, kayıt, yazdırma işlemini gerçekleştirmektedir. Örneğin Şekil 3.4. iki katmanlı argon gazlı cam deney numunesinin ısı akış ölçer cihazı ile ısı iletkenlik katsayısı Fourier ısı iletim denkleminin kullanarak ve kalibre edilmiş bilgisayar yazılımını kullanarak ölçüm, kayıt, yazdırma işleminin ölçüm sonucu verilmiştir.



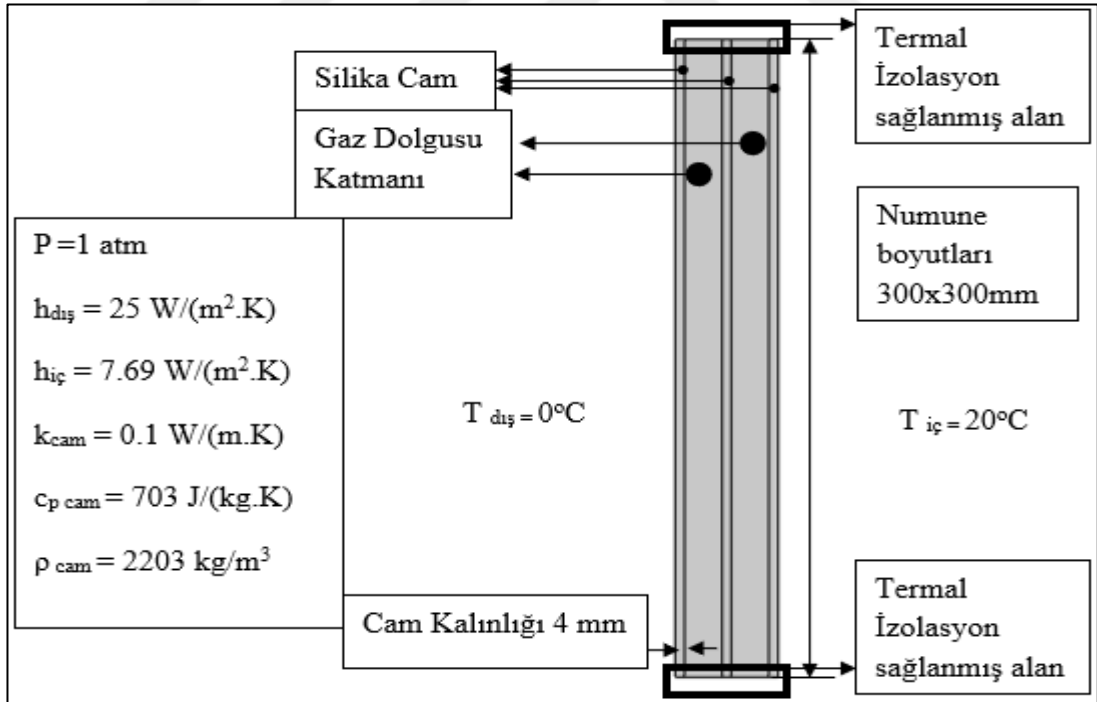
Şekil 3.4. İki katmanlı argon gazlı cam numunesi ölçüm sonucu

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

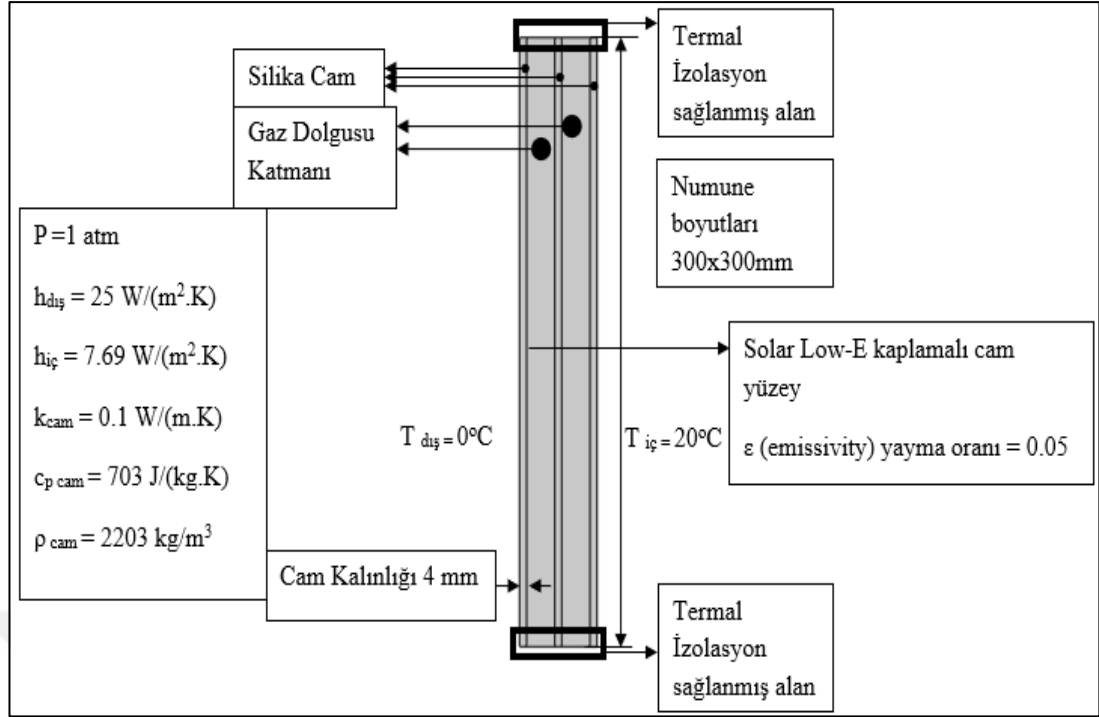
tekrarlanabilirliği test edilmiştir. Deneyler farklı kalınlık, gaz dolgusu, katman sayısı ve dış kaplama özelliklerine göre k değerlerinin belirlenmesine yönelik yapılmıştır.

Hesaplamalarda Isparta ili için dış hava sıcaklıkları TS 825'e göre baz alınıp, 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/ ışınlımla olan ısı transferi denklemleri uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçların karşılaştırılması 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. Şekil 3.5 ve 3.6'da klasik ve Solar Low-e kaplamalı camlar için Comsol multiphysics programında kullanılan değerler verilmektedir.

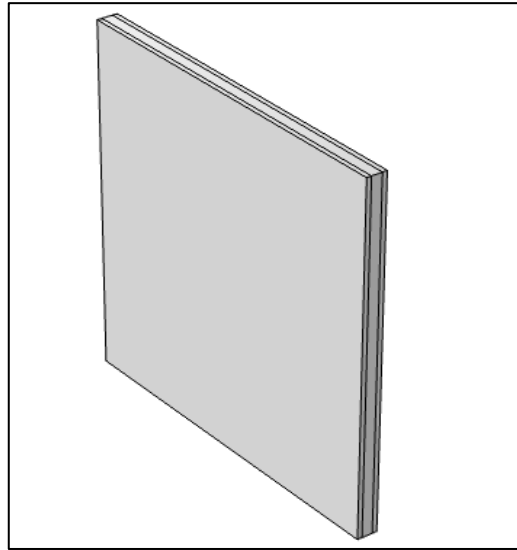


Şekil 3.5. Klasik cam değerleri



Şekil 3.6. Solar Low-E kaplamalı cam değerleri

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. Öncelikle, Şekil 3.7’de verilen 3D çift cam ve üç cam geometrisi program ara yüzü kullanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.7. 3D çift katmanlı cam çizimi

Daha sonra sırasıyla cam ve hava tabakası kalınlıkları, kullanılan cam türüne göre ısı iletkenlik katsayıları, hava tabakası ısı iletkenlik katsayıları, iç ve dış yüzeyler için taşınım ısı transfer katsayıları, kuru hava dolgusu ısı iletkenlik katsayısı veya argon dolgusu ısı iletkenlik katsayısı sınır şartları olarak belirlenmiştir. Program ara yüzü aracılığıyla model ağ yapısına bölünmüş ve hesaplamalar için hazırlanmıştır.

Yapılan bu tasarım için Şekil 3.8’de verilen ağ yapısına göre CFD analizleri laminar akış davranışı ve Sonlu hacimler metoduna dayanan bu yöntemde Comsol Multiphysics simülasyon programı kullanılmaktadır. Programlardan alınan ağ yapısı dosyalarına sınır şartları ve parametreler uygulanarak sistemin çözümü yapılmaktadır. Sayısal çalışmada, üç boyutlu ve zamana bağlı kütlenin korunumu, momentum ve enerji denklemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmektedir.

Dış ortamla temas halinde olan cam yüzeyin taşınım ile olan ısı transferini hesaplamak için Denklem (3.2) kullanılmıştır.

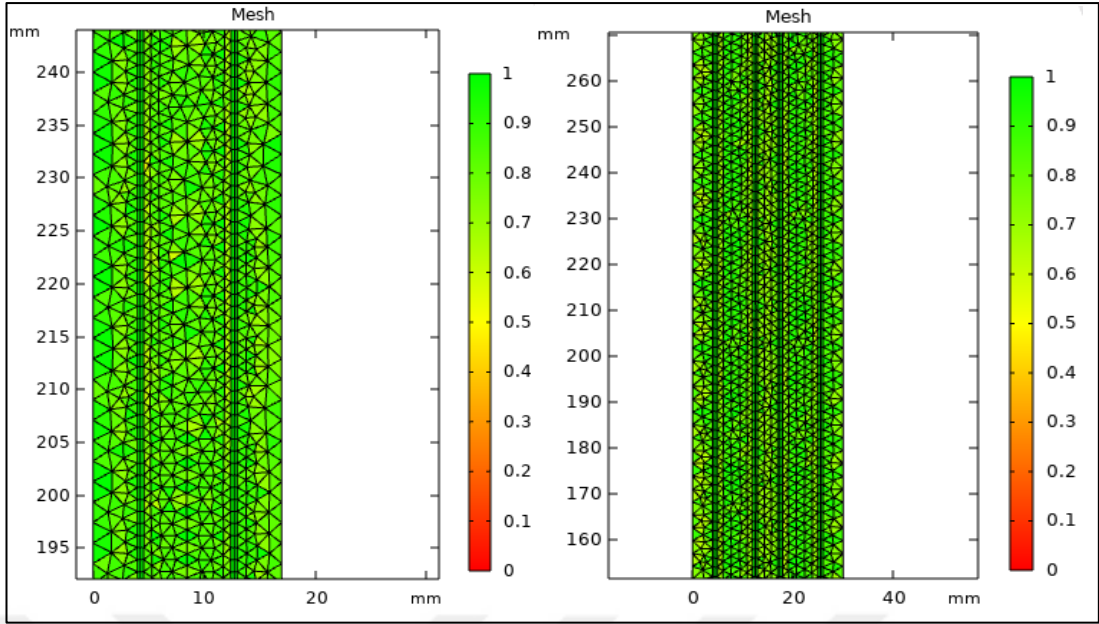
$$q = h \cdot (T_{\text{ext}} - T) \quad (3.2)$$

Bu denklemde T_{ext} ortam sıcaklığıdır ve bu değer dış ortamla temas halinde olan yüzey için 0°C olarak seçilirken $h(\text{W/m}^2\text{K})$ ısı taşınım katsayısı $25 (\text{W/m}^2\text{K})$ seçilmiştir. İç ortamla temas halinde olan yüzey için $T_{\text{ext}} 20^\circ\text{C}$ olarak seçilirken $h(\text{W/m}^2\text{K})$ ısı taşınım katsayısı $7.69 (\text{W/m}^2\text{K})$ seçilmiştir.

Kaplama yapılan yüzeyler için Denklem (3.3) kullanılmıştır.

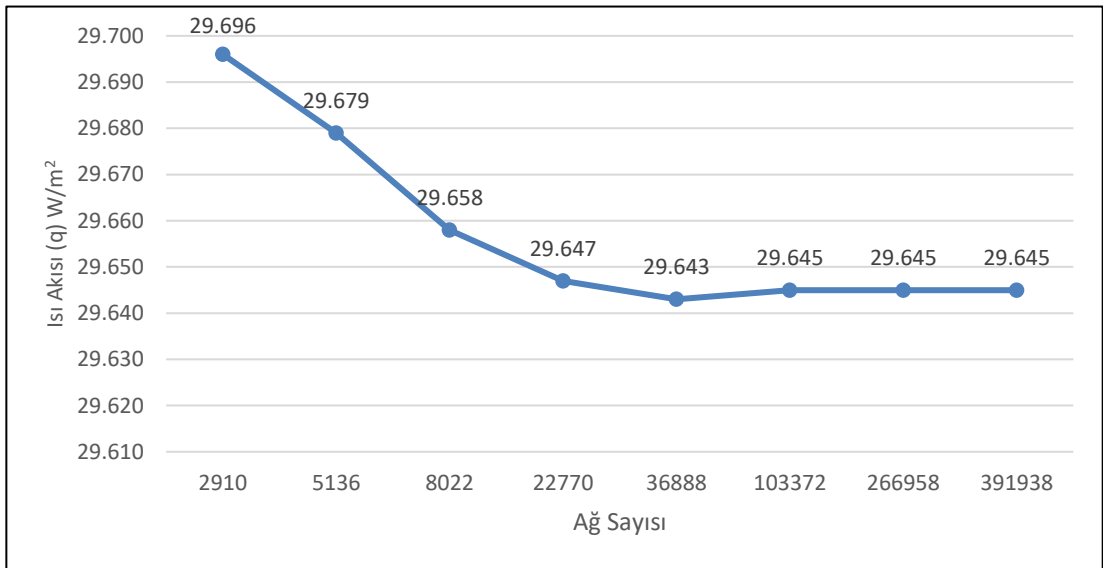
$$Q_{\text{ışınım}} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (3.3)$$

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 alınmıştır.



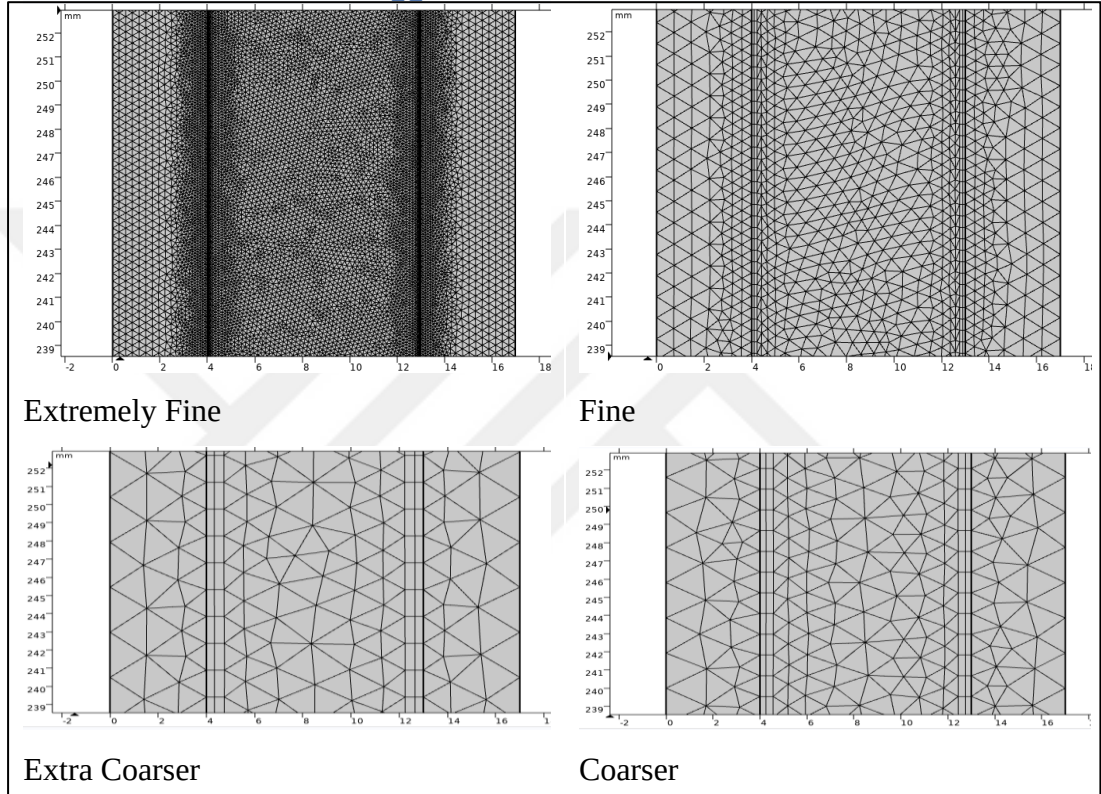
Şekil 3.8. İki katmanlı ve üç katmanlı camların ağ yapısı

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 çözümlemede ağ sayısı artmasına rağmen sonuç belli bir değerden sonra değişmiyorsa, çözümlemede ağdan bağımsızlık elde edilmektedir.

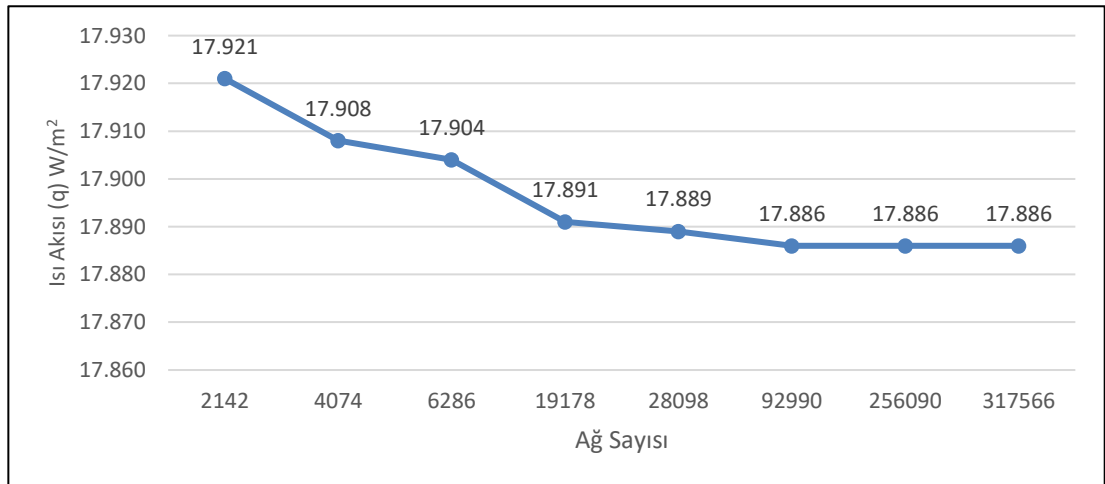


Şekil 3.9. İki katmanlı argon gazlı klasik cam ağ bağımsızlık test grafiği

Çift katmanlı camlar için yapılan Ağ bağımsızlık testleri 8 farklı (Extremely Fine, Extra Fine, Fine, Finer, Normal, Coarser, Extra Coarser, Extremely Coarser. Şekil 3.10’da Extremely Fine, Fine, Coarser, Extra Coarser mesh yapılarına yer verilmiştir.) ağ yapılarıyla yapılmıştır. Şekil 3.9’da görüleceği üzere 103372 adet ağ sayısından sonra yapılan çözümlemelerde W/m^2 değerinde değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden çift katmanlı cam uygulamalarında ağ eleman sayısı 103372 olarak seçilmiştir.



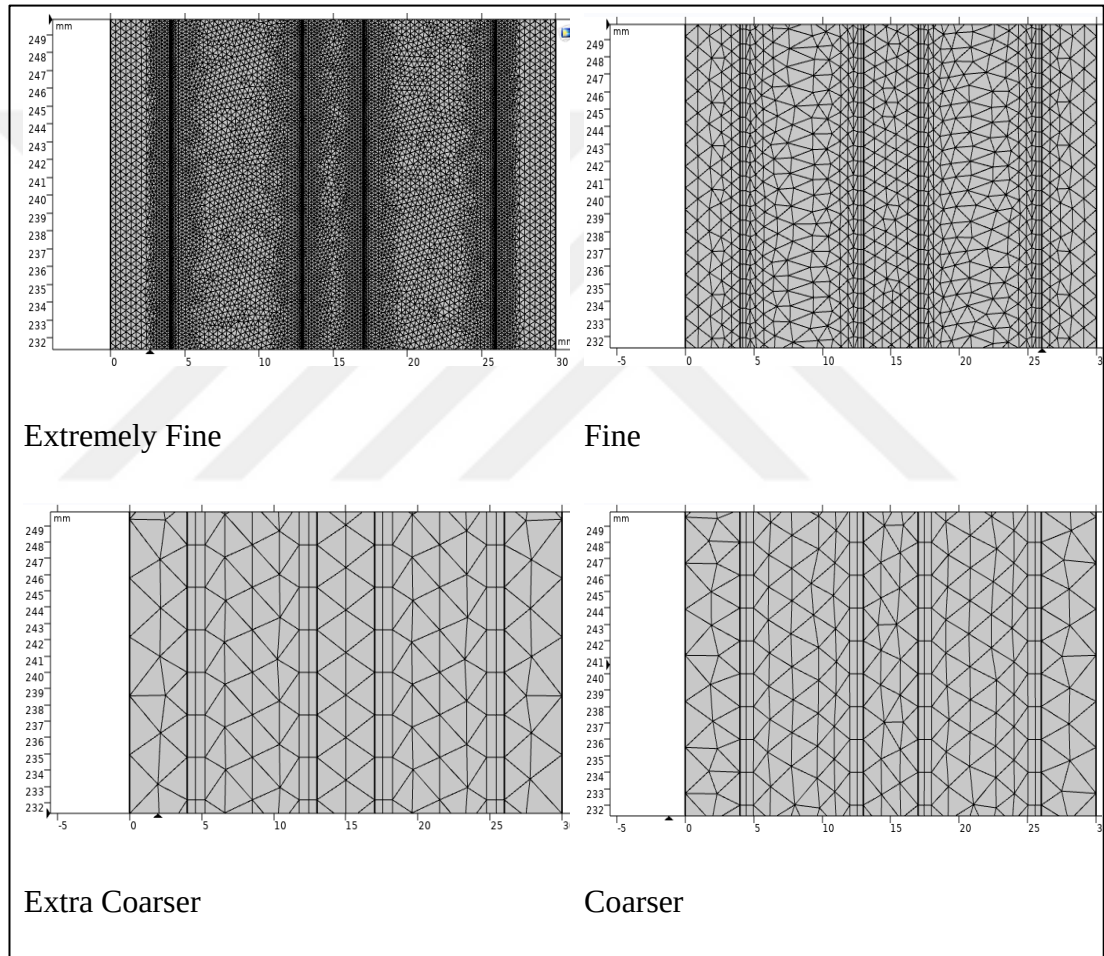
Şekil 3.10. Örnek Mesh Ağ Görünümleri



Şekil 3.11. Üç katmanlı argon gazlı klasik cam ağ bağımsızlık test grafiği

Şekil 3.11’de görüleceği üzere 92990 adet ağ sayısından sonra yapılan çözümlemelerde W/m^2 değerinde değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden Üç katmanlı cam uygulamalarında ağ eleman sayısı 92990 olarak seçilmiştir.

Üç katmanlı camlar için yapılan Ağ bağımsızlık testleri 8 farklı (Extremely Fine, Extra Fine, Fine, Finer, Normal, Coarser, Extra Coarser, Extremely Coarser. Şekil 3.12’de Extremely Fine, Fine, Coarser, Extra Coarser mesh yapılarına yer verilmiştir.) ağ yapılarıyla yapılmıştır.



Şekil 3.12. Örnek mesh ağ görünümleri

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

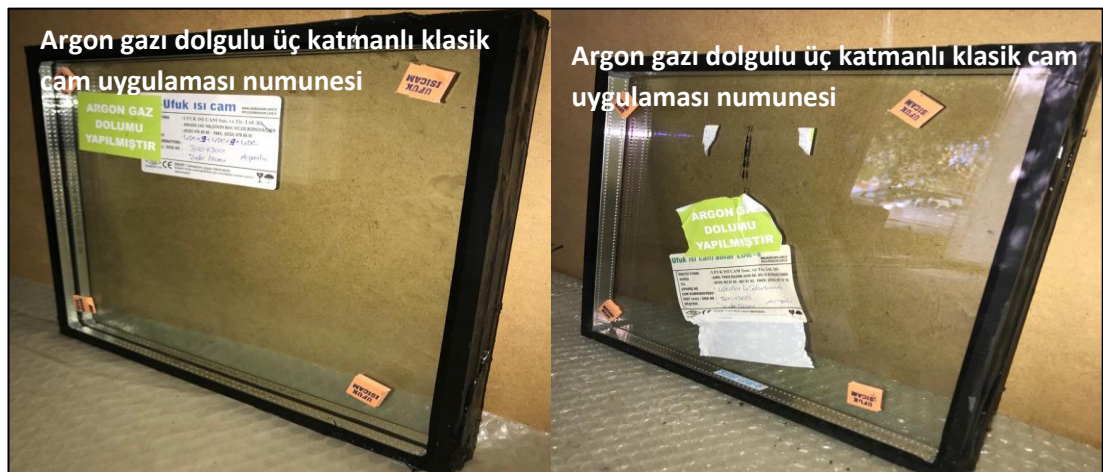
4.1. Isıl Performansın Farklı Parametrelere Bağlı Olarak Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Tüm sayısal hesaplamalarda olduğu gibi, bu çalışmada da bulunan değerin kabul edilir olabilmesi önemlidir. Literatürde sayısal değerleri doğrulamak için ele alınan model üzerinde deneysel bir çalışma da yapılması tercih edilen bir yöntemdir. Tercih edilen mesh yapısı, kullanılan eleman sayısı, seçilen Laminer akış modeli gibi pek çok parametre sayısal sonuçları etkileyecektir.

Bu çalışma esas itibarıyla bir doğal taşınım problemidir. Literatürde düşey yüzeylerden doğal taşınım ile meydana gelen ısı transferinin hesaplanabileceği deneysel çalışmalara dayanan pek çok denklem mevcuttur. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılacak mesh yapısı, eleman sayısı, türbülans modeli gibi etkili büyüklükler literatürdeki denklemler vasıtasıyla bir ön çalışma ile tespit edilebilir.

4.1.1. Farklı gaz dolgularının ısıl iletkenlik katsayısına etkisi

İki ve üç katmanlı cam uygulamaların farklı kalınlıklardaki hava boşluğuna argon ve kuru hava gazı doldurulmuş. Örneğin Şekil 4.1’de argon gazı dolgulu üç katmanlı klasik cam uygulaması numunesi ve argon gazı dolgulu iki katmanlı klasik cam uygulaması numunesi verilmiştir.



Şekil 4.1 Üç ve iki katmanlı argon gazlı camlar

Burada Comsol Multiphysics 5.6, Heat Transfer Modülü programından ve Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla elde edilen Isı Geçirgenlik katsayılarının hava dolgusu kalınlığıyla doğru orantılı olarak artan cam kalınlığı üzerine olan etkisi incelenip değerler karşılaştırılmıştır.

Yapılan numune cam uygulamalarında, çift katmanlı cam sistemleri için ara boşluk mesafesi 9, 11, 12, 14, 16 mm ve üç katmanlı cam sistemler için ise ara boşluk mesafesi 9, 12, 16 mm olarak belirlenmiş olup, gaz dolgusu olarakta gaz kütüphanesinde tanımlanmış kuru hava ve argon gazı kullanılmıştır. Ayrıca camı özelliği için de Comsol malzeme kütüphanesinden silica cam seçilmiştir.

Çizelge 4.1. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	HFM Fox-314 ile ölçülen k değeri	Comsol ile hesaplanan k değeri
4x9x4_Klasik argon	0.095	0.099
4x11x4_Klasik argon	0.102	0.101
4x12x4_Klasik argon	0.102	0.113
4x14x4_Klasik argon	0.108	0.118
4x16x4_Klasik argon	0.114	0.116

Çizelge 4.2. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	HFM Fox-314 ile ölçülen k değeri	Comsol ile hesaplanan k değeri
4x9x4_Klasik kuru hava	0.102	0.112
4x11x4_Klasik kuru hava	0.106	0.104
4x12x4_Klasik kuru hava	0.110	0.105
4x14x4_Klasik kuru hava	0.117	0.106
4x16x4_Klasik kuru hava	0.122	0.115

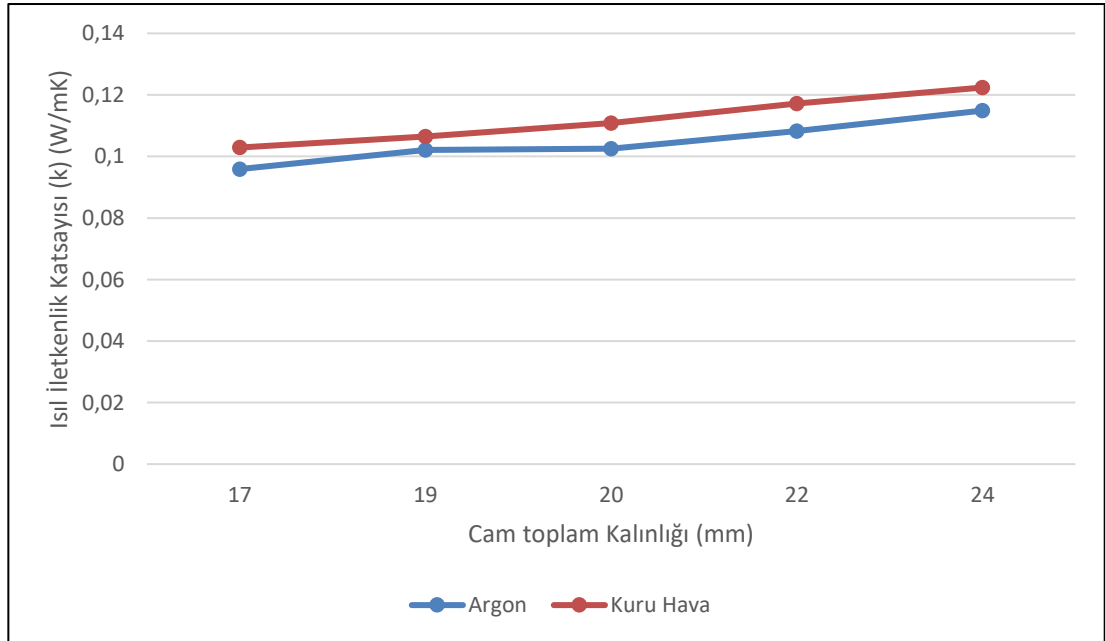
Çizelge 4.3. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	HFM Fox-314 ile ölçülen k değeri	Comsol ile hesaplanan k değeri
4x9x4x9x4_Klasik argon	0.087	0.085
4x12x4x12x4_Klasik argon	0.097	0.099
4x16x4x16x4_Klasik argon	0.113	0.104

Çizelge 4.4. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	HFM Fox-314 ile ölçülen k değeri	Comsol ile hesaplanan k değeri
4x9x4x9x4_Klasik kuru hava	0.095	0.097
4x12x4x12x4_Klasik kuru hava	0.106	0.099
4x16x4x16x4_Klasik kuru hava	0.119	0.01

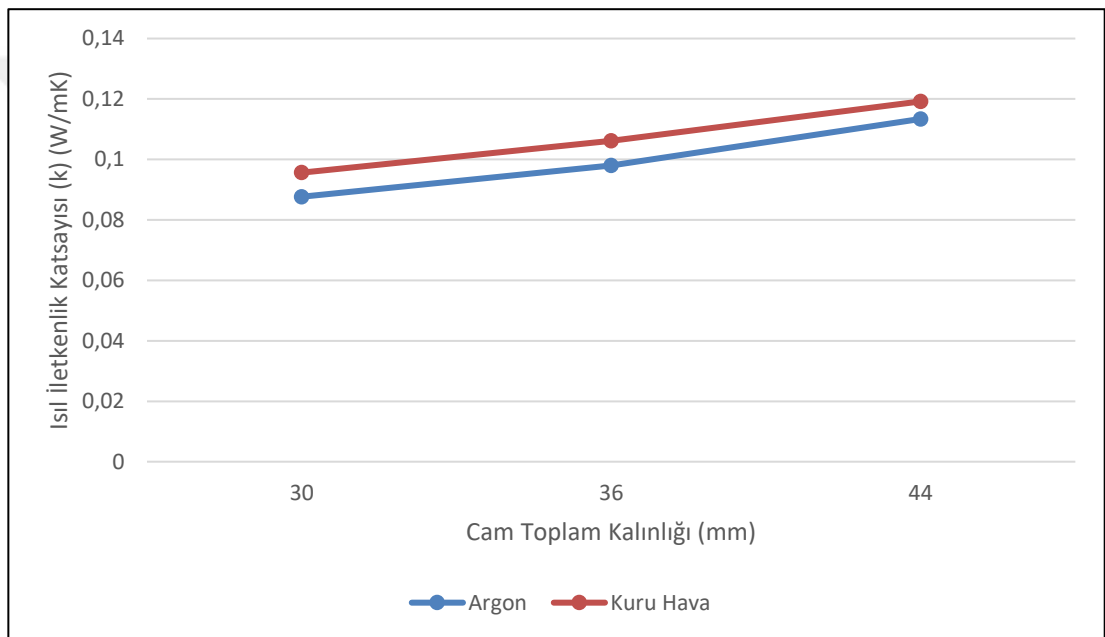
Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.2’de verilmiştir. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.3’de verilmiştir. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların k değerlerinin karşılaştırılması ise Çizelge 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de ise Çizelge 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4’de verilen değerlerin katman sayısı olarak baza alınıp hazırlanan grafiklerde gaz dolgularının ısı iletkenlik katsayısına etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.2. Kuru hava dolgulu ve argon dolgulu farklı kalınlıklardaki iki katmanlı klasik camların Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla elde k değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi iki katmanlı camlarda argon gazının k değeri kuru havaya göre daha düşük çıkmıştır. İki katmanlı camlarda kuru hava yerine argon kullanıldığında k değeri bazında verimlilik hesaplamaları yapıldığında;

- 9 mm hava dolgusuna sahip camlarda %6.8
- 11 mm hava dolgusuna sahip camlarda %4.13
- 12 mm hava dolgusuna sahip camlarda %7.57
- 14 mm hava dolgusuna sahip camlarda %7.6
- 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda ise %6.12 oranında daha iyi sonuç verildiği görülmüştür.



Şekil 4.3. Kuru hava dolgulu ve argon dolgulu farklı kalınlıklardaki üç katmanlı klasik camların Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazıyla elde k değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.3’e bakıldığında da üç katmanlı camlarda da argon gazının k değeri kuru havaya göre daha düşük çıktığı görülmüştür. Üç katmanlı camlarda kuru hava yerine argon kullanıldığında k değeri bazında verimlilik hesaplamaları yapıldığında;

- 9 mm hava dolgusuna sahip camlarda %8.42
- 12 mm hava dolgusuna sahip camlarda %8.5
- 16 mm hava dolgusuna sahip camlarda ise %5.04 oranında daha iyi sonuç verildiği görülmüştür.

Isıl iletkenlik katsayısı (k) bir materyalin ısı iletebilme özelliği gösteren fiziksel bir özelliktir. Bu değer yüksekse madde iyi bir iletken, düşükse iyi bir yalıtıcıdır demektir.

Şekil 4.2’ de iki katmanlı camlarda kuru hava dolgusunun argona kıyasla k değerinin daha fazla çıktığı Şekil 4.3’e bakıldığında üç katmanlı camlarda da argonun k değerinin kuru havaya göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Bu sonuçtan yola çıkılarak gaz dolgusunun kuru hava yerine argon ile doldurulması ısı yalıtımını artırmaktadır.

Gaz dolgusu argon gazı ile doldurulan cam uygulamalarında ısı yalıtımı özelliği en yüksek seviyelere çıkartılarak binalardaki yakıt, ısıtma veya soğutma giderleri azaltılmıştır. Normal çift cam veya ısıcamlarda boşluğa hava yerine argon gazı doldurulduğunda bina ısı yalıtımına %25 daha ek kazanç sağlamaktadır. Argon gazlı ısıcam; ikili ve üçlü camlardaki ara bölmelere argon gazının doldurulduğu bir sistemdir. Türkiye’de olduğu kadar dünyada da tercih edilen bir camdır. Argon gazı havadan daha ağır olduğu için hem enerji verimliliği hem de ısı yalıtımı açısından diğer camlara göre daha avantajlıdır (Anonim, 2022).

4.1.2. İki katmanlı ve üç katmanlı camların ısı geçirgenlik direncinin incelenmesi

Binalarda uygulanan ısı yalıtımları sayesinde daha fazla ısı kazançları elde edilmektedir. Binalarda kullanılan yapı bileşenlerindeki sıcaklık farklarının minimum değere indirgeme işlemlerine ısı yalıtımı denir. Binalara yapılan ısı yalıtımı ile bina içi harcanan enerji miktarı azaltılmakla birlikte daha konforlu bir yaşam da sağlamış olur. Binaların tesisat sistemleri, dış cephe duvarları, çatıları, tabanları ve cam gibi birçok alanda ısı kaybını önlemek gerekiyor. Isı kaybını önlemek adına yapılan tüm çalışmalara ısı yalıtım ismi veriliyor. Doğru bir şekile yapılan ısı yalıtımı iletim (kondüksiyon), ışıınım (radyasyon) ve taşınım (konveksiyon) ile oluşan ısı geçiş hızının daha az olmasını sağlayan malzeme ya da uygulamaların bütünüdür. Isı yalıtımı için kullanılan malzemeler sayesinde bina dışından iç hacme ya da tam tersi iç ortamdan dış hacme doğru olan ısı geçiş hızısını özellik olarak ısı direncinin daha yüksek olmasından kaynaklı azaltmaktadır.

Isı yalıtımı için kullanılan malzemelerin içerisindeki çok sayıda mikroskobik kapalı hava hücresi sayesinde ısı akış hızına (içerideki havayı hareket ettirmeden) karşı koyar ve konveksiyondan kaynaklanan ısı transferini engeller. Isıl direnci gösteren ısı yalıtımı malzemesi değil, yalıtım malzemesinin içinde yer alan hava hücreleridir. Küçük hücre boyutundaki (kapalı hücre yapısı) yalıtım malzemeleri radyasyon yoluyla gerçekleşen ısı transferinin hızının da etkisini azaltır. Ek olarak, hücre boyutunun küçültülmesi ve yalıtımın yoğunluğunun artırılması, genellikle iletim yoluyla daha fazla ısı transferi ile sonuçlanır. Normalde, ölü hava hücresi yalıtımı, durgun havanın termal direncini aşmamaktadır (Al-Homoud, 2005).

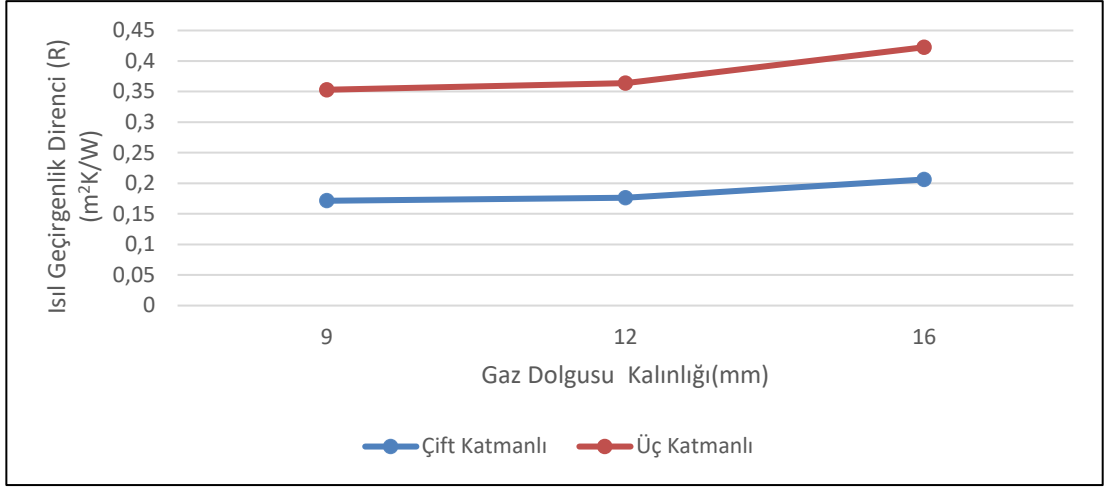
Çizelge 4.5. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4_Klasik argon	0.177	0.171
4x12x4_Klasik argon	0.195	0.176
4x16x4_Klasik argon	0.208	0.206

Çizelge 4.6. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4x9x4_Klasik argon	0.342	0.353
4x12x4x12x4_Klasik argon	0.367	0.363
4x16x4x16x4_Klasik argon	0.388	0.422

Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.5’de verilmiştir. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.6’da verilmiştir. Şekil 4.4’de ise Çizelge 4.5 ve 4.6’da verilen değerlerin tek bir grafikte incelenip çift katmanlı ve üç katmanlı argon dolgulu klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

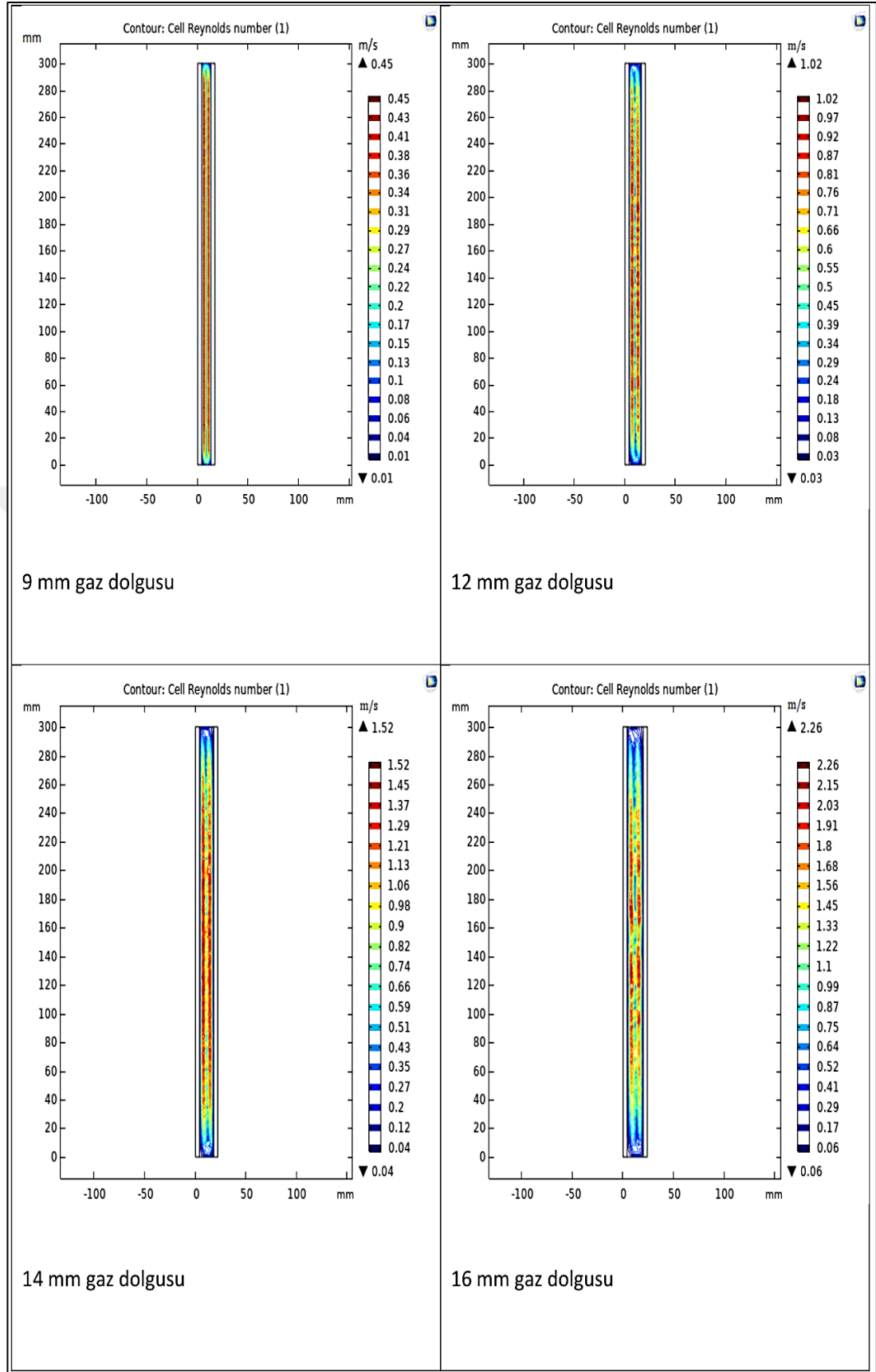


Şekil 4.4. Çift katmanlı ve üç katmanlı argon dolgulu klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması

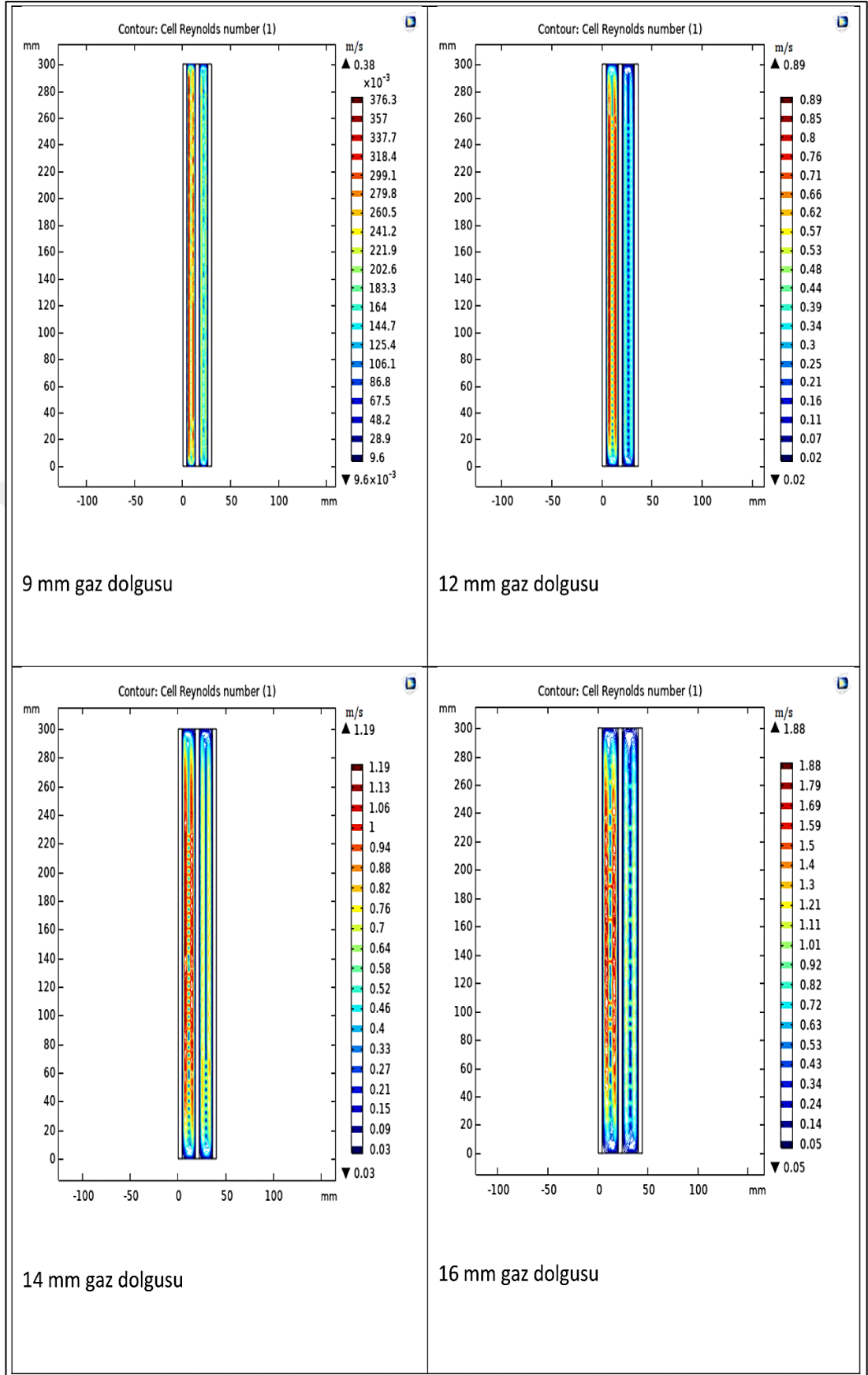
Şekil 4.4’de bakıldığında klasik cam argon dolgulu çift katmanlı camların ısı direnci üç katmanlı camlara oranla daha düşük çıktığı görülmüştür.

- 9 mm gaz dolgulu camlarda iki katmanlı yerine üç katmanlı cam uygulandığında ısı direnci bazında verimliliğin %51.55
- 12 mm gaz dolgulu camlarda ise %51.51
- 16 mm gaz dolgusunda ise %51.18 oranında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.5 ve 4.6’da çift ve üç katmanlı argon dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların hız profilleri ve gaz dolgusu içerisindeki argon gazının kalınlıklara göre değişen maksimum gaz hızı verilmiştir. Şekillerde de (Şekil 4.5, 4.6, 4.8, 4.9, 4.11, 4.12, 4.14 ve 4.15) 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 leminer akış başlayacağı için taşınım ile ısı transferi gerçekleşir. Kaldırma kuvveti, akışkan direncini yenemediği zaman Bernard hücreleri bozulur ve akış türbülanslı olur.



Şekil 4.5. Çift katmanlı argon dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili



Şekil 4.6. Üç katmanlı argon dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolguları içerisindeki hız profili

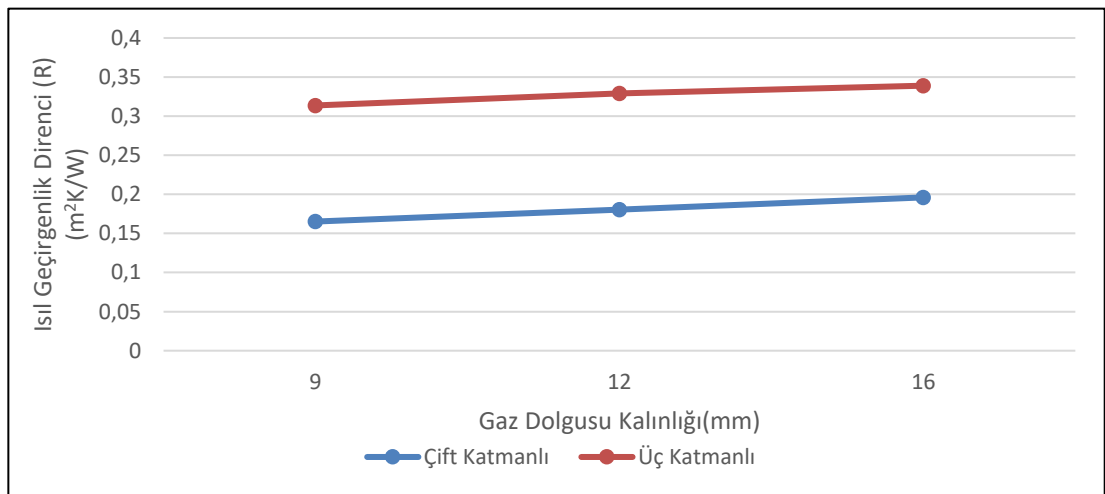
Çizelge 4.7. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4_Klasik kuru hava	0.165	0.151
4x12x4_Klasik kuru hava	0.18	0.193
4x16x4_Klasik kuru hava	0.196	0.208

Çizelge 4.8. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4x9x4_Klasik kuru hava	0.313	0.34
4x12x4x12x4_Klasik kuru hava	0.338	0.426
4x16x4x16x4_Klasik kuru hava	0.369	0.469

Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.7’de verilmiştir. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.7’de ise Çizelge 4.7 ve 4.8’de verilen değerlerin tek bir grafikte incelenip çift katmanlı ve üç katmanlı kuru hava dolgulu klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

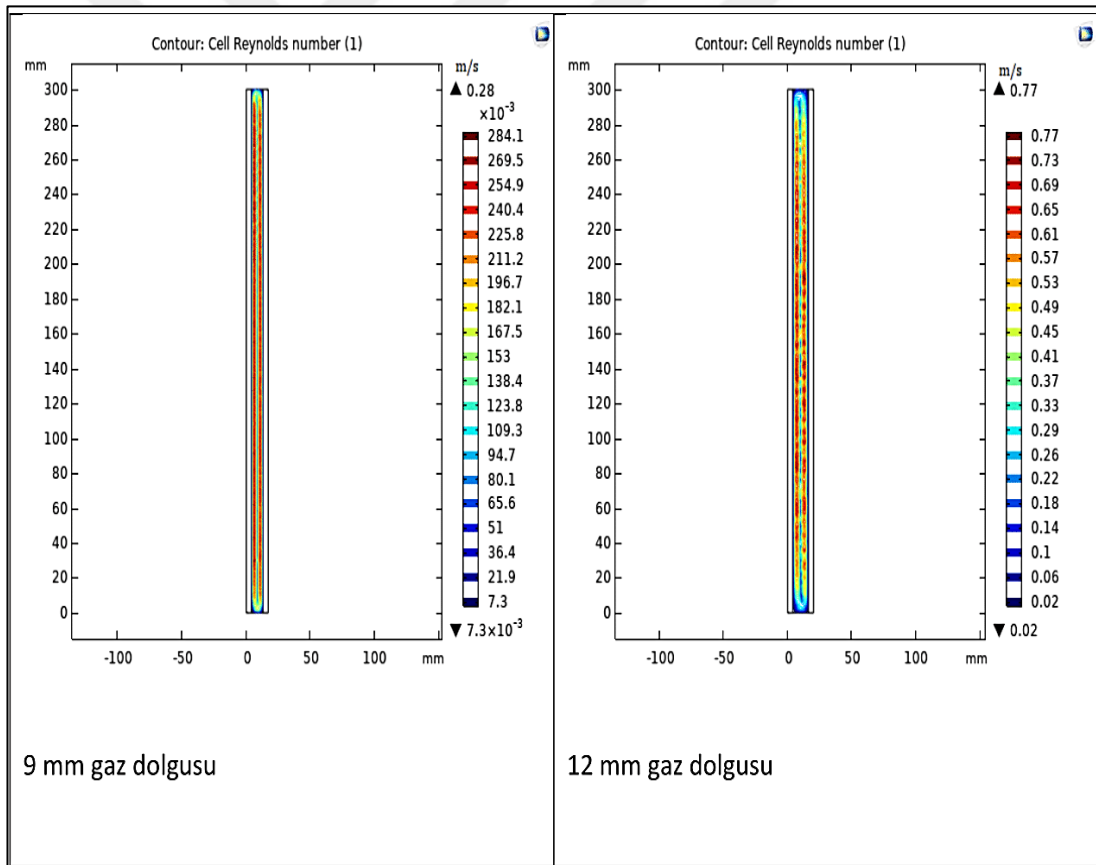


Şekil 4.7. Çift katmanlı ve üç katmanlı kuru hava dolgulu klasik camların R değerlerinin karşılaştırılması

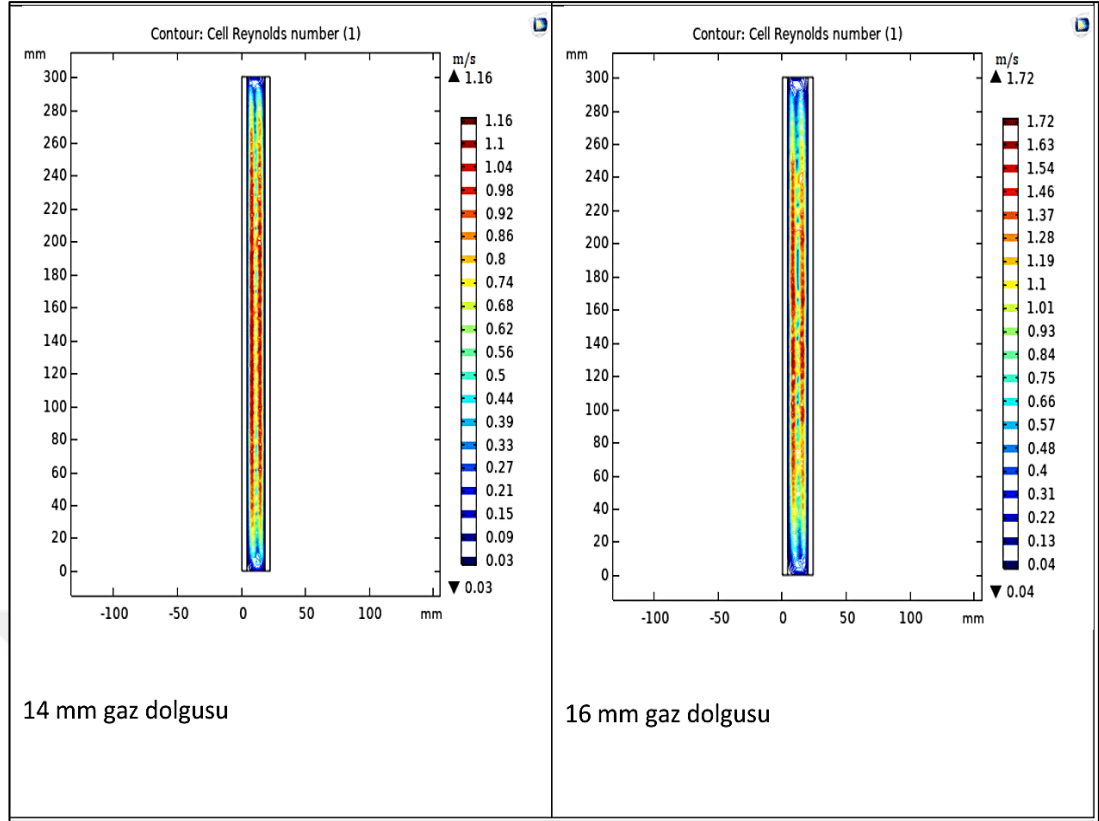
Şekil 4.7'ye bakıldığında klasik cam kuru hava dolgulu çift katmanlı camların ısıl direnci üç katmanlı camlara oranla daha düşük çıktığı görülmüştür.

- 9 mm gaz dolgulu camlarda iki katmanlı yerine üç katmanlı cam uygulandığında ısıl direnç bazında verimliliğin %47.28
- 12 mm gaz dolgulu camlarda ise aynı hesaplama yapıldığında %45.28
- 16 mm gaz dolgusunda ise %42.01 oranında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

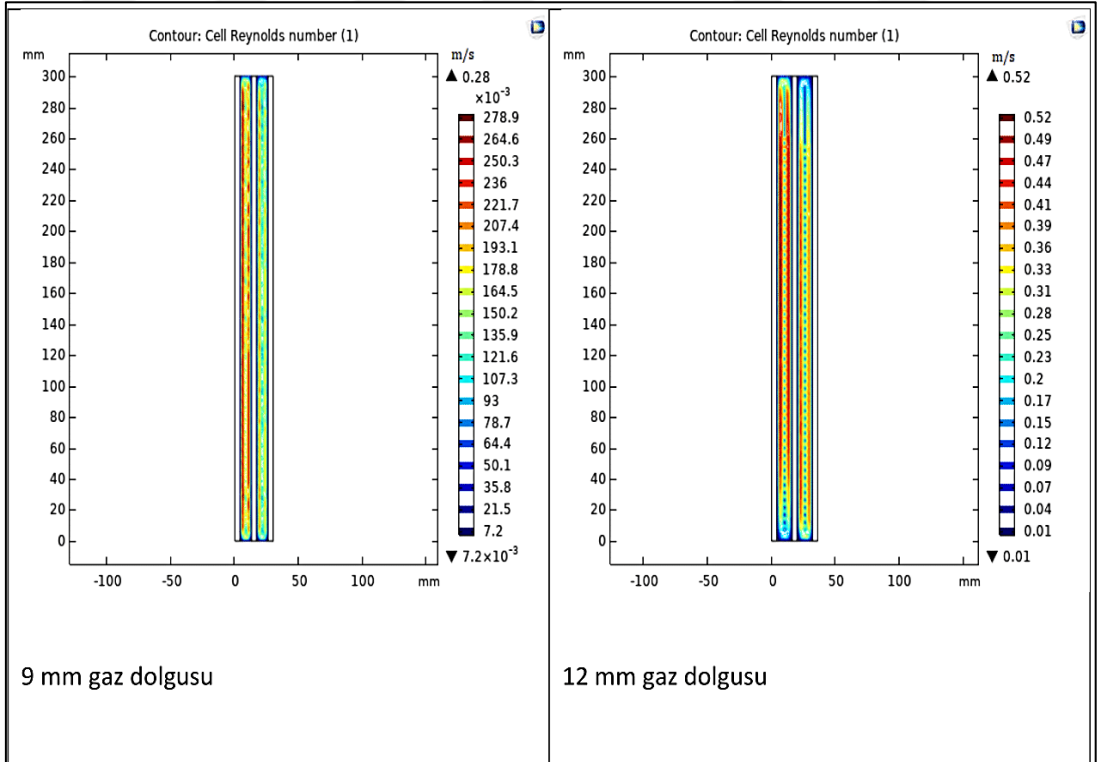
Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'de çift ve üç katmanlı kuru hava dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların hız profililerinin ve gaz dolgusu içerisindeki kuru hava gazının kalınlıklara göre değişen maksimum gaz hızı verilmiştir.



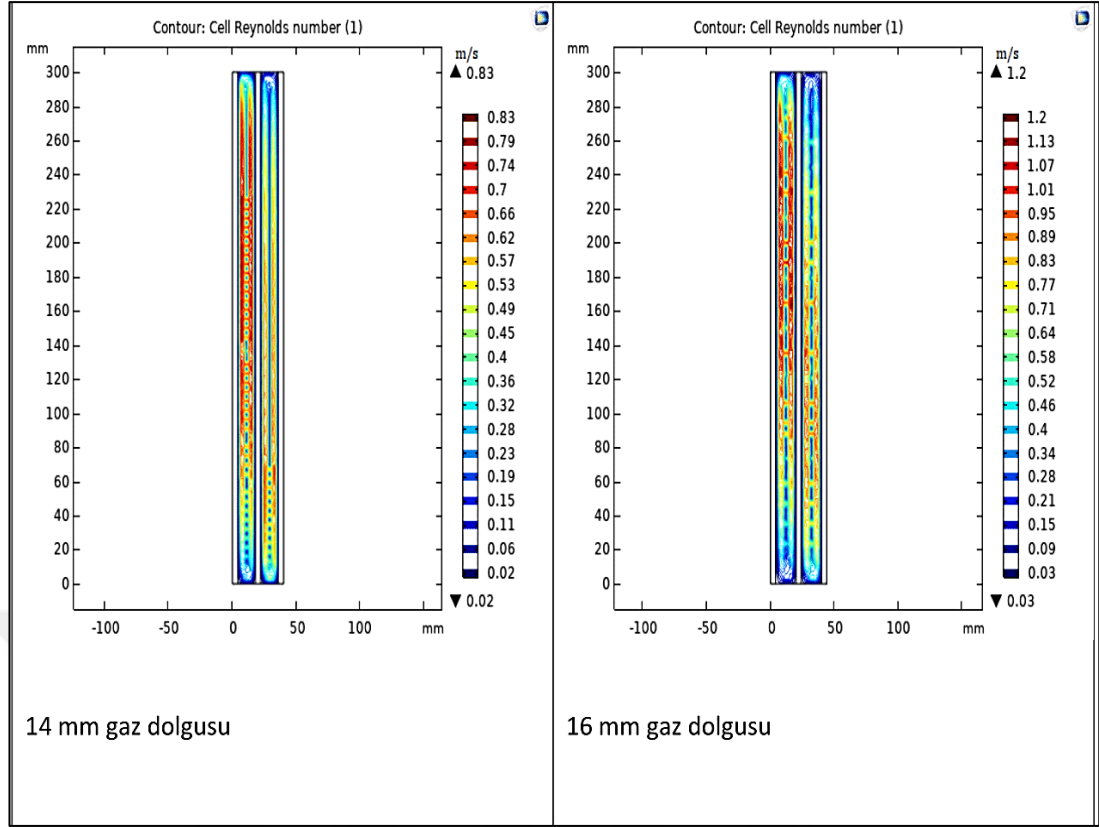
Şekil 4.8. Çift katmanlı kuru hava dolgulu 9, 12 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili



Şekil 4.9. Çift katmanlı kuru hava dolgulu 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili



Şekil 4.10. Üç katmanlı kuru hava dolgulu 9, 12 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolguları içerisindeki hız profili



Şekil 4.11. Üç katmanlı kuru hava dolgulu 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki klasik camların gaz dolguları içerisindeki hız profili

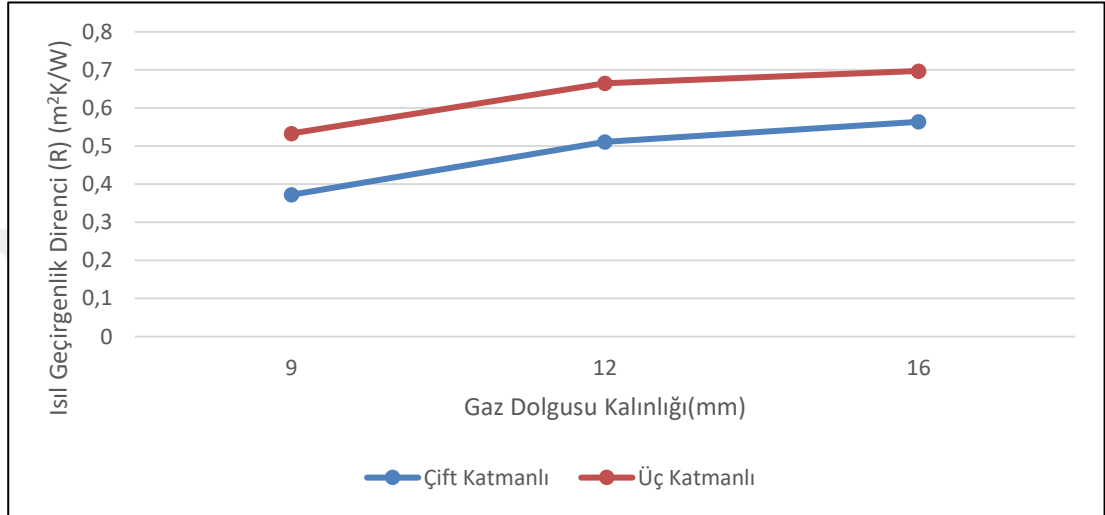
Çizelge 4.9. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4_SolarE argon	0.372	0.359
4x12x4_SolarE argon	0.51	0.446
4x16x4_SolarE argon	0.563	0.463

Çizelge 4.10. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4x9x4_SolarE argon	0.533	0.528
4x12x4x12x4_SolarE argon	0.664	0.613
4x16x4x16x4_SolarE argon	0.697	0.665

Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.9’da verilmiştir. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.10’da verilmiştir. Şekil 4.12’de ise Çizelge 4.9 ve 4.10’da verilen değerlerin tek bir grafikte incelenip çift katmanlı ve üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



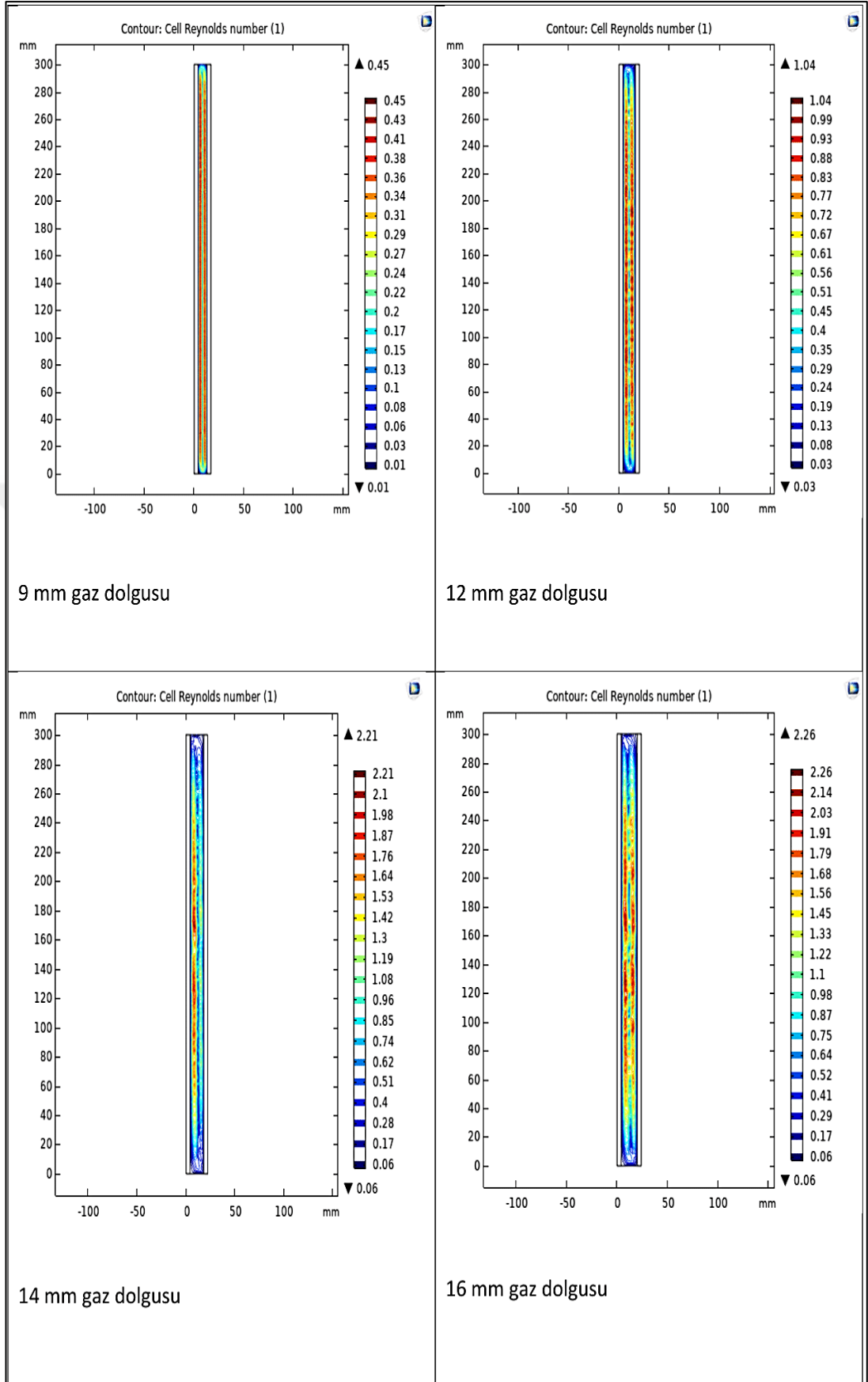
Şekil 4.12. Çift Katmanlı ve Üç Katmanlı argon Gazı dolgulu farklı kalınlıklardaki Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.12’e bakıldığında Solar Low-E cam argon dolgulu çift katmanlı camların ısıl direnci üç katmanlı camlara oranla daha düşük çıktığı görülmüştür. Solar Low-E cam argon dolgulu iki katmanlı yerine Solar Low-E cam Argon dolgulu üç katmanlı cam uygulandığında ısıl direnç bazında verimliliğin;

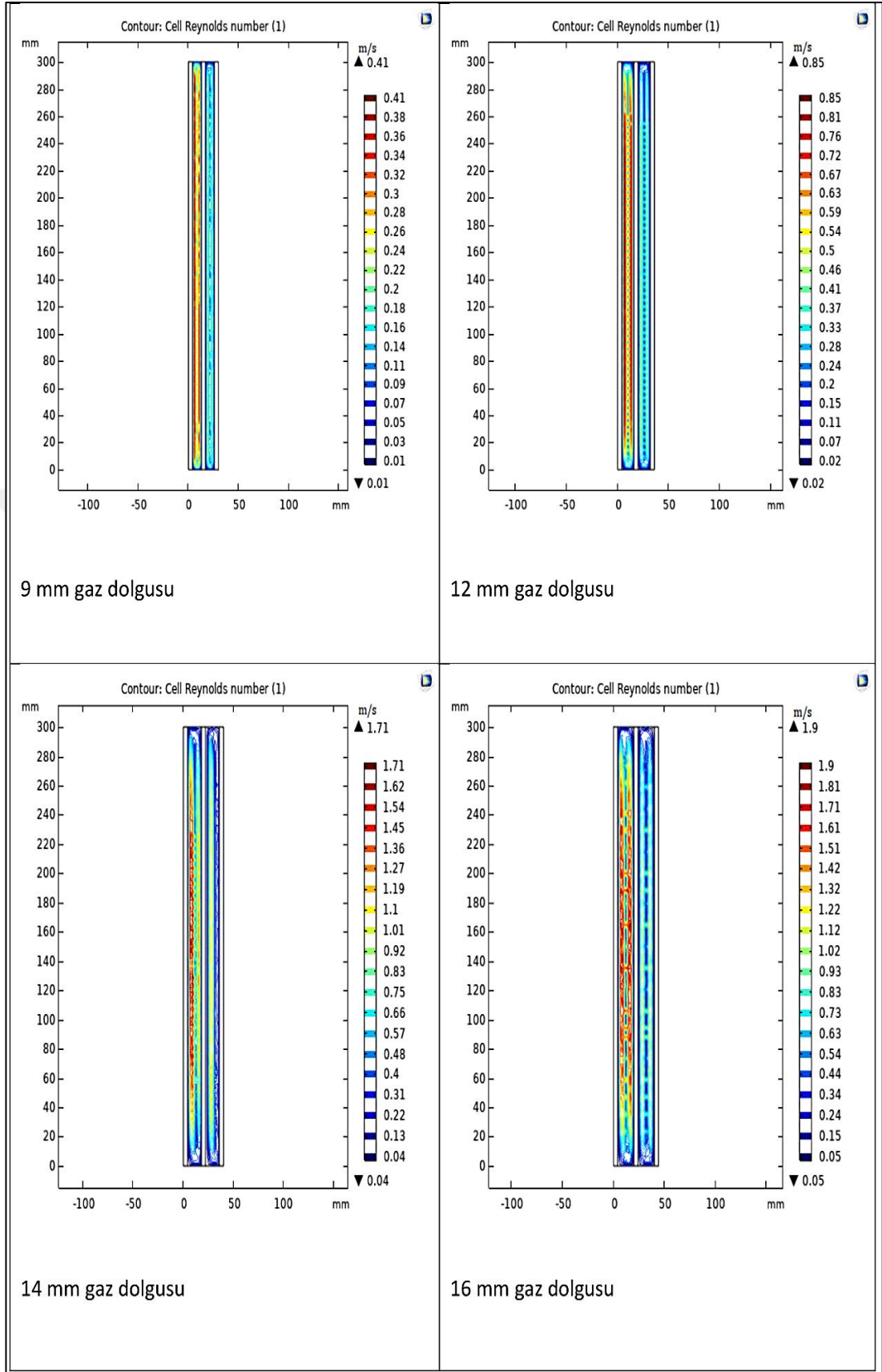
- 9 mm gaz dolgulu camlarda %30,2,
- 12 mm gaz dolgulu camlarda %23,19
- 16 mm gaz dolgusunda ise %19,22 oranında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.13 ve 4.14’de çift ve üç katmanlı argon dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-e camların hız profillerinin ve gaz dolgusu içerisindeki argon gazının kalınlıklara göre değişen maksimum gaz hızı verilmiştir.

Şekillerde de (Şekil 4.13 ve 4.14) görüldüğü gibi gaz dolgu kalınlığı arttıkça gaz katmanının içerisindeki gazın hızının arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. Çift katmanlı argon dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili



Şekil 4.14. Üç katmanlı argon dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolguları içerisindeki hız profili

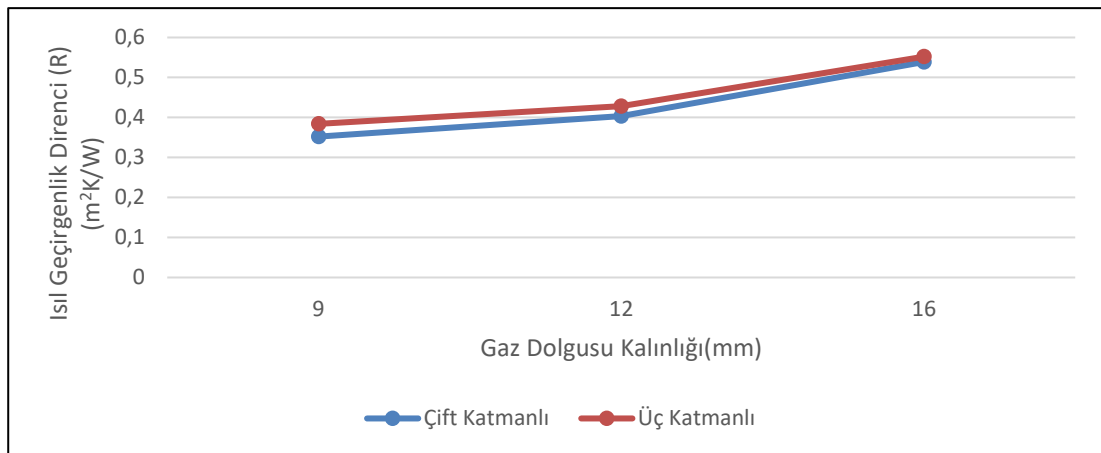
Çizelge 4.11. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4_ SolarE kuru hava	0.352	0.228
4x12x4_ SolarE kuru hava	0.433	0.293
4x16x4_ SolarE kuru hava	0.538	0.327

Çizelge 4.12. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması

Cam Özelliği	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri	Sayısal olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan R değeri
4x9x4x9x4_ SolarE kuru hava	0.384	0.327
4x12x4x12x4_ SolarE kuru hava	0.428	0.324
4x16x4x16x4_ SolarE kuru hava	0.542	0.315

Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.11’de verilmiştir. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.15’te ise Çizelge 4.11 ve 4.12’de verilen değerlerin tek bir grafikte incelenip çift katmanlı ve üç katmanlı kuru hava dolgulu Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.15. Çift Katmanlı ve üç katmanlı kuru hava dolgulu farklı kalınlıklardaki Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılması

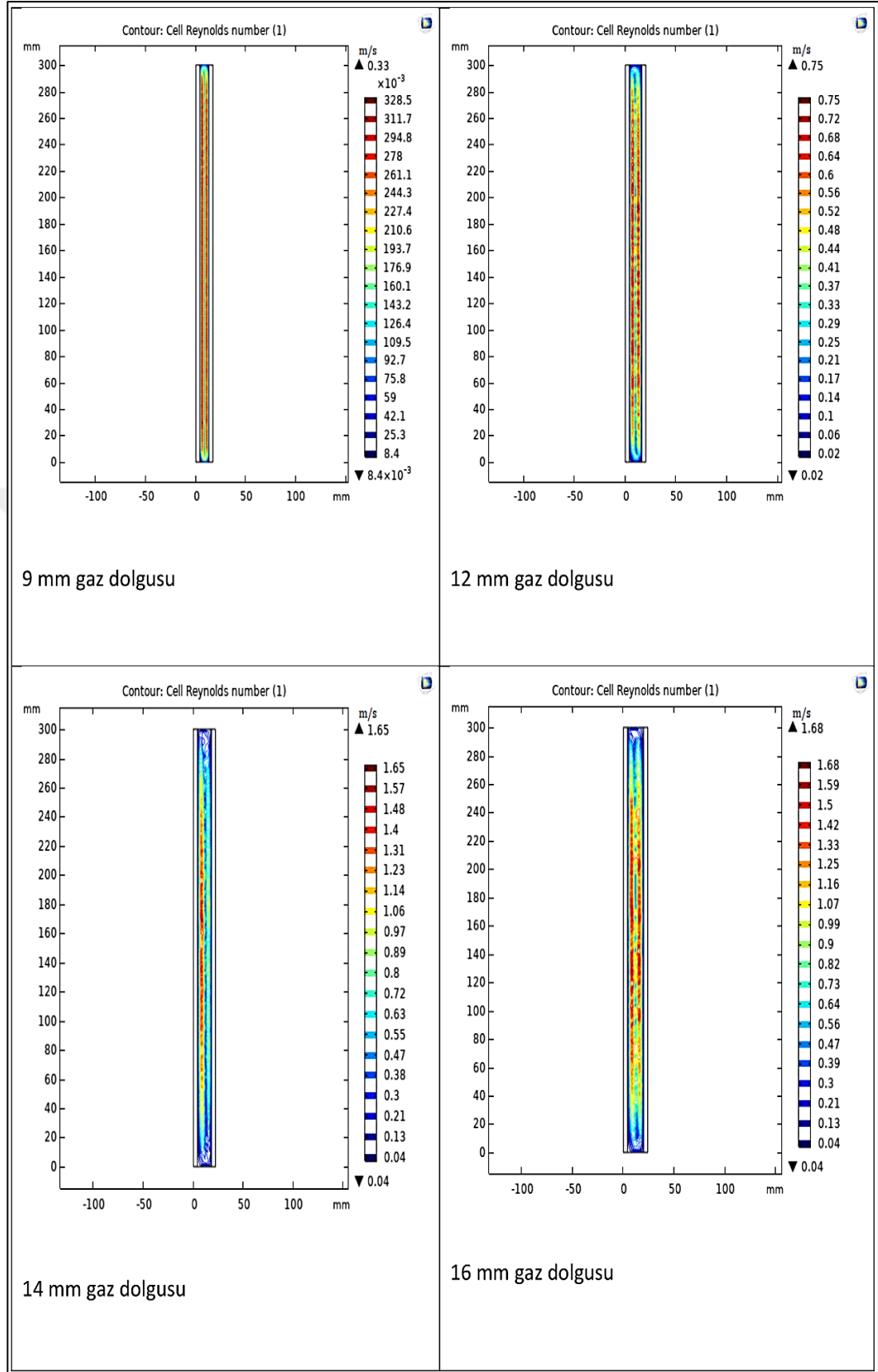
Şekil 4.15'e bakıldığında Solar Low-E cam kuru hava dolgulu çift katmanlı camların ısı direnci üç katmanlı camlara oranla daha düşük çıktığı görülmüştür. Solar Low-E cam kuru hava dolgulu iki katmanlı yerine Solar Low-E cam kuru hava dolgulu üç katmanlı cam uygulandığında ısı direnç bazında verimliliğin;

- 9 mm gaz dolgulu camlarda %8.3,
- 12 mm gaz dolgulu camlarda %5.84
- 16 mm gaz dolgusunda ise %2.53 oranında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

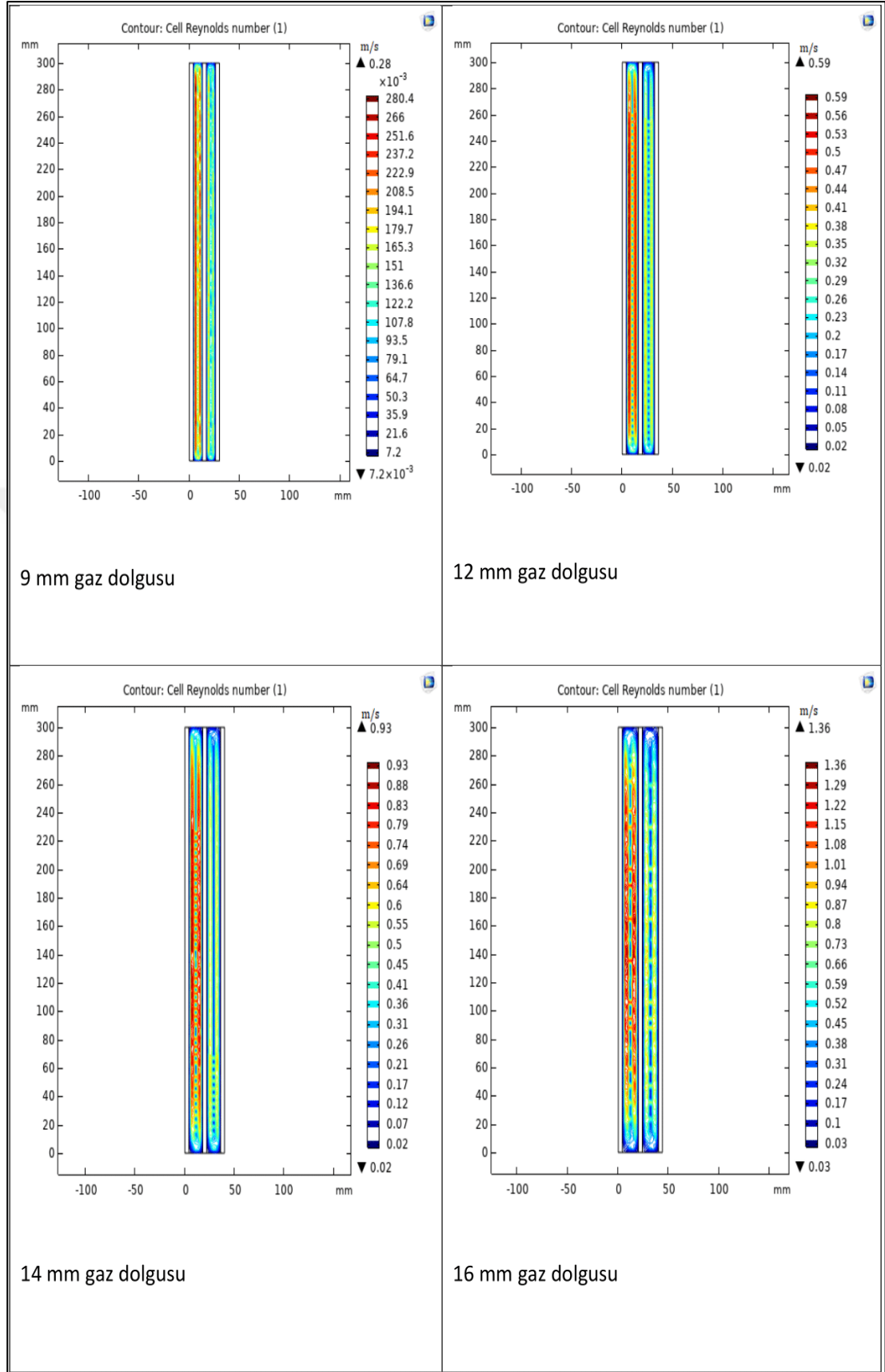
Şekil 4.16 ve 4.17'de çift ve üç katmanlı kuru hava dolgulu 9,12,14,16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-e camların hız profillerinin ve gaz dolgusu içerisindeki argon gazının kalınlıklara göre değişen maksimum gaz hızı verilmiştir.

Çift katmanlı ve üç katmanlı cam numunelerinin değişen kaplama özellikleri ve gaz dolgusu nitelikleri parametleri 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 verimliliğin daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

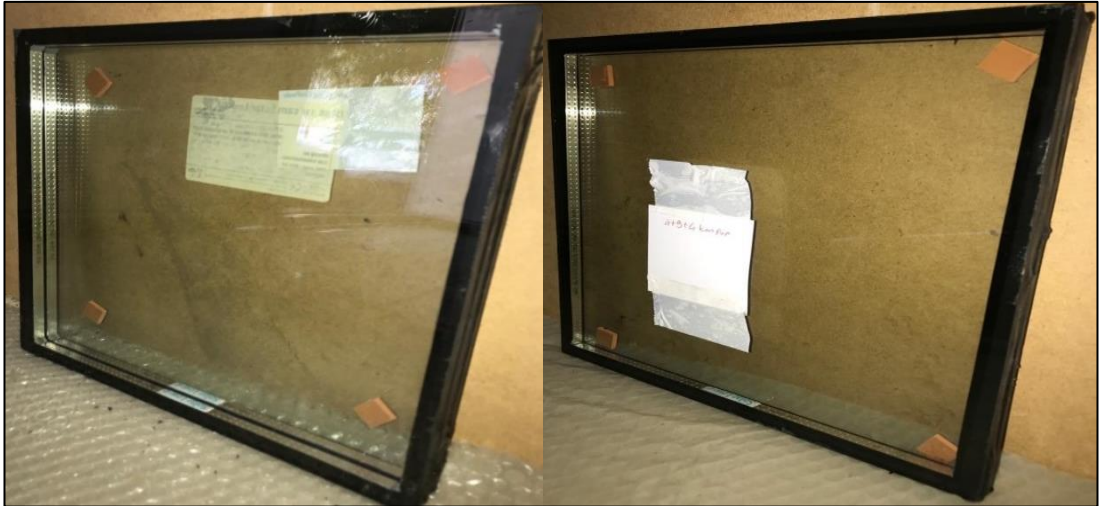


Şekil 4.16. Çift katmanlı kuru hava dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolgusu içerisindeki hız profili



Şekil 4.17. Üç katmanlı kuru hava dolgulu 9, 12, 14, 16 mm ara katman kalınlıklarındaki Solar Low-E camların gaz dolguları içerisindeki hız profili

Pencere camları tek cam şeklinde uygulandığında özellikle kış mevsiminde iç ortamdan dış ortama önemli boyutta ısı kaybı olduğu görülmektedir. Tek katmanlı cam uygulaması yapılan pencerelerin ısı yalıtımı sağlama niteliği taşımadığı gözlemlenmiştir. Bu, katman sayısı arttıkça dışarıdaki ısının iç ortama geçişinin azaldığı anlamına gelmektedir. Cam katman sayısı arttıkça ısı yalıtımının daha iyi bir düzeye gelmektedir. Bunun nedeni ısı yalıtımında etkin rol oynayan iki cam tabaka arasında kalan gaz dolgusudur. İki katmanlı cam sistemlerinde tek gaz dolgusu katmanı bulunurken Üç katmanlı cam sistemlerinde iki adet gaz dolgusu katmanı bulunmaktadır. Şekil 4.16'da sağ tarafta 9 mm kalınlıkta kuru hava dolgulu iki katmanlı cam uygulaması sol tarafta ise üç katmanlı 9 mm kalınlıkta kuru hava dolgulu cam uygulaması numuneleri verilmiştir.



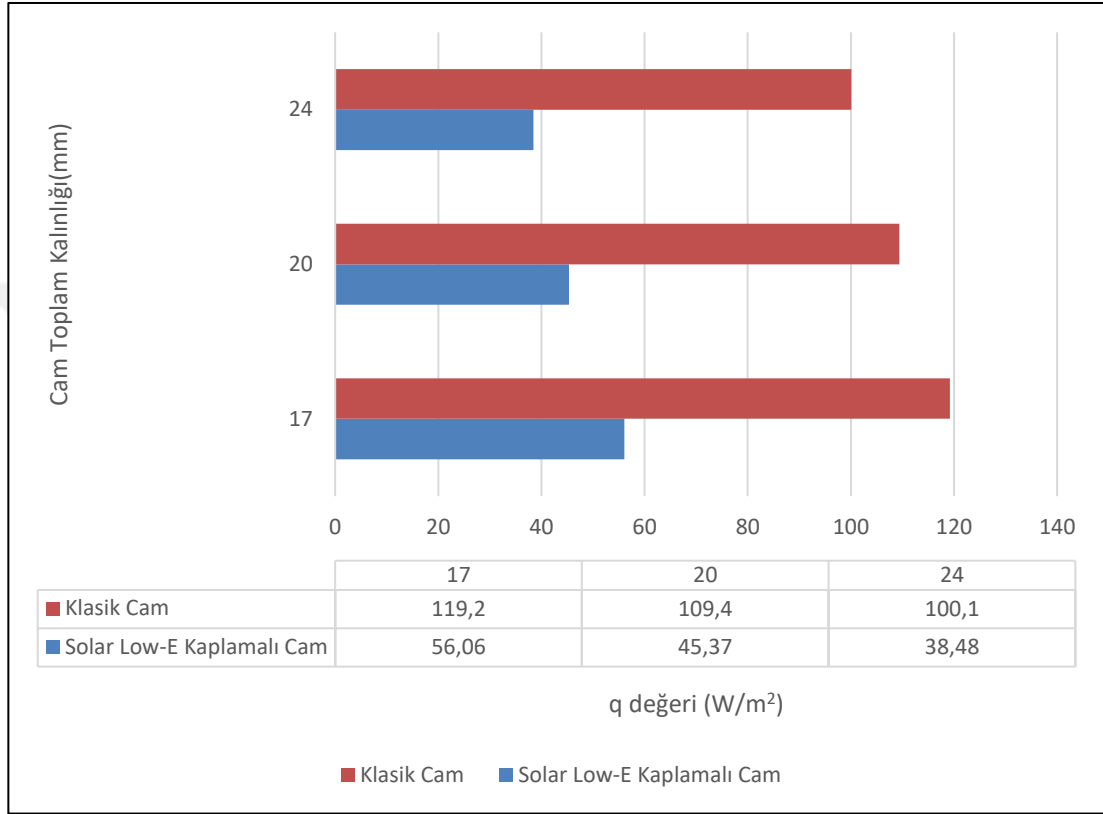
Şekil 4.18. 9 mm kalınlıkta kuru hava dolgulu cam uygulamaları numuneleri

4.1.3. Farklı cam kaplamalarının ısı transferine olan etkisinin incelenmesi

Yapıda kullanılan elemanlarda yeteri kadar önlem alınmamasından kaynaklı su ve nem gibi faktörlerin etkisiyle meydana gelen ısı kayıpları, yapı içi veya dışından oluşan ısı kazançlarına (elektrikle çalışan ev aletleri, aydınlatma vb) oranla daha fazla olabilmektedir. Bundan kaynaklı ısı konfor şartlarının bozulmasına neden olmaktadır.

Yapılardaki ısı konfor şartlarını gerçeğe en yakın olarak değerlendirilmesi için "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları"nda yer alan hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Isıl konforun oluşmaması ve kayıpların daha fazla olmasından

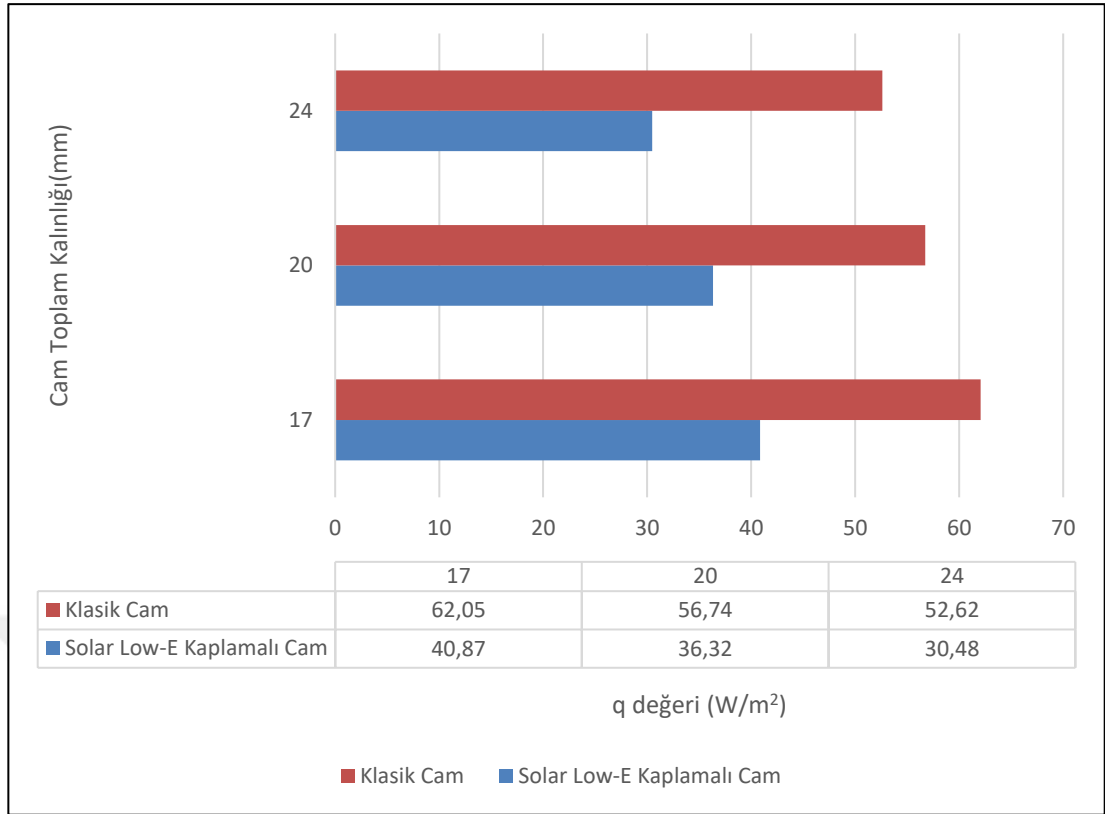
kaynaklı enerjiye harcanan maliyette artış söz konusu olmaktadır. Bu ve bunun gibi olumsuz neden ve sonuçların önüne geçilebilmesi için ısı yalıtımı kavramı önem arz etmektedir. Isıl konforun sağlanması adına ısı yalıtımının en üst seviyede veya optimum seviyede tutulması gerekir. Tezin bu bölümünde cam katman sayısı ile ısı akış yoğunluğunun arasındaki ilişki incelenmektedir.



Şekil 4.19. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması

Şekil 4.19’da iki katmanlı kuru hava dolgulu Solar low-e ve klasik camların gaz dolgusu kalınlığı aynı olanların kendi arasında q değerlerinin karşılaştırılmasını görmekteyiz. Isı akış yoğunluğu bazında verimlilik hesapları yapıldığında iki katmanlı kuru hava dolgulu klasik cam uygulamaları yerine iki katmanlı kuru hava dolgulu Solar low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında;

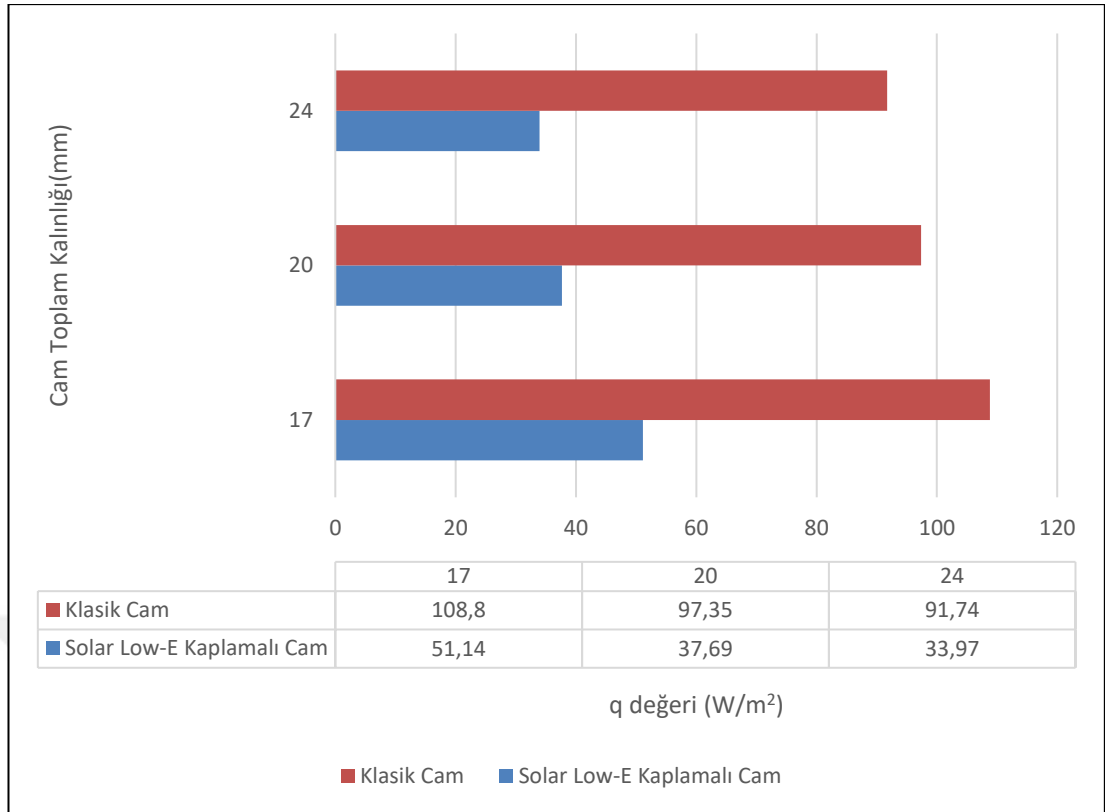
1. 9 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %53
2. 12 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %58.52
3. 16 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında ise %61.55 oranında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.20. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması

Şekil 4.20’de üç katmanlı kuru hava dolgulu Solar low-e ve klasik camların gaz dolgusu kalınlığı aynı olanların kendi arasında q değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Isı akış yoğunluğu bazında verimlilik hesapları yapıldığında üç katmanlı kuru hava dolgulu klasik cam uygulamaları yerine üç katmanlı kuru hava dolgulu Solar low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında;

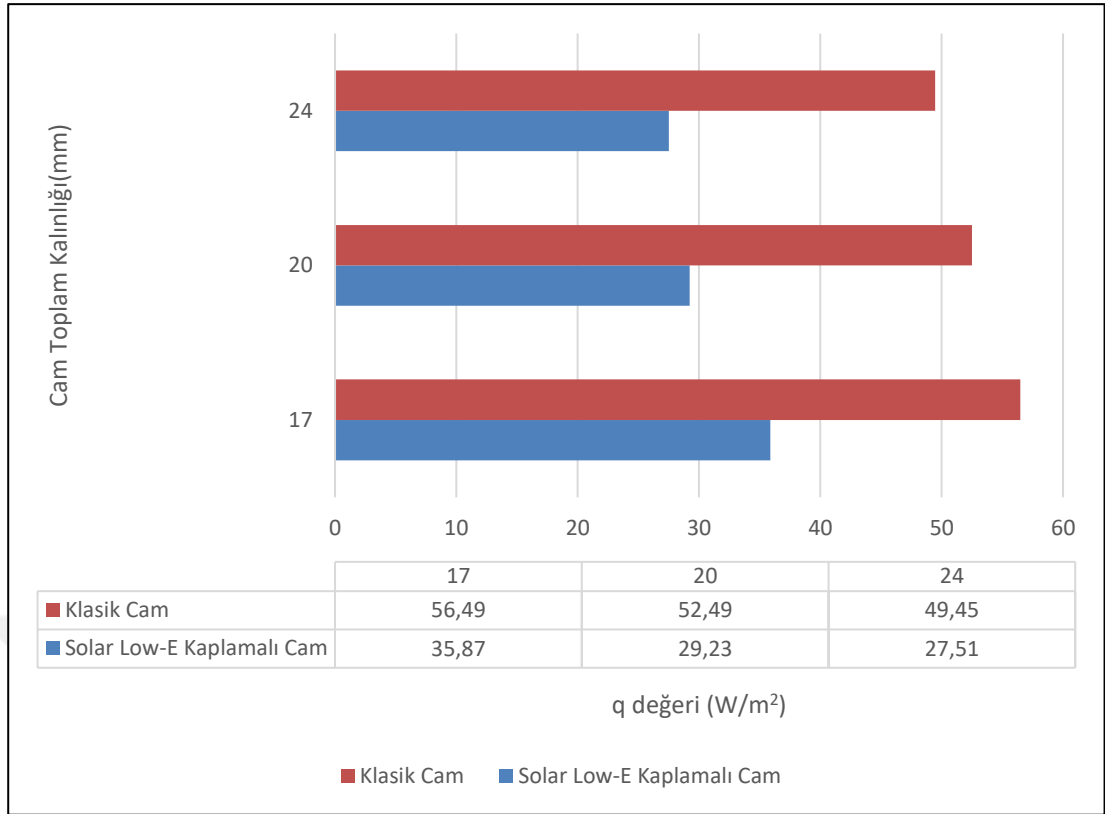
1. 9 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %34.15
2. 12 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %35.45
3. 16 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında ise %42.07 oranında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.21. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması

Şekil 4.21’de iki katmanlı argon dolgulu Solar low-e ve klasik camların gaz dolgusu kalınlığı aynı olanların kendi arasında q değerlerinin karşılaştırılmasını görmekteyiz. Isı akış yoğunluğu bazında verimlilik hesapları yapıldığında iki katmanlı argon dolgulu klasik cam uygulamaları yerine üç katmanlı argon dolgulu Solar low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında;

1. 9 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %53
2. 12 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %61.28
3. 16 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında ise %62.97 oranında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

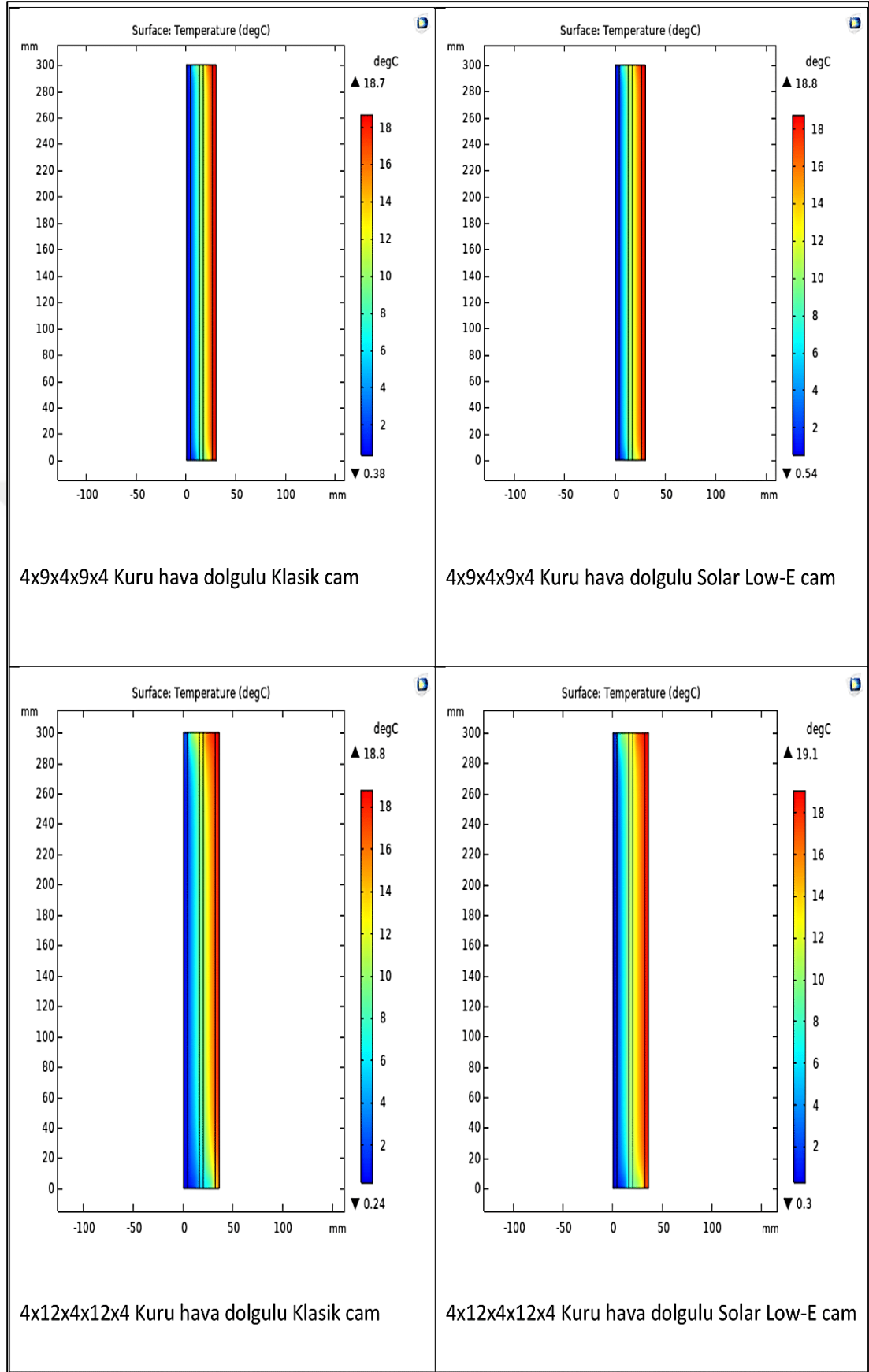


Şekil 4.22. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E ve klasik camların q değerinin karşılaştırılması

Şekil 4.22’de üç katmanlı argon dolgulu Solar low-e ve klasik camların gaz dolgusu kalınlığı aynı olanların kendi arasında q değerlerinin karşılaştırılmasını görmekteyiz. Isı akış yoğunluğu bazında verimlilik hesapları yapıldığında üç katmanlı argon dolgulu klasik cam uygulamaları yerine üç katmanlı argon dolgulu Solar low-e kaplamalı cam uygulamaları kullanıldığında;

1. 9 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %36.5
2. 12 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında %44.31
3. 16 mm kalınlığına sahip gaz dolgulu cam uygulamalarında ise %44.14 oranında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.23’de üç katmanlı 9 mm kalınlıktaki gaz dolgulu klasik ve solar low-e kaplamalı camların sıcaklık profili ve 12 mm kalınlıktaki gaz dolgulu klasik ve solar low-e kaplamalı camların sıcaklık profillerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi camın kaplama özelliğinin yayıcılık oranı azaldıkça ısı akış yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23. Kuru hava dolgulu 9 ve 12 mm kalınlığına sahip üç katmanlı Solar Low-E ve klasik camların sıcaklık profili

4.1.4. Gaz dolgusu kalınlığının ısıl geçirgenlik katsayısına etkisi

Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı Solar Low-E camların R değerlerinin karşılaştırılma argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların U değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.13’de verilmiştir. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip iki katmanlı klasik camların U değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.14’de verilmiştir. Argon dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların U değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.15’de verilmiştir. Kuru hava dolgulu farklı dolgu kalınlığına sahip üç katmanlı klasik camların U değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.16’da verilmiştir. Şekil 4.24’de ise Çizelge 4.13, 4.14, 4.15 ve 4.16’da verilen değerlerin tek bir grafikte incelenip kuru hava dolgulu ve argon dolgulu farklı kalınlıklardaki klasik camların U değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Isı Geçirgenlik Katsayısı farklı malzemelerin arka arkaya dizilmesiyle oluşan bir yapı elemanının ısı geçişine göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.22’de görüldüğü gibi cam kalınlığı arttıkça ısı geçirgenlik katsayısı düşmüştür. Fakat U değeri ne kadar küçük olursa, ısı kaybı da o kadar az olur. U, malzemelerin ısı iletim katsayısı ve ısı geçiş yönündeki kalınlığına bağlıdır. Şöyle hesaplanır:

$$U = \frac{k}{d} \quad (4.1)$$

Yukarıdaki Denklem (4.1)’de görüleceği üzere bir malzemenin ısıl geçirgenlik katsayısı o malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ile doğru, malzeme kalınlığı ile ters orantılıdır. Isı iletkenlik katsayısı ne kadar düşükse ya da ısı yalıtım malzemesinin kalınlığı ne kadar yüksek ise sistemler o derece yüksek ısı yalıtım direncine sahip olmaktadır. Dolayısıyla bina ısı yalıtım performansını, kullanılan eklentilerin ısı yalıtımına etkin rol oynayan duvarların, pencerelerin sahip olduğu ısı iletkenlik katsayısı ve kalınlıkları belirlemektedir. Ülkemizin içerisinde yer aldığı iklimsel koşullar göz önüne alındığında TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kurallarına göre kullanılması gereken yalıtım kalınlıklarına ulaşılmadığı, halihazırda kullanılan yalıtım kalınlıklarının yeterli olmadığı gözlemlenmektedir.

Yukarıdaki Denklem (4.1)'de görüleceği üzere bir malzemenin ısıl geçirgenlik katsayısı (U) o malzemenin ısı iletkenlik katsayısı (k) ile doğru, malzeme kalınlığı (d) ile ters orantılıdır. Isı iletkenlik katsayısı ne kadar düşükse ya da ısı yalıtım malzemesinin kalınlığı ne kadar yüksek ise sistemler o derece yüksek ısı yalıtım direncine sahip olmaktadır. Dolayısıyla bina ısı yalıtım performansını, kullanılan eklentilerin ısı yalıtımına etkin rol oynayan duvarların, pencerelerin sahip olduğu ısı iletkenlik katsayısı ve kalınlıkları belirlemektedir. Ülkemizin içerisinde yer aldığı iklimsel koşullar göz önüne alındığında TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kurallarına göre kullanılması gereken yalıtım kalınlıklarına ulaşılmadığı, halihazırda kullanılan yalıtım kalınlıklarının yeterli olmadığı gözlemlenmektedir.

4.1.5. TS 825'e göre Isparta ili için verilen pencere U değerleri ve analizler sonucu bulunan U değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.13. TS 825'de verilen bölgeler (Atmaca, 2016)

1.Bölge derece gün illeri
Adana, Mersin, Antalya, Hatay, İzmir
2. Bölge derece gün illeri
Aydın, Bursa, Giresun, Muğla, Sinop, Ayvalık (Balıkesir), Çanakkale, İstanbul, Osmaniye, Şırnak, Adıyaman, Denizli, Kilis, Ordu, Şanlıurfa, Amasya, Diyarbakır, Kocaeli, Rize, Tekirdağ, Balıkesir, Düzce, Maraş, Samsun, Trabzon, Bartın, Edirne, Manisa, Sakarya, Yalova, Batman, Gazi Antep, Mardin, Siirt, Zonguldak
3. Bölge derece gün illeri
Afyon, Burdur, Karabük, Malatya, Aksaray, Çankırı, Karaman, Nevşehir, Ankara, Çorum, Kırıkkale, Niğde, Artvin, Elazığ, Kırklareli, Tokat, Bilecik, Eskişehir, Kırşehir, Tunceli, Bingöl, Iğdır, Konya, Uşak, Bolu, Isparta , Kütahya
4. Bölge derece gün illeri
Bayburt, Gümüşhane, Hakkâri, Van, Bitlis, Kastamonu, Muş, Yozgat, Erzincan, Kayseri, Sivas
5. Bölge derece gün illeri
Ağrı, Ardahan, Erzurum, Kars

Çizelge 4.13'deki TS 825 standartından alınıp illerin hangi bölgede yer aldığı verilmiştir. Bu Çizelgeye bakılarak Isparta ilinin hangi bölgede olduğu tespit edilip ısıl geçirgenlik sayısı, tespit edilen bölgeye göre belirlenmiştir.

Çizelge 4.13'ye bakıldığı zaman Isparta ilinin 3. Bölgede yer aldığı görülmüştür. Bu bilgi doğrultusunda bölgelere göre verilen ısıl geçirgenlik Çizelgesinin yer aldığı Çizelge 4.14'e bakıldığında Isparta ili için TS 825'ye göre uygun görülen ısıl geçirgenlik katsayısı değeri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.14. Bölgelere göre en fazla değer olarak kabul edilmesi tavsiye edilen U değerleri (Atmaca, 2016)

	U_D (W/m ² K)	U_T (W/m ² K)	U_t (W/m ² K)	U_p (W/m ² K)
1. Bölge	0.66	0.43	0.66	1.8
2. Bölge	0.57	0.38	0.57	1.8
3. Bölge	0.48	0.28	0.43	1.8
4. Bölge	0.38	0.23	0.38	1.8
5. Bölge	0.36	0.21	0.36	1.8

Pencerelerin ısıl geçirgenlik katsayıları (U_p) Çizelge 4.14'de verilmiştir. TS 825'e göre pencerelerden olan ısı kayıplarının en aza indirilmesi açısından U_p değerinin kaplamalı camlar kullanılarak 1.8 W/m² K'e kadar düşürülecek şekilde tasarlanması uygun görülmüştür.

Deney sonuçları doğrultusunda elde edilen k değerine bağlı olarak hesaplanan U değerlerinden TS 825'e göre uygun görülen değere (1.8 W/m² K) ulaşan ya da daha iyi sonuç elde ettiğimiz camların nitelikleri ve U değeri Çizelge 4.15'da verilmiştir.

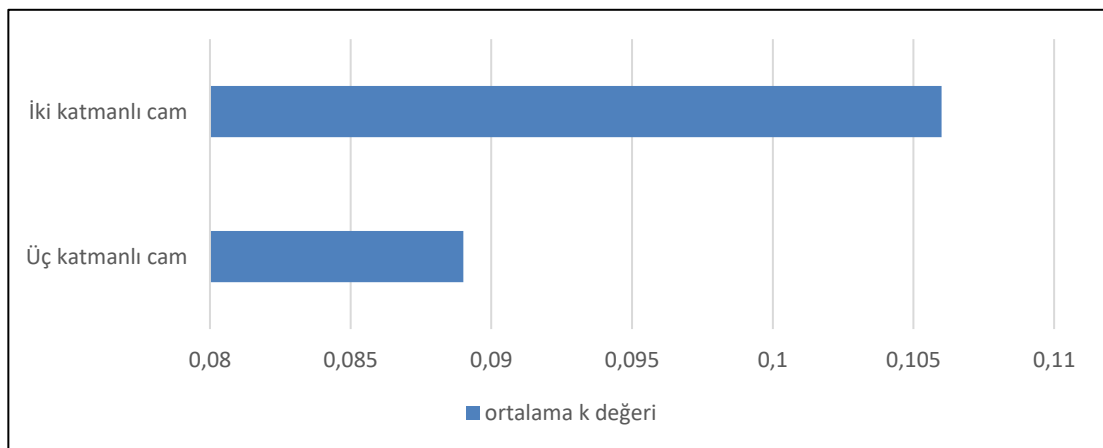
Çizelge 4.15. TS 825'e göre tavsiyen edilen U değerine uygun olan cam numuneler

Cam Numune Özellikleri	Deneysel olarak ölçülen k değerine bağlı hesaplanan U değeri
3 katmanlı klasik 11 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.7
3 katmanlı klasik 12 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.6
3 katmanlı klasik 14 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.5
3 katmanlı klasik 16 mm kuru hava gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.5
3 katmanlı klasik 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.8
3 katmanlı klasik 16 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.6
2 katmanlı Solar Low-e 9 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.8
2 katmanlı Solar Low-e 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.6
2 katmanlı Solar Low-e 16 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.5
3 katmanlı Solar Low-e 9 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.4
3 katmanlı Solar Low-e 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.2
3 katmanlı Solar Low-e 16 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi	1.1

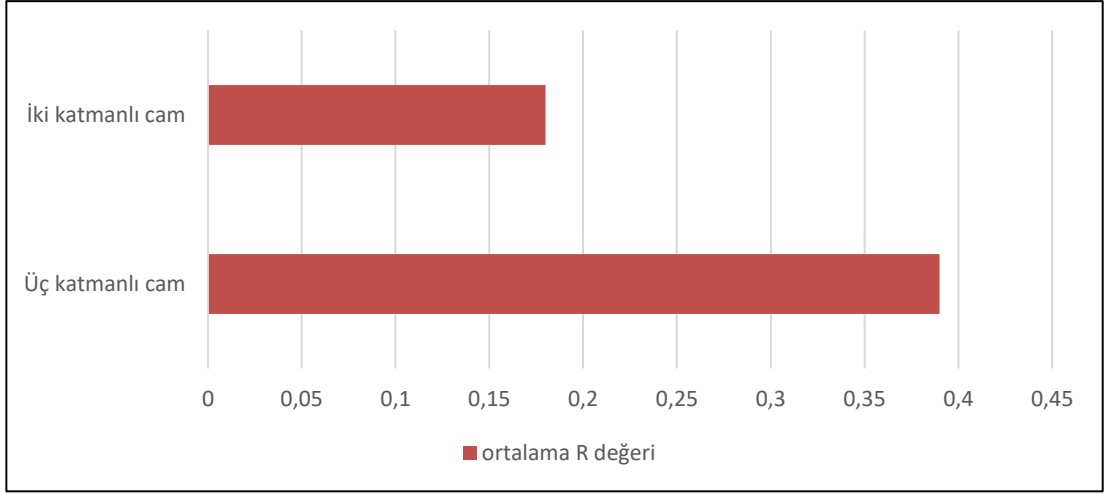
Çizelge 4.15'a bakıldığında 2 adet cam numunesinin (2 katmanlı Solar Low-e 9 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi ve 3 katmanlı klasik 12 mm argon gaz dolgusuna sahip cam numunesi) TS 825'de uygun görülen U değerine ($1.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), diğer 10 adet cam numunesinin ise bu uygun görülen U değerinden daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

4.2. Deneysel Bulguların Karşılaştırılması

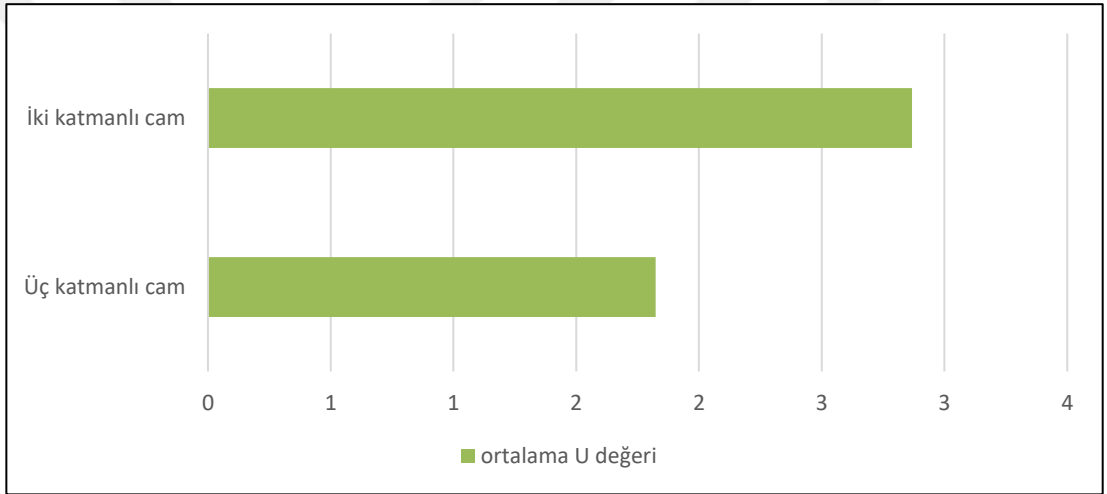
Hesaplamalar doğrultusunda ısı iletimi üç katmanlı camlarda oldukça azaldığı görülmüştür. Örneğin 9 mm gaz dolgusuna sahip argon dolgulu klasik cam uygulamalarında iki katmanlıda ısı iletim katsayısı 0.095 iken üç katmanlıda ısı iletim katsayısı 0.087 çıkmıştır. Isıl iletkenlik katsayısı (k) ise maddenin 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 yalıtıcıdır anlamına gelir. Ayrıca kullanılan cam sistemlerinde kalınlığın artması ve gaz dolgusunun kalınlığının 16 – 20 mm mesafelerini geçmeyecek biçimde arttırılması ısı konforu ve ses kontrolü bakımından daha olumlu sonuç vermiştir. Örneğin iki katmanlı kuru hava dolgulu klasik cam uygulamalarında 9 mm gaz dolgusunda Isı Geçirgenlik Katsayısı 3.2 iken 16 mm gaz dolgusunda Isı Geçirgenlik Katsayısı 2.63 çıkmıştır. U değerinin küçük olması maddenin ısı geçirgenliğinin yani ısı kaybının da düşük olduğu anlamına gelir. Kadar 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 4.24. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama k değerlerinin karşılaştırılması



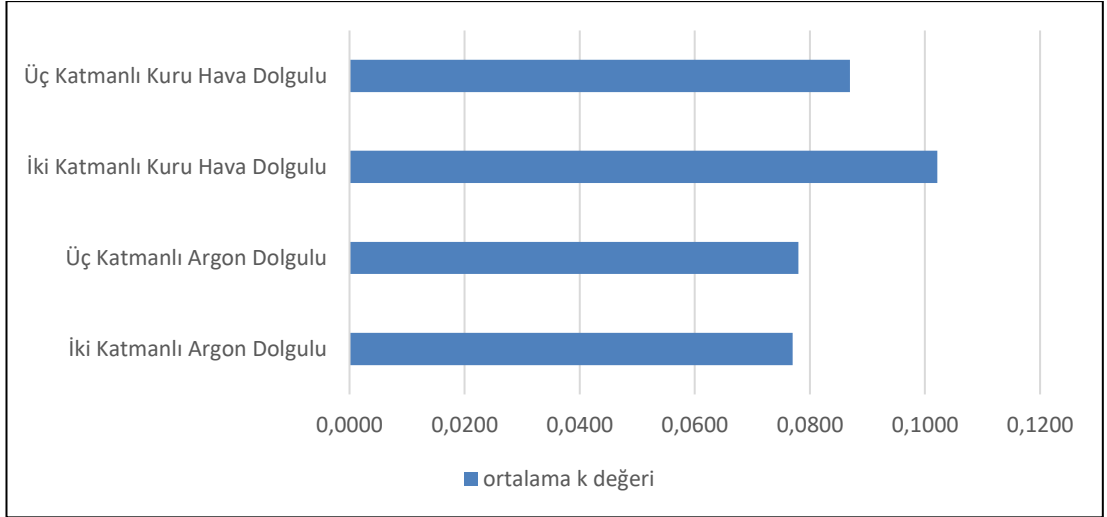
Şekil 4.25. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama R değerlerinin karşılaştırılması



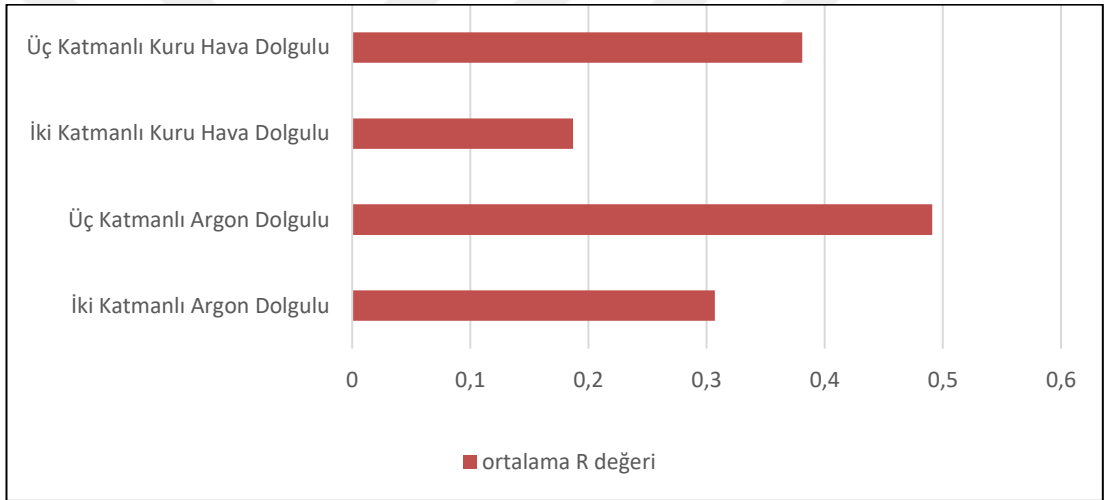
Şekil 4.26. İki katmanlı ve üç katmanlı cam uygulamalarının ortalama U değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.24, 4.25 ve 4.26’da iki katmanlık ve üç katmanlı cam numunelerinin sırasıyla ısı iletkenlik, ısı direnç ve ısı geçirgenlik katsayılarının ortalama değerleri alınmıştır ve bu değerler kendi içlerinde değerlendirilip karşılaştırılmıştır.

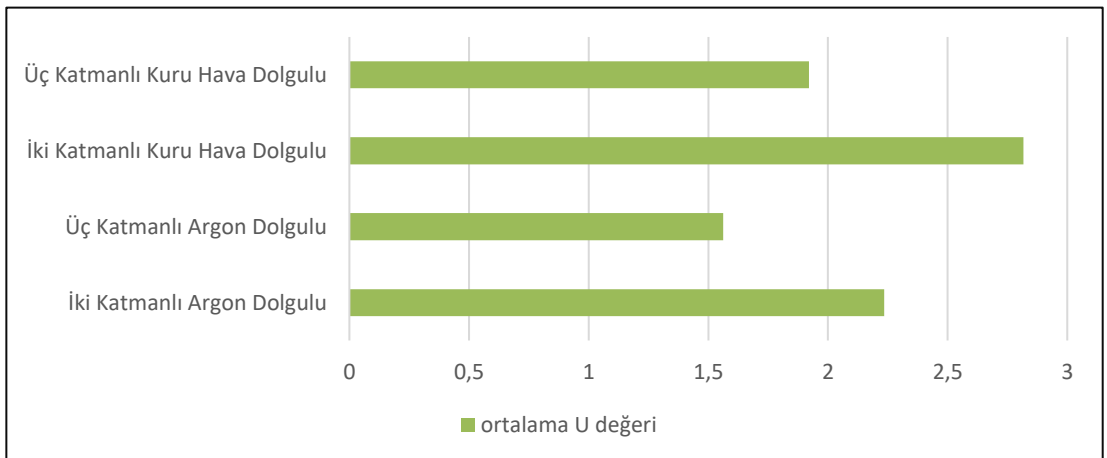
Isparta ili için yapılan hesaplamalarda iki katmanlı cam yerine üç katmanlı cam uygulamaları kullanıldığında ısı iletimi %12.5 oranında azalma, ısı direcinde %19.6 oranında artış, ısı geçirgenlikte ise %33 oranında azalma görülmüştür. Isı transferinde ise yaklaşık olarak %34 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.27. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama k değerlerinin karşılaştırılması

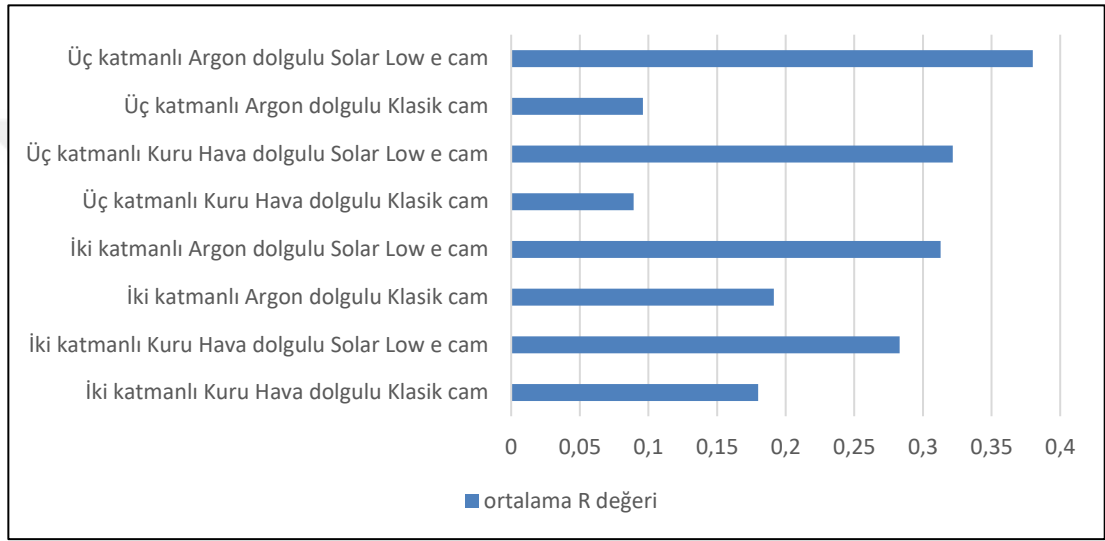


Şekil 4.28. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama R değerlerinin karşılaştırılması

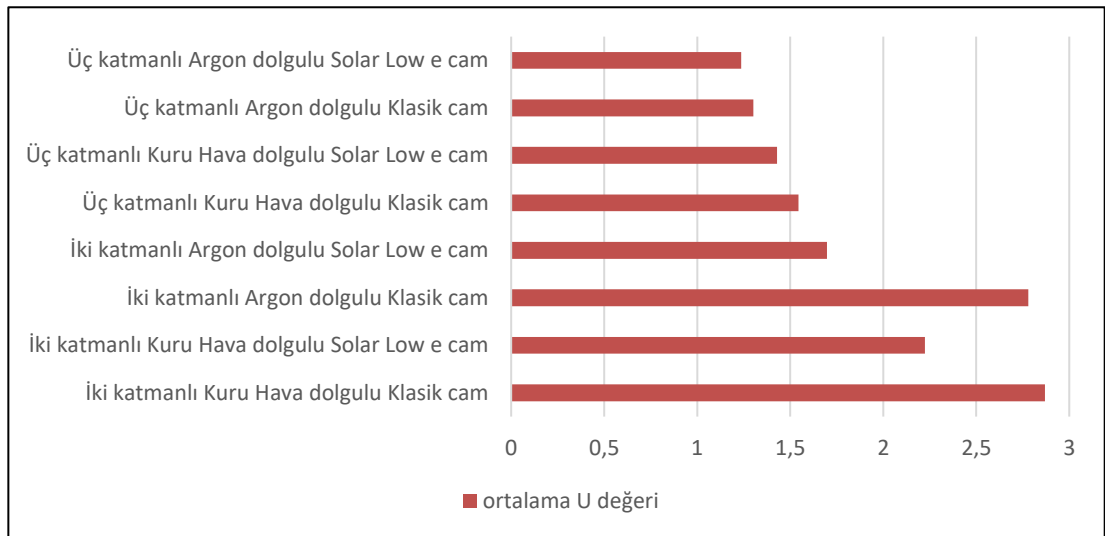


Şekil 4.29. İki ve üç katmanlı camların gaz dolgu bazında ortalama U değerlerinin karşılaştırılması

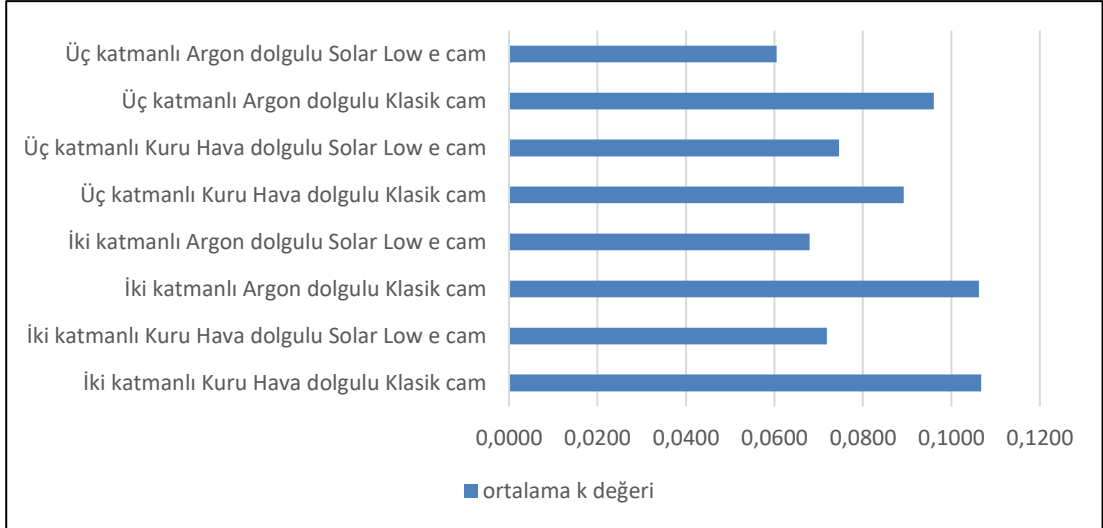
Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29’da iki ve üç katmanlı argon ve kuru hava dolgulu cam uygulamaları için yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan ısı iletkenlik katsayıları (k), ısı ılençleri (R) ve ısı ıeçirgenlik katsayılarının (U) ortalaması alınıp karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu üç katmanlı argon dolgulu cam uygulamasının daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Üç katmanlı argon dolgulu camın ısı ıletimi, 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 hesaplanmıştır.



Şekil 4.30. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan R değeri ılenlerinin karşılaştırılması



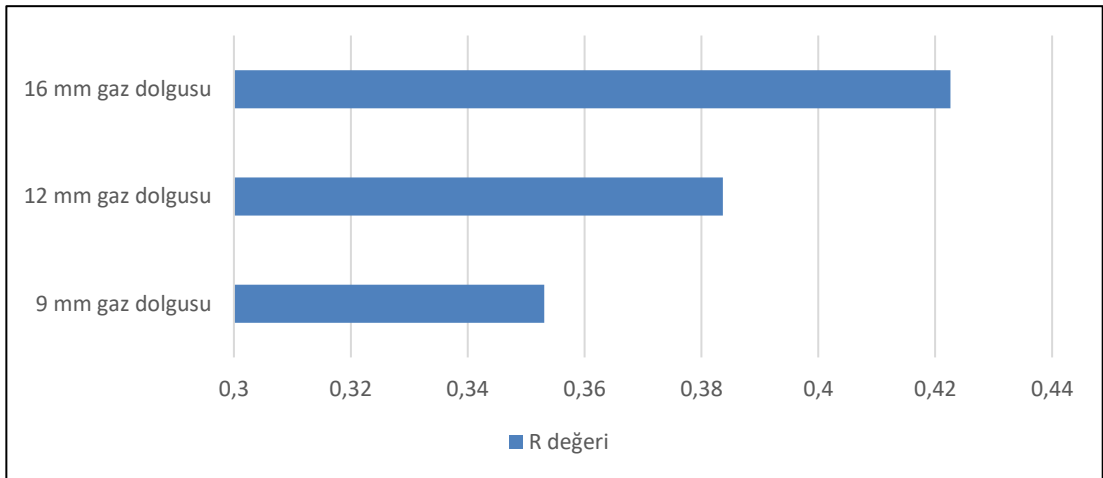
Şekil 4.31. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan U değeri ılenlerinin karşılaştırılması



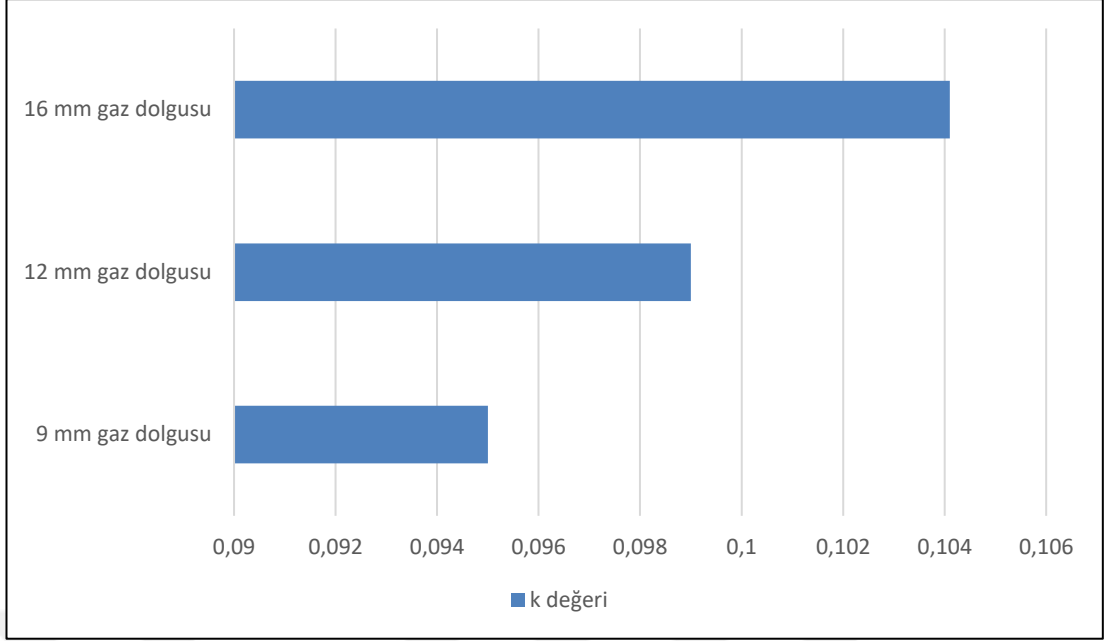
Şekil 4.32. Cam kaplama niteliklerine göre farklı cam kalınlıklarına sahip cam uygulamalarının ortalaması alınan k değerlerinin karşılaştırılması

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.

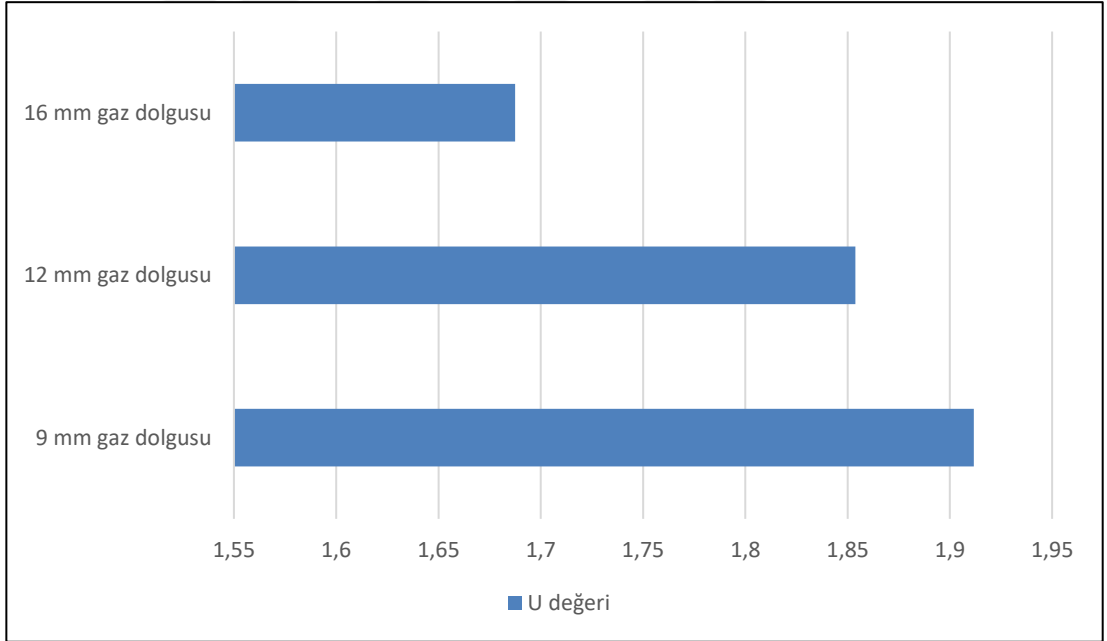
Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 incelendiğinde üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e cam uygulamasının ısı direnci değerinin en büyük olduğu, ısı geçirgenlik değerinin ise en az, ısı iletkenlik katsayısının da en az olduğu görülmüştür.



Şekil 4.33. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre R değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.34. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre k değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.35. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e kaplamalı cam uygulamalarında gaz dolgusu kalınlığına göre U değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te görüldüğü gibi 16 mm kalınlığa sahip gaz dolgulu cam uygulamasının diğer cam uygulamalarına oranla ısı iletkenliği ve ısı iletkenlik katsayılarının en düşük, ısı direncinin ise daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yıllık enerji sarfiyatının %40'ı ile %60'ını binalar oluşturmaktadır. 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. Dışa bakan duvarların toplam alanlarının %12'sini camlar, pencereler oluşturmaktadır. Bu oran küçük gibi gözükse de cam uygulamalarındaki bileşke ısı transfer katsayısının yüksek olmasından kaynaklı ısı kayıp oranları fazla çıkmaktadır.

Bu çalışmada Isparta ili için optimum cam katman sayısı, cam kaplaması, gaz dolgusu kalınlığı, gaz dolgusunun niteliği araştırılıp belirlenmiştir. İdeal değerlerin belirlenip camlardan olan ısı kaçaklarının daha aza indirgenip ya da yavaşlatılarak ısı yalıtımının ve ısı konforunun iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Böylelikle ısı ve enerji verimliliği artacağından iklimlendirme için kullanılan enerji sarfiyatı azalacaktır. Azalan enerji sarfiyatı sonucunda kışın ısıtma, yazın soğutma için harcanan maliyetlerde de azalma görülecektir.

Araştırmalar sonucu üç katmanlı cam uygulamaları, çift katmanlı cam uygulamalarına oranla ısı iletiminde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Şekil 4.24, 4.25 ve 4.26'da görüldüğü gibi iki katmanlı cam yerine üç katmanlı cam kullanıldığında ısı iletimi %12.5 oranında azalma, ısıl direcinde %19.6 oranında artış, ısıl geçirgenlikte %33 oranında azalma, ısı transferinde ise yaklaşık olarak %34 azalma ortaya çıkmıştır. Isparta ili için yapılan hesaplamalarda ısı tasarrufu için çift katmanlı camlar yerine üç katmanlı camın tercih edilmesi önerilmektedir.

Gaz dolgusu niteliği incelendiğinde ise Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da görüldüğü gibi üç katmanlı argon dolgulu camın ısı iletimi, üç katmanlı kuru hava dolgulu cama oranla %10 daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Isparta ili için kuru hava dolgusu yerine argon gazının, gaz dolgusu olarak kullanıldığında ısı yalıtımı bakımında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ek olarak üç katmanlı argon dolgulu camın ısı iletimi, iki katmanlı argon dolgusuna oranla %2, iki katmanlı kuru hava dolgusuna oranla %31.5 daha iyi sonuçlar vermiştir.

Camın kaplama özelliği bakımından incelendiğinde ise Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de görüleceği üzere üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e cam uygulamasının verimlilik açısından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e cam uygulamasının diğer cam uygulamalarına göre ısı geçirgenliğinin ve ısı iletkenlik katsayısının en küçük, ısı direncin ise en büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda Isparta ili için üç katmanlı argon dolgulu Solar Low-e cam uygulamasının tercih edilmesi ısı verimliliğini arttıracaktır.

Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 incelendiğinde ise 16 mm kalınlığa sahip gaz dolgulu cam uygulamasının diğer cam uygulamalarına oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. 16 mm gaz dolgusu kalınlığının optimum kalınlık olarak belirlenmiştir. 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 Çizelge 4.19’da görüldüğü gibi, TS 825’de 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.

KAYNAKLAR

- Anonim (2015). Binalarda Isı Yalıtımı ile Güneş Kontrolün Önemi. (<https://docplayer.biz.tr/272847-Binalarda-isi-yalitimi-ile-gunes-kontrolunun-onemi.html>). (Son erişim tarihi: 08.06.2022)
- Anonim (2019). On Birinci Kalkınma Planı. [https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/Onbirinci KalkinmaPlani .pdf](https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/Onbirinci-KalkinmaPlani.pdf). (Son erişim tarihi: 06.12.2021)
- Anonim (2021a). Petrol Krizi. https://tr.wikipedia.org/wiki/1973_Petrol_Krizi. (Son erişim tarihi: 06.12.2021)
- Anonim (2021b). Ocak Ayı Atlası. [https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/icerikler/ atlas _ocak_small-20210126120540.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/icerikler/atlas_ocak_small-20210126120540.pdf). (Son erişim tarihi: 06.12.2021)
- Anonim (2021c). Pencereelerde Camın Önemi ve Cam Çeşitleri. <https://www.firatpen.com.tr/pvc-pencereelerde-camin-onemi-ve-cam-cesitleri>. (Son erişim tarihi: 06.12.2021)
- Anonim (2022). İki Cam Arasına Hangi Gaz Konulur. https://burkaenerji.com/enerji/iki-cam-arasina-hangi-gaz-konulur-mukemmel-cevap.html#Cift_cam_arasinda_hangi_gaz_var. (Son erişim tarihi: 06.05.2022).
- Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building And Environment*, 40, 353-366. doi:10.1016/j.buildenv.2004.05.01.
- 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.
- 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. (2003). Laminated glass plate: revealing of nonlinear behavior. *Computers and Structures*, 81, 2659-2671. doi:10.1016/S0045-7949(03)00325-0.
- 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.
- Bayındır, S. M. (2010). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Avrupa Birliği ve Türkiye Uygulamaları*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü)
- Çengel, Y. (2003). *Heat Transfer: A practical Apporoach*. McGraw Hill Yayıncılık.
- 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.
- Dylewski, R. & Adamczyk, J. (2018). *Optimum Thickness of the Thermal Insulation Layer from the Economic and Ecological Perspective*. 4. Uluslararası Bina Enerjisi ve Çevre Konferansı. Avustralya, 5-9.
- Edel M. T. (1997). *The effect of temperature on the bending of laminated glas units*. (Master's thesis, Texas Agricultural and Mechanical University)
- Eroğlu, İ., Çoban, M. & Kangal, N. (2018). Temiz enerji kapsamında TR83 bölgesinin değerlendirilmesi. *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 7, 83-105.
- 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.
- 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.
- Hooper, J. A. (1973). On the bending of architectural laminated glass. *International Journal of Mechanical Sciences*, 15, 309-323. doi:10.1016/0020-7403(73)90012-X.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., & Derbentli, T. (2010). *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*. Literatür Yayıncılık.
- Kaplan, S., Sayın, B. & Şengül, D. (2005). *Su ve Isı Yalıtımının Yapılarda Uygulanmasının Gerekliliği ve Yalıtımdaki Uygulamaların Emniyet ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi*. MBGAK 2005: Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi. Kasım 17-19, İstanbul, 457-466.
- Karasu, B., Bereket, O., Biryan, E. & Sanoglu, D. (2017). The latest developments in glass science and technology. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4, 209–233. doi:10.31202/ecjse.318204.

- Khan, M. A., Syed, A. K., Ijaz, H. & Shah, R. B. (2018). Experimental and numerical analysis of flexural and impact behaviour of glass/pp sadwich panel for automotive structural applications. *Advanced Composite Materials*, 27, 367–386. doi:10.1080/09243046.2017.1396199.
- Koçu, N. (2000). Yapılarda Isı Yalıtımının Enerji Tasarrufuna ve Hava Kirliliğine Etkisi. *Yeni İpek Yolu K.T.O Dergisi*, 145, 25-29.
- Koçu, N. & Korkmaz, Z. (2002). Konya Çevresinde Yapılarda Isı Yalıtım Uygulamalarının TSE 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.
- Oğan, N. (2008). *Enerji Verimliliği Teknik Kitapçık*. İTÜ Enerji Enstitüsü ve Heinrich Böll Stiftung Derneği Türkiye Temsilciliği. Eylül, İstanbul.
- Özrahat, E. (2007). *Değişik Gazlar İçin Çift Camlı Pencere Boyutlarının Sayısal İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü)
- Özer, M. (2006). *Yapılarda Isı ve Su Yalıtımları*. Maya Basın Yayın.
- 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.
- TS 825, (2009). Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. TSE, Revize Tadilatı, Ankara.
- Underwood, C.P. & Yik, W.H. (2004). *Modelling Methods For Energy İn 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.

ÖZGEÇMİŞ

