



Havadan-havaya ısı geri kazanımında levhalı ısı değiştirici akış düzenlemesinin sayısal incelenmesi ve karşılaştırılması

Numerical investigation and comparison of plate heat exchanger flow arrangement in air-to-air heat recovery

Murat Ünverdi¹ , Hasan Küçük^{2,*} 

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 09010, Aydın, Türkiye

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

Öz

Isı geri kazanımlı (IGK) havalandırma sistemleri, kirli havayı dış ortama atarken, eşit debide taze havanın (dengelenmiş havalandırma) iç ortama sürekli beslenmesi amacıyla kullanılmaktadır. IGK havalandırma sistemleri, iç ortamın ısıl konfor koşullarından ödün vermeden, hava kalitesini iyileştirmektedir. Bu çalışmanın amacı, küçük bir konutun taze hava ihtiyacını karşılayacak havadan havaya zıt-yarı çapraz akışlı (ZYÇA) bir levhalı ısı değiştiriciyi (LID) sayısal tasarlamaktır. ZYÇA LID'nin ısıl ve hidro dinamik performansı; temiz tarafta geri kazanılan ısıl güç, duyulur ısıl etkenlik, ortalama ısı akısı, özgül ısıl güç (ÖİG), özgül fan gücü (ÖFG) ve hidro dinamik-ısıl büyüme oranı (HIBO) için değerlendirilmiştir. ZYÇA LID'nin ısıl ve hidro dinamik performansı, yarı-çapraz akışlı (YÇA) ve çapraz akışlı (ÇA) LID'lerin ısıl ve hidro dinamik performanslarıyla karşılaştırılmıştır. Küçük bir konutun taze hava ihtiyacı olan 125 m³/h debiye kadar, LID tasarımına zıt akış bölgesinin eklenmesi; geri kazanılan ısıl gücü ve basınç düşümünü çok fazla etkilemezken, ortalama ısı akısı ve ÖİG'ü olumsuz etkilemiştir. Ancak, zıt akış bölgesi LID'nin ısıl etkenliğini artırarak, ÖFG ve HIBO'nı iyileştirmiştir.

Anahtar kelimeler: Isı geri kazanımlı havalandırma, Levhalı ısı değiştirici, Akış düzenlemesi, Isıl ve hidro dinamik performans

1 Giriş

Kapalı ortamlarda, farklı kaynaklardan yayılan ve iç hava kalitesini bozan kirletici salınımları uzaklaştırıp azaltmada, mekanik havalandırma kullanılır. Merkezi havalandırma sistemleri (MHS), en yaygın kullanılan mekanik havalandırma yöntemidir. MHS'lerinde; tek bir merkezde şartlandırılan taze dış hava, uzun kanallarla, bağımsız kapalı ortamlara dağıtılır. İnsanlardan ve diğer kaynaklardan yayılan salınımlarla kirlenen kapalı ortamların havası ise egzoz kanalları ile havalandırma santralinde toplanıp, dış ortama atılır. MHS'lerinde; farklı bağımsız hacimlere gönderilen hava debilerinin, istenilen ısıl koşullar ve iç hava kalitesi korunarak, kontrolü (dengelenmesi) en önemli problemlerdendir. MHS'lerindeki diğer önemli bir problem,

Abstract

Heat recovery (HR) ventilation systems are used to constantly supply an equal flow rate of fresh air to the indoors (balanced ventilation) while exhausting the stale air. HR ventilation systems help improve air quality without compromising the thermal comfort of the indoors. This study aimed to numerically design an air-to-air quasi-counter flow (QCOF) plate heat exchanger (PHE) for the fresh air requirement of a small residence. The study evaluated the thermal and hydrodynamic performance of the QCOF-PHE for the recovered thermal power on the fresh side, sensible thermal effectiveness, average heat flux, specific thermal power (STP), specific fan power (SFP), and hydrodynamic-thermal amplification ratio (HTAR). The study compared the thermal and hydrodynamic performance of the QCOF-PHE with that of the quasi-cross flow (QCRF) and cross-flow (CF) PHEs. The addition of a counter flow area to the PHE design did not affect the recovered thermal power and pressure drop much but negatively affected the average heat flux and STP, up to 125 m³/h flow rate, which is the fresh air requirement of the residence. However, the counter flow area increased the thermal effectiveness of the PHE, improving the SFP and the HTAR.

Keywords: Heat recovery ventilation, Plate heat exchanger, Flow arrangement, Thermal and hydrodynamic performance

çok uzun gidiş ve dönüş kanallarındaki (sürtünme) basınç kayıplarından kaynaklı yüksek işletme (fanlarda tüketilen elektrik enerjisi) maliyetleridir. Ayrıca, herhangi bir kapalı ortamda oluşan kirleticilerin, diğer bağımsız hacimlere yayılması da, baypas havalı veya IGK çalıştırılan MHS'lerinin zayıf yönleri arasında sayılabilir [1].

MHS'lerinde karşılaşılan bu problemler nedeniyle, her bir hacmin bağımsız havalandırıldığı yerel havalandırma sistemleri (YHS), mekanik havalandırmada alternatif olabilir. YHS'lerinde, herhangi bir hacimden kaynaklı kirleticilerin diğer bağımsız hacimlere yayılması engellendiği gibi, uzun kanalların neden olduğu aşırı yüksek elektrik tüketimi de ortadan kalkar. Ayrıca YHS'leri ile her bir kapalı hacimde, iç hava kalitesinin ve ısıl koşulların

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kucuk@sakarya.edu.tr (H. Küçük)

Geliş / Received: 04.07.2022 Kabul / Accepted: 30.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1140364

bağımsız kontrolü de mümkündür. Üstelik YHS'lerinde, egzoz havasının taşıdığı duyulur ve gizli ısının geri kazanılması, MHS'lerine göre daha kolaydır. IGK-YHS ile ısıtma ve soğutma sezonlarında, filtrelenmiş, taze ve temiz dış havaya, ön ısıtma veya ön soğutma uygulanarak, ısıtma, soğutma ve elektrik enerjisi maliyetlerinin düşürülmesi mümkündür. Bu nedenle IGK-YHS'leri, konutlar başta olmak üzere, kullanımı en fazla yaygınlaşan mekanik havalandırma yöntemlerindedir [2, 3].

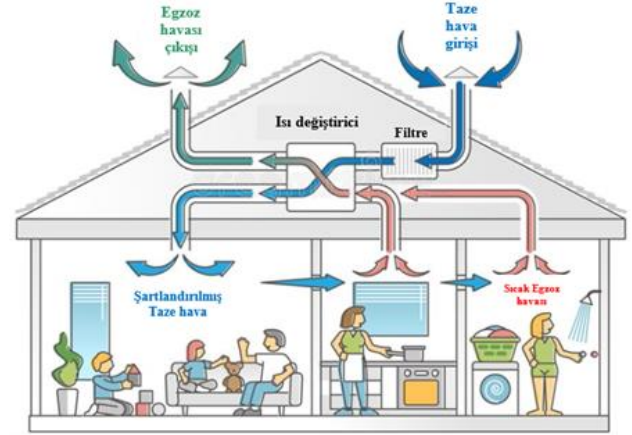
IGK mekanik havalandırma, yaklaşık 50 yıldır bilinmektedir. Ancak şehirlerde nüfusun artmasıyla, ısıtma sistemlerinden kaynaklı emisyonların yakın çevrede ve küresel ölçekli olumsuz etkileri önem kazanmıştır. Bu nedenle, baca gazı salınımlarına ve enerji tüketimine yasal kısıtlar getirilmiştir. Bunlara ek olarak, enerji maliyetlerindeki sürekli ve aşırı artış, dış kabuğu ısı yalıtımlı ve hava sızdırmaz binaları yaygınlaştırmıştır. Tüm bu gelişmelerle, IGK havalandırma sistemleri yeniden gündeme gelmiştir. Isı yalıtımsız bir binanın ısıtma ve soğutma amaçlı yıllık enerji tüketimi, IGK havalandırma ile yaklaşık %30 azaltılabilir. Isı yalıtımlı ve hava sızdırmaz dış cephe binalarda ise IGK havalandırma ile ısıtma amaçlı enerji tüketiminin ve sera gazı salınımlarının daha yüksek (%80'e varan) oranlarda azaltılabileceği bildirilmiştir [4].

IGK-YHS genellikle; bir levhalı ısı değiştirici, taze hava ve egzoz havası kanalları ile fanlardan oluşur. Kapalı hacimde kirlenen iç ortam (egzoz) havası, iklim koşullarına ve mevsime göre; ya ısının çekileceği (geri kazanılacağı) kaynaktır ya da atık ısının verileceği (atılacağı) kaynak olur. IGK havalandırma ile, egzoz havasının ısı potansiyelinin yaklaşık %60-95'ini geri kazanmak ve konutların enerji verimliliğini artırmak mümkündür [5].

IGK-YHS, iç hava kalitesinin korunması için ihtiyaç duyulan şartlandırılmış taze dış havayı, kapalı ortamın sıcaklığını da koruyarak, sağlamak üzere tasarlanır. Başka bir ifadeyle, IGK havalandırmanın amacı, iç ortamda kirlenen hava ile dış ortamdan alınan taze hava arasında, duyulur ve gizli ısı (entalpi) alış-verişini sağlamaktır (Şekil 1) [6, 7]. Bu amaçla tasarlanan çok farklı IGK havalandırma sistemleri bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanları; ısı tekerli (rotary thermal wheel), levhalı ısı değiştiricili (plate heat exchanger) ve ısı borulu (heat pipe), sistemlerdir. Sayılan sistemlerin her birinin kendine has özellikleri, üstünlükleri ve zayıf yönleri vardır. Sistem seçimi, uygulamanın yapılacağı binanın özelliklerine, büyüklüğüne ve varsa diğer özel isteklere uygun yapılır. Tablo 1'de uygulamada yaygın kullanılan IGK havalandırma sistemlerinin özellikleri verilmiştir [7].

Binalar, şehir hayatının tüm dünyada yaygınlaşmasıyla, ilişkili diğer tüm alanlarda olduğu gibi enerji tüketiminde de büyük önem kazanmıştır. Binalarındaki (inşa, kullanım, bakım ve geri dönüşüm) enerji tüketimlerinin, küresel toplam enerji tüketimindeki payı yaklaşık %40'tır [8, 9]. Isıtma, havalandırma ve iklimlendirmenin (Heating Ventilating and Air Conditioning-HVAC), binaların enerji tüketimindeki payı da %40-60 mertebesinde [7, 10]. Bu başlık altında sadece havalandırmanın payı ise %20-30'ları bulmaktadır [11]. Binaların ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi, bina kabuğunun ısı yalıtımı ve hava sızdırmazlığı

iyileştirilerek, azaltılabilir. Bu önlemler, binanın dış ortama ısı alış-verişini azalttığı gibi iç ortam ile dış ortam arasındaki kontrolsüz hava sızıntısını da azaltır. Başka bir ifadeyle, binada ısı konfor amaçlı enerji tüketimi azaltılırken, iç hava kalitesinin kısa sürede bozulması, mekanik havalandırma zorunlu hale getirir. Çünkü iç hava kalitesinin korunması, hem binayı kullanan insanların sağlığı ve performansları bakımından önemlidir, hem de binanın bakım ve onarım giderleri ile binanın kullanım ömrü üzerinde etkilidir [12, 13].



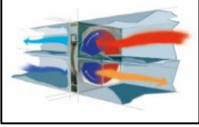
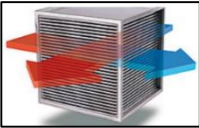
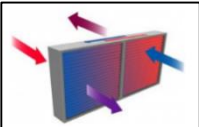
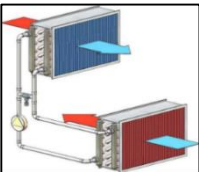
Şekil 1. Isı geri kazanımlı havalandırma sistemi örneği (şematik gösterim) [6]

IGK-YHS'lerinin önemi, 2019'da ortaya çıkıp hızla tüm dünyada yayılan ve Koronavirüs (COVID-19) pandemisi olarak bilinen şiddetli akut solunum sendromu ile daha da artmıştır. Hastalık, insanların nefes alıp verirken, konuşurken, öksürürken, hapşırırken havaya yaydıkları ve uzun süre havada asılı kalabilen damlacıkları (aerosol), diğer insanların solunmasıyla bulaşmaktadır. Hastalığın, özellikle toplu bulunan ve uzun zaman geçirilen kapalı ortamlarda daha fazla yayıldığı bilinmektedir. Kapalı ortamların havalandırılması, enfeksiyonun yayılmasını azaltmak için uygulanabilecek en önemli tedbirler arasındadır. Ancak, baypas havalı ya da kirli ve temiz havanın karışmasının engellenemediği ısı geri kazanım cihazlarının kullanıldığı MHS'leri, tam tersine, hastalığın yayılmasını artırıcı etki yapmaktadır. Bu nedenle, MHS'lerinin, %100 dış havayla ya da egzoz ve dış hava akımlarının karışmasına neden olan ısı geri kazanım cihazları iptal edilerek kullanılması önerilmiştir. Dolayısıyla COVID-19 pandemisi, egzoz havası ile temiz hava arasında karışmanın olmadığı (ya da en az düzeyde olacağı), IGK-YHS'lerinin önemini bir kez daha gündeme getirmiştir [14, 15].

Küçük bir konutun IGK havalandırma ve iklimlendirme sisteminde kullanılmak üzere tasarlanan, ZYÇA LID ile sayısal performansları karşılaştırılan YÇA ve ÇA LID'lere yakın kapasitelerdeki LID'lerin, ısı ve hidrodinamik performansının sayısal ve deneysel yöntemlerle incelendiği çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Zhang [16] ZYÇA (quasi-counter flow) LID'nin 3-boyutlu sayısal modelini oluşturarak, modelin geçerliliğini deneysel incelemiştir. ZYÇA LID'nin, zıt akış bölgesinin

Tablo 1. Yaygın kullanılan ısı geri kazanımlı havalandırma sistemlerinin özellikleri [7]

Isı geri kazanımlı havalandırma sistemi	Üstünlükler	Zayıflıklar	Performans değişkenleri	Verim (%)	Basınç düşümü (Pa)	Nem kontrolü
Isı tekeri (Rotary thermal wheel) 	-Yüksek verim, -Duyulur ve gizli ısı geri kazanımı, -Kompakt tasarım, -Donma kontrolü mümkün.	-Egzoz havası ve temiz hava karışır, -Bitişik hava akımları gerekir, -Mekanik tahrik için enerji gerekir.	-Dönme hızı, -Hava hızı, -Isı tekerinin gözenekliliği.	80+	4-45	Evet
Levhali ısı değiştirici (Plate heat exchanger) 	-Haraketli parça yok, -Yüksek ısı taşınım katsayısı, -Hava akımları karışmaz, -Duyulur ve gizli ısı kazanımı, -Donma kontrolü mümkün.	-Isı değiştiricide yüksek basınç kaybı, -İki ayrı hava akımı gerekir, -Yoğuşma riski, -Soğuk iklimlerde donma riski.	-Levha malzemesi, -İşletme basıncı, -Sıcaklık, -Akış düzenlemesi.	70-90	7-30	Evet
Isı borusu (Heat pipes) 	-Haraketli parça yok, -Hava akımları karışmaz, -Düşük basınç kaybı, -Kompakt tasarım, -Her iki yönde ısı geri kazanımı mümkün.	-Hava akımları yakın olmalı, -Isı taşıyan aracı akışkan, yerel iklim koşullarına uygun olmalı.	-Isı taşıyan aracı akışkan, -Temas süresi, -Konumlandırma, -Yapısal tasarım.	80	1-5	Hayır
İkincil akışkan döngüsü (Run-around) 	-Hava akımları ayrı olabilir, -Hava akımları karışmaz, -Düşük basınç kaybı, -Farklı kaynaklardan ısı geri kazanımı mümkün.	- İkincil akışkanı taşımak için birden fazla pompa gerekli, -Mevcut sistemlere uyumu zor, -Düşük verim, -Yüksek maliyet.	-Isı değiştirici türü, -İkincil akışkan türü, -Isı kaynağı.	50-80	~1	Hayır

uzunluğu ve genişliği 185x185 mm, kanal yüksekliği 4 mm, toplam kanal sayısı 114 ve tepe açısı 90°'dir. Egzoz ve taze hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark 8°C'dir. Araştırmacı, 40-200 m³/h debi aralığında; ZYÇA LID'nin duyulur ısıl etkenliğinin %84.7-%52.5 ve basınç düşümünün 1.5-6.5 Pa olduğunu elde etmiştir. Duyulur ısıl etkenliğin, eklenen yarı çapraz akış bölgesiyle, ÇA LID'e göre ortalama %5 iyileştiği belirtilmiştir.

Zhang vd. [17] 150 m³/h havalandırma debisi için farklı levha malzemeleriyle tasarladıkları, ÇA LID'lerin duyulur ısıl etkenliklerini deneysel incelemişler ve sonuçları sayısal model tahminleriyle karşılaştırmışlardır. ÇA LID'lerin; levha boyutları 185x185 mm, kanal yükseklikleri 2 mm, toplam kanal sayıları 230 ve tepe açısı 90°'dir. Egzoz ve taze hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark 8°C'dir. Araştırmacılar, LID'lerin deneysel duyulur ısıl etkenliklerinin, levha malzemesinden bağımsız olarak; 100-200 m³/h debi aralığında %80-%65, tasarım debisi olan 150 m³/h'de ise %75 olduğunu elde etmişlerdir. Ancak çalışmada basınç düşümü ile ilgili bir sonuç bildirilmemiştir.

AL-Waked vd. [18] 3-boyutlu sayısal LID modelleriyle; kanal yüksekliği (hidrolik çap), Reynolds sayısı ve akış düzenlemesinin (zıt, çapraz, yarı çapraz ve aynı yönlü) ısıl etkenliğe etkilerini, 100-200 m³/h debi aralığında, incelemişlerdir. ZYÇA LID'nin geometrik özellikleri ve

hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark, Zhang vd. [17]'nin incelediği LID ile aynıdır. Araştırmacılar, sayısal modellerinin geçerliliğini, Zhang vd. [17]'nin deneysel duyulur ısıl etkenlik sonuçlarıyla doğrulamışlardır. ÇA LID'de duyulur ısıl etkenliğin %77-%67 ve basınç düşümünün 200-450 Pa olduğu, debi arttıkça ısıl etkenliğin azaldığı ve kanal hidrolik çapı arttıkça aynı hacimsel debide akış hızının azalmasından dolayı basınç düşümünün de azaldığı belirtilmiştir.

Lee vd. [19], levha boyutları 319x319 mm, kanal yükseklikleri 2 mm ve 2.6 mm olan iki farklı ÇA LID prototipinin, ısıl etkenliğini deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, geliştirdikleri yarı-ampirik ısı geçişi modeli ile deneysel sonuçları doğrulamışlardır. Deneylerde hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark; yaz koşullarında 11°C iken, kış koşullarında 20°C'dir. Araştırmacılar 150, 250 ve 350 m³/h debiler için yaptıkları deneylerde; kanal yüksekliği 2 mm olan LID'nin, ısıl etkenliğinin ve basınç düşümünün %82-%72 ve 35-95 Pa, kanal yüksekliği 2.6 mm olan LID'nin ısıl etkenliğinin ve basınç düşümünün %78-%68 ve 25-60 Pa aralığında olduğunu elde etmişlerdir.

Nasif vd. [20], levha boyutları 720x300 mm ve kanal yüksekliği 6 mm olan, 98 kanallı, akışın levhalar arasına yerleştirilen akış bölücülerle Z şeklinde (sırasıyla; çapraz, paralel ve zıt yönlerde) düzenlendiği özel tasarım LID'nin

ısı performansını 0.3–3 m/s aralığında deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, 0.3–3 m/s aralığındaki duyulur ısıl etkenliğin %75–%40 ve 0.3–2 m/s aralığındaki basınç düşümünün ise 25–375 Pa olduğunu elde etmişlerdir.

Mardiana-Idayu ve Riffat [21] genişliği-uzunluğu 545x645 mm ve zıt akış bölgesi uzunluğu 245 mm olan ZYÇA LID'nin performansını deneysel incelemişlerdir. Kanal yüksekliğinin belirtilmediği 56 kanallı LID'de, 1–3 m/s hız aralığında duyulur ısıl etkenlik ve basınç düşümünün incelendiği deneylerde, egzoz ve taze hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark $\sim 7^\circ\text{C}$ 'dir. Araştırmacılar, ısıl etkenliğin %65–%47 ve basınç düşümünün 8–30 Pa olduğunu bildirmişlerdir.

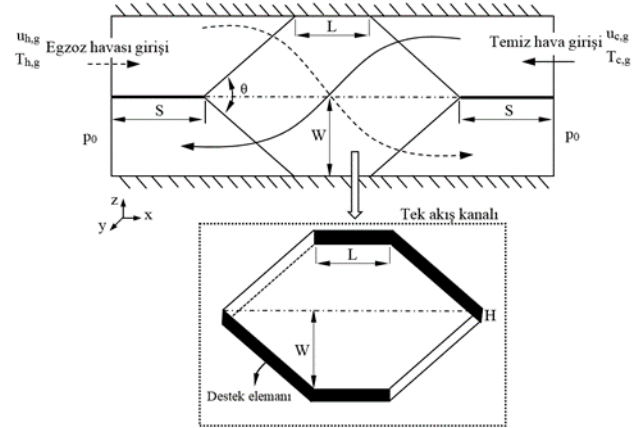
Bu çalışmada, üç-beş kişinin yaşadığı bir konutun, 50–200 m³/h aralığındaki taze hava ihtiyacını karşılayacak, IGK–YHS'lerinde kullanılmak üzere, havadan havaya, ZYÇA LID tasarlanmıştır. Tasarlanan LID'nin, ısı geçişi ve basınç düşümü performansı sayısal yöntemle incelenmiştir. LID'ye eklenen zıt akış bölgesiyle; ısı geri kazanım cihazından LID kanallarına ve LID kanallarından ısı geri kazanım cihazına geçişte, akıştaki yön değişimlerinin yumuşatılması, LID kanallarındaki ortalama akış hızları düşürülerek havanın LID'de kalma süresinin artırılması hedeflenmiştir. Dolayısıyla, LID'ye eklenen zıt akış bölgesinin, hem ısıl hem de hidrodinamik performansta hedeflenen iyileşmeye etkileri değerlendirilmiştir. ZYÇA LID'nin sayısal çözüm sonuçları, aynı amaca yönelik olarak ancak farklı akış düzenlemeleriyle tasarlanmış LID'lerin performanslarıyla karşılaştırılmıştır. Performansı karşılaştırılan ısı değiştiriciler; bu çalışmada ele alınan ZYÇA (quasi-counter flow) LID'le, daha önce sayısal incelenen [22] YÇA (quasi-cross flow) ve ÇA (cross flow) LID'lerdir. LID'lerin performansları, 6 farklı ısıl ve hidrodinamik performans parametresi ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

2 Problemin tanımı, sayısal tasarım, analiz ve sınır şartları

ZYÇA LID'nin tasarımında, küçük kapasiteli IGK–YHS'leri için geçerli debi aralığı (50–200 m³/h) seçilmiştir. Performansı incelenen ZYÇA LID ve karşılaştırmada kullanılan diğer iki LID'nin; kanal yükseklikleri (H=2 mm), toplam kanal sayıları (N=100), levha genişlikleri (W=70.7 mm) ve levha kalınlıkları (t=0.2 mm) eşittir. Ayrıca tüm LID'lerde levha malzemesi kâğıt seçilmiştir. Performansı incelenen ZYÇA LID'nin, zıt akış bölümünün uzunluğu L=43 mm'dir. LID'nin giriş ve çıkışında akış kesitinin ani değişiminden kaynaklanacak yerel basınç kayıplarını da dikkate almak üzere, sayısal modelde, temiz hava ve egzoz havası girişindeki-çıkışındaki akış hacimleri uzatılmıştır (S=50 mm). Uzatılan bu giriş ve çıkıştaki akış hacimleri, adyabatik kabul edilmiştir. LID kanallarında laminar akış koşullarına uygun ortalama akış hızları seçilerek, havanın LID'de kalma süresinin artırılması, yüksek basınç kaybının ve aşırı gürültünün engellenmesi hedeflenmiştir. Adyabatik giriş bölgesinden LID kanallarına girişte ve LID kanallarından adyabatik çıkış bölgesine genişlemede, ani kesit değişimine bağlı oluşacak türbülans etkileri nedeniyle, sayısal çözümde, Standart k-ε türbülans

modeli seçilmiştir. Sayısal çözümlerde, ılıman iklim kış (ısıtma) koşullarına uygun olarak, temiz hava giriş sıcaklığı (283K) ve egzoz havası sıcaklığı (298K) arasındaki fark, 15K seçilmiştir. En uygun çapraz akışlı LID tasarımında, Taguchi yöntemi ve sayısal çözümlerin kullanıldığı çalışmada, levha malzemesinin ısıl performansa etkisinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu belirlenmiştir [23]. Bu nedenle tüm ısı değiştiricilerde, işlenmesi ve geri dönüşümü daha kolay olan kâğıt (k=0.09 W/mK), levha malzemesi olarak seçilmiştir. Böylece LID'nin imalat, bakım ve çevresel etki maliyetleri en düşük seviyede olacaktır. Sayısal çözümlerde akış hızları, dengelenmiş havalandırmaya (temiz hava ve egzoz havasının hacimsel debileri eşit) uygun seçilmiştir.

3-boyutlu sayısal LID modeli; ısıl koşullar ve akış koşulları bakımından periyodik tekrarlanan akış bölgeleri ile sınırlandırılmıştır. Başka bir ifadeyle, LID'nin temiz hava ve egzoz havası kanallarının orta düzleminde simetrik akış sınır şartı kullanılarak, çözüm süreleri kısaltılmıştır. Havanın termodinamik özellikleri Kaynak [24]'den alınmıştır. Sayısal çözümlerden; temiz hava ve egzoz havasının LID'den çıkış sıcaklıkları ile temiz hava ve egzoz havası tarafında oluşacak basınç düşümleri elde edilmiştir. Sayısal çözümler, sürekli akış koşullarında (zamandan bağımsız) yapılmıştır. Çözüm bölgesine (uzatılmış giriş hacimlerine) giriş kesitlerindeki akış hızları, düzgün yayılı (üniform) ve yatay doğrultudadır.



Şekil 2. ZYÇA LID'nin şematik resmi, boyutları ve sınır şartları

Çıkış kesitlerinde (uzatılmış çıkış hacimlerinden), sabit çıkış basıncı sınır şartı (atmosfer basıncı) seçilmiştir. Akışkanların termo-fiziksel özellikleri, LID'ye giriş sıcaklıklarında sabit kabul edilmiştir. Sayısal çözümlerde; yerçekimi etkisi, dış kuvvetler, ışınlama ısı geçişi ve nem geçişi ihmal edilmiştir. Tasarımı yapılan ZYÇA LID'nin şematik resmi, boyutları ve sayısal çözümlerde uygulanan sınır şartları Şekil 2'de verilmiştir. Sıkıştırılamaz kabul edilen hava akışı için Navier–Stokes ve türbülans modeli denklemleri, Ansys–Fluent sonlu hacimler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kodları ile ayrıştırılmış ve çözülmüştür. Denklemlerin ayrıştırılmasında, ikinci mertebeden ileri farklar (Second Order Upwind) kullanılmıştır. Hız–basınç ikilisi arasındaki dönüşüm için

SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması seçilmiştir. Sayısal çözüm bölgelerinin girişlerindeki türbülans yoğunlukları, %7'de sabit tutulmuştur. Sayısal çözümde yakınsama ölçütleri için geçerli (default) değerler (basınç: 0.3, momentum: 0.7, türbülans kinetik enerjisi: 0.8 ve türbülans yıkım oranı: 0.8 ve enerji: 1.0) kullanılmıştır. Tüm denklemler için sayısal yakınsama şartı 10^{-3} ve enerji denklemi için 10^{-6} 'dır. Sayısal çözümler, ortalama 250 iterasyonda tamamlanmıştır.

Bu çalışmadaki sayısal çözümler, daha önce ele alınan [22] YÇA ($\theta=60^\circ$) ve ÇA ($\theta=90^\circ$) LID'lerden farklı tepe açısı (θ) ile tasarlanan, ZYÇA ($\theta=70^\circ$) LID için yapılmıştır. Tasarımda, tepe açısı değiştirilerek LID'ye eklenen zıt akış bölgesiyle; ısı geri kazanım cihazından LID kanallarına ve LID kanallarından ısı geri kazanım cihazına geçişte (hava akımlarının) yön değişimlerinin yumuşatılması ve LID kanallarındaki ortalama akış hızları düşürülerek de havanın LID'de kalma süresinin artırılması hedeflenmiştir. Dolayısıyla, LID'ye eklenen zıt akış bölgesinin, hem ısı hem de hidrodinamik performansta hedeflenen iyileşmeye etkileri değerlendirilmiştir.

Sayısal çözüm için yapılan kabullere göre temiz hava ve egzoz havası tarafı için kütle ve enerjinin korunum denklemleri Denklem (1) ve (2)'de verilmiştir.

$$\dot{m}_{giren} = \dot{m}_{çıkan} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{giren} = \dot{E}_{çıkan} \quad (2)$$

Sayısal çözümlerin sonuçları, 6 farklı performans parametresi ile değerlendirilmiştir. LID'lerin ısı ve hidrodinamik performansının değerlendirilmesinde kullanılan parametreler ve performans ölçütleri; (1) temiz tarafta geri kazanılan ısı güç- \dot{Q}_{gk} , (2) duyulur ısı etkenlik- ε , (3) ortalama ısı akısı- $q_{ort.}$, (4) özgül ısı güç- \dot{OIG} , (5) özgül fan gücü- $\dot{ÖFG}$ ve (6) hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO'dır. Geri kazanılan ısı güç:

$$\dot{Q}_{gk} = \dot{m}c_p(T_{c,\varphi} - T_{c,g}) \quad (3)$$

Burada; \dot{Q}_{gk} (W) ısı güç, \dot{m} (kg/s) kütleli debiye, c_p (kJ/kgK) sabit basınçtaki özgül ısıya, $T_{c,\varphi}$ ($^\circ\text{C}$) temiz hava çıkış sıcaklığına ve $T_{c,g}$ ($^\circ\text{C}$) temiz hava giriş sıcaklığına karşılık gelmektedir. Duyulur ısı etkenlik:

$$\varepsilon = \dot{Q}_{gk} / \dot{Q}_{mak.} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{mak.} = \dot{m}c_p(T_{h,g} - T_{c,g}) \quad (5)$$

Burada; $\dot{Q}_{mak.}$ (W) ulaşılabilecek maksimum ısı güç ve $T_{h,g}$ ($^\circ\text{C}$) egzoz havası giriş sıcaklığına karşılık gelmektedir. Ortalama ısı akısı:

$$q_{ort.} = \dot{Q}_{gk} / A_{top.} \quad (6)$$

Burada; $q_{ort.}$ (W/m^2) ısı akısına ve $A_{top.}$ (m^2) LID'nin toplam alanına karşılık gelmektedir. Özgül ısı güç- \dot{OIG} :

$$\dot{OIG} = \dot{Q}_{gk} / V_{top.} \quad (7)$$

Burada; \dot{OIG} (W/m^3) özgül ısı güç ve $V_{top.}$ (m^3) LID'nin toplam hacmine karşılık gelmektedir. Fan gücü:

$$\dot{W}_{fan} = 2 \times \left(\frac{\dot{V}}{3600} \times \Delta p \right) \quad (8)$$

Özgül fan gücü- $\dot{ÖFG}$:

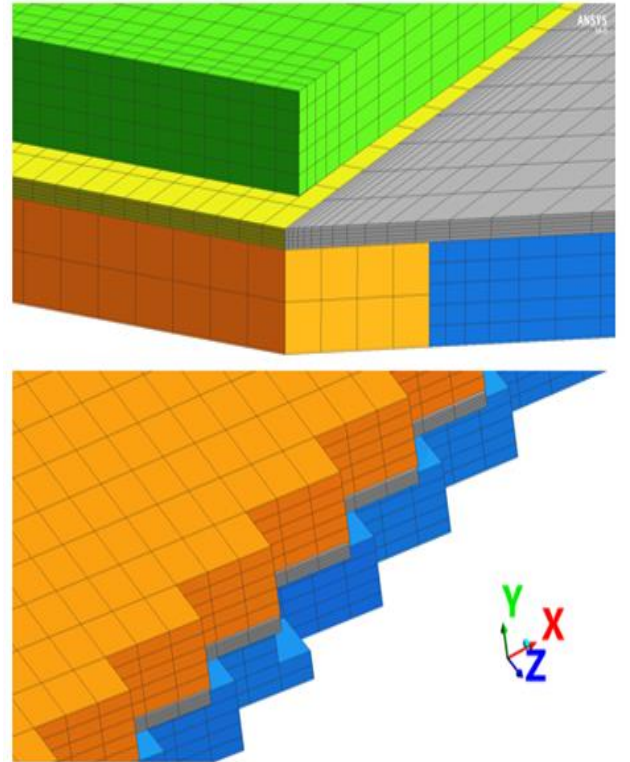
$$\dot{ÖFG} = \dot{W}_{fan} / \dot{V} \quad (9)$$

Burada; \dot{W}_{fan} (W) fanlardan hava akımlarına verilmesi gereken hidrodinamik güç, \dot{V} (m^3/h) hacimsel debiye, Δp (Pa) basınç düşümüne ve $\dot{ÖFG}$ ($\text{W}/\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) özgül fan gücüne karşılık gelmektedir. Hidrodinamik-ısı büyüme oranı (HIBO):

$$HIBO = \frac{\dot{Q}_{gk}}{\dot{W}_{fan}} \quad (10)$$

2.1 Ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması

LID'nin 3-boyutlu sayısal modellerinde; temiz hava ve egzoz havası kanallarında, ısı geçiş levhasında ve destek elemanlarında yapısal ağ kullanılmıştır (Şekil 3). LID akış kanallarında; levha yüzeyine ve destek elemanlarına yakın akış bölgelerinde laminer alt tabakanın ($y^+ < 5$) çözümünde iyileştirilmiş duvar fonksiyonu (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır.



Şekil 3. ZYÇA LID'nin ağ yapısı

9 farklı ağ yoğunluğundaki sayısal modellerle, ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları ile hesaplanan egzoz ve temiz hava taraflarındaki sıcaklık farklarının ve basınç düşümlerinin neredeyse sabit kaldığı elde edilmiştir. Parametrik sayısal çözümler, temiz hava ve egzoz havası tarafında sıcaklık farkındaki ve basınç düşümündeki değişimlerin %1'den küçük olduğu, 2,155,926 eleman sayılı ağ yapısında yapılmıştır. Tablo 2’de ağ yapısı eleman sayıları, sıcaklık farkları ve basınç düşümleri verilmiştir.

Tablo 2. Ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması

Ağ yapısı eleman sayısı	Temiz hava tarafı		Egzoz havası tarafı	
	Sıcaklık farkı (K)	Basınç düşümü (Pa)	Sıcaklık farkı (K)	Basınç düşümü (Pa)
1,327,692	7.81	78.10	7.81	78.32
1,505,352	7.64	75.14	7.63	75.27
1,699,932	7.48	72.42	7.48	72.44
1,791,300	7.46	71.90	7.46	72.04
1,846,290	7.44	71.69	7.44	71.79
1,991,802	7.40	71.07	7.40	71.18
2,088,390	7.40	71.10	7.40	70.71
2,155,926	7.39	71.21	7.39	70.80
2,223,462	7.39	71.20	7.39	70.78

3 Sonuçlar ve tartışma

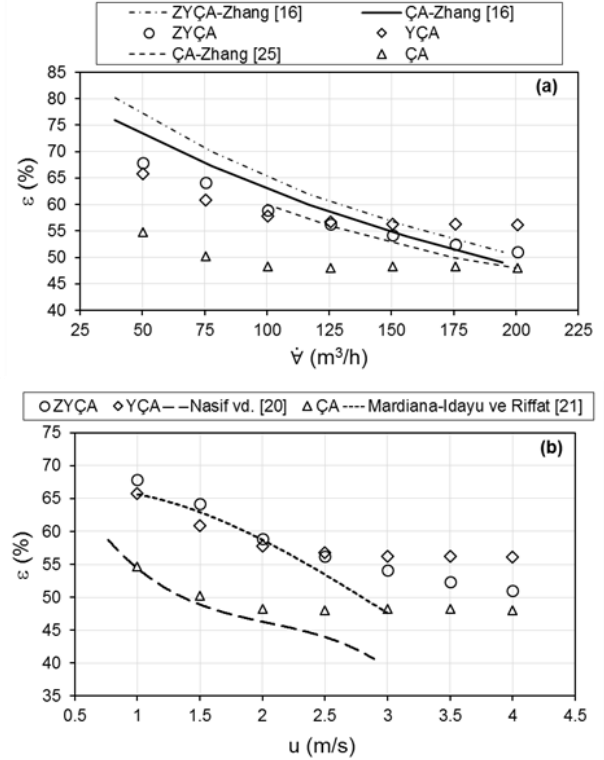
Havadan havaya LID’lerin kullanıldığı IGK–YHS’leri, kapalı mahaldeki kirlenmiş iç havayı süpürerek değiştiren temiz hava akımı oluşturarak, iç hava kalitesinin korunmasını sağlar. Aynı zamanda bu sistemler, kapalı hacimde ısı konforun sürdürülmesi amacıyla tüketilen ısı enerjisinin geri kazanılmasında (azaltılmasında) önemli rol oynar. %100 taze havayla beslenen IGK–YHS’leriyle, iç ortamdaki kirli hava emilerek dış ortama atılır. Dış ortamdan alınan temiz ve filtrelenmiş taze hava da kapalı ortama gönderilir. Bu sayede, mahal havasında bulunan kirletici salınımların ve istenmeyen zararlı asılı damlacıkların azaltılması sağlanır. Yani, kapalı ortamda kirlenmiş egzoz havası, temiz dış ortam havası ile karıştırılmadan, kapalı ortamdaki kirletici ve zararlı salınımların derişikliği azaltılır. Aynı zamanda LID ile yapılan ısı geri kazanımıyla, kapalı (sıcak/soğuk) ortamın sıcaklık kontrolü daha az enerji ile sağlanarak, ısı konfor şartları da korunabilir. Böylece, COVID–19 ve influenza gibi damlacıklar ve hava yoluyla bulaş riski oluşturabilecek hastalıkların yayılması, enerji maliyetlerini artırmadan engellenebilecektir.

Bu çalışmada, 50–200 m³/h aralığında havalandırma ihtiyacını karşılayacak, havadan havaya ZYÇA ($\theta=70^\circ$) LID’nin tasarımı yapılmış ve tasarlanan ısı değiştiricinin ısı geçişi ve basınç düşümü performansı HAD analizleri ile sayısal incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, 6 farklı ısı ve hidro dinamik performans parametresi (temiz tarafta geri kazanılan ısı güç, duyulur ısı etkenlik, ortalama ısı akısı, ÖİG, ÖFG ve HİBO) ile değerlendirilmiştir. Ayrıca $\theta=60^\circ$ olan YÇA ve $\theta=90^\circ$ olan ÇA LID’ler için (daha önce sunulan) [22] elde edilen sayısal sonuçlar, $\theta=70^\circ$ derece olan ZYÇA LID’nin (bu çalışmada sunulan) sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde ve

çalışmanın devamında, daha kısa olması nedeniyle, sayısal çözümleri yapılan LID’lerin tanımlanmasında, ısı değiştiricilerin tepe açısını (θ) temsil eden 60° , 70° ve 90° sırasıyla; YÇA (Yarı Çapraz Akışlı), ZYÇA (Zıt-Yarı Çapraz Akışlı) ve ÇA (Çapraz Akışlı) olarak adlandırılacaktır.

3.1 Sayısal modellerin geçerliliği

Sunulan çalışmadaki sayısal LID modellerinin doğrulanmasında, duyulur ısı etkenlik kullanılmıştır. Çünkü ısı etkenlik; gerçek LID’de ideal koşullardaki sonuçlara ne kadar yaklaşılabildiğini göstermektedir. Yani, hedeflenen sonuca ulaşmadaki başarının bir ölçütüdür. Akış düzenlemesi, ısı değiştiricilerin ısı etkenliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle; ZYÇA, YÇA ve ÇA LID’lerin sayısal modellerinin geçerliliği, literatürdeki Zhang [16, 25]’in deneysel ve sayısal, Nasif vd. [20]’nin deneysel ve Mardiana-Idayu ve Riffat [21]’in deneysel ısı etkenlikleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4’de hem hacimsel debiye hem de kanallardaki ortalama akış hızına bağlı etkenlik sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Sayısal LID modellerinin etkenlik sonuçlarıyla, literatürde farklı geometrik boyutlarda ve farklı işletme koşullarında elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

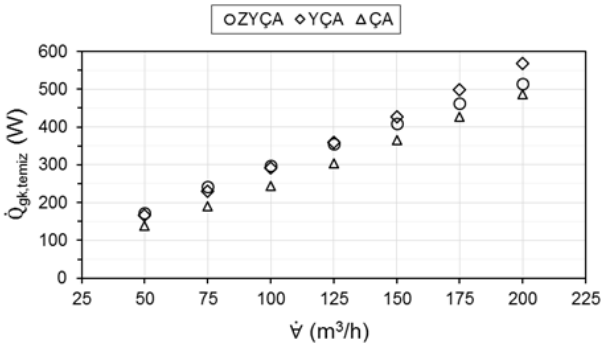


Şekil 4. Sayısal LID modellerinin etkenliklerinin (a) hacimsel debiye ve (b) ortalama akış hızına bağlı değişimleri ve literatürle karşılaştırılması

3.2 Sayısal çözüm sonuçları

Tepe açıları değiştirilerek elde edilen ZYÇA/YÇA/ÇA LID’lerdeki üç farklı akış düzenlemesi, 6 farklı ısı ve hidro dinamik performans ölçütüyle karşılaştırılmıştır.

Şekil 5’de LID’lerin temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücün hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, tüm LID’lerde temiz tarafta geri kazanılan ısı gücü artmıştır. ZYÇA LID’de, ÇA LID’ye göre ortalama ~%17 daha fazla ısı gücü geri kazanılmaktadır. ZYÇA ve YÇA LID’lerde, 150 m³/h debiye kadar, temiz tarafta geri kazanılan ısı güçleri hemen hemen eşittir. 150 m³/h debinin üzerinde ise, YÇA LID’de, ZYÇA LID’ye göre ortalama ~%7.5 daha fazla ısı gücü geri kazanılmıştır. Temiz tarafta geri kazanılan ısı gücü bakımından karşılaştırıldığında, YÇA ve ZYÇA LID’ler, ÇA LID’ye göre daha avantajlıdır.



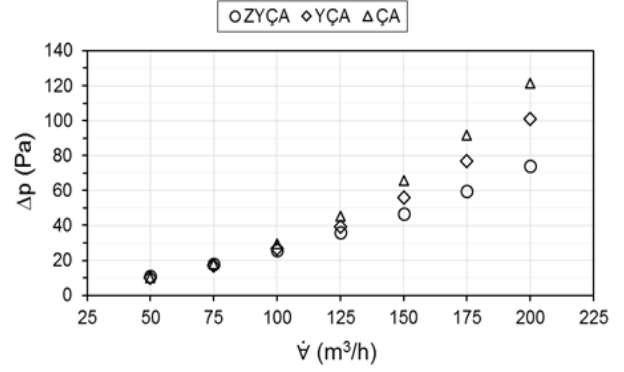
Şekil 5. Temiz tarafta geri kazanılan ısı gücün hacimsel debiye bağlı değişimleri

Şekil 6’da LID’lerin temiz hava tarafındaki basınç düşümlerinin hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, tüm LID’lerin temiz hava tarafındaki basınç düşümü de artmıştır. LID’lerin tamamında, 100 m³/h debiye kadar, çok yakın basınç düşümleri elde edilmiştir. Ancak 100 m³/h debinin üzerinde; ÇA ve YÇA LID’lerde, ZYÇA LID’ye göre sırasıyla ortalama ~%46 ve ~%24 daha yüksek basınç düşümleri elde edilmiştir. 100 m³/h üzerindeki hacimsel debilerde, basınç düşümü bakımından, ZYÇA LID’yi kullanmak daha avantajlı, ÇA LID’yi kullanmak dezavantajlıdır.

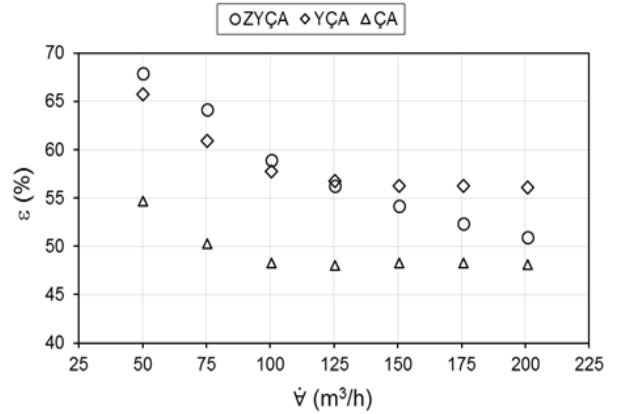
Hem geri kazanılan ısı gücü hem de basınç düşümü sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; tasarıma zıt akış bölgesinin eklendiği ZYÇA LID’de, 125 m³/h hacimsel debinin üzerinde geri kazanılan ısı güçteki artış devam ederken, basınç düşümü ÇA ve YÇA LID’lerdeki kadar artmamıştır. Yani, LID kanallarına eklenen zıt akış bölgesinin LID’nin ısı ve hidrodinamik performansına etkisi olumludur.

Şekil 7’de performansları incelenen LID’lerin, duyulur ısı etkenliklerinin hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, ~125m³/h’e kadar tüm LID’lerde duyulur ısı etkenlikleri azalmıştır. YÇA ve ÇA LID’lerde ısı etkenlikleri, 125 m³/h’in üzerinde sırasıyla ~%56 ve ~%48’de sabitlenmiştir. ZYÇA LID’deki zıt akış bölgesi, özellikle 125 m³/h debinin altında, ısı etkenliği olumlu etkilemiştir. 50-100 m³/h debi aralığında, ZYÇA LID’de, YÇA LID’ye göre ortalama ~%3.5 ve ÇA LID’ye göre de ortalama ~%25 daha yüksek duyulur ısı etkenlikleri elde edilmiştir. 125 m³/h debide YÇA ve ZYÇA LID’lerin ısı etkenlikleri eşit ve ~%56’dır. 125 m³/h debinin üzerinde, YÇA

LID’nin ısı etkenliği, ZYÇA ve ÇA LID’lerin etkenliklerinden, sırasıyla ortalama ~%7 ve ~%16.5 daha yüksektir. LID’lerin tasarım koşulları (3–5 kişinin taze hava ihtiyacı ≤125 m³/h) dikkate alındığında; ZYÇA LID, duyulur ısı etkenlik bakımından, YÇA ve ÇA LID’lere göre daha avantajlıdır.



Şekil 6. Temiz taraftaki basınç düşümünün hacimsel debiye bağlı değişimleri

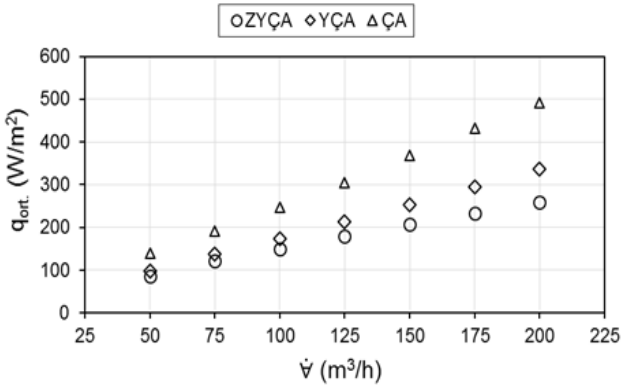


Şekil 7. Isıl etkenliğin hacimsel debiye bağlı değişimleri

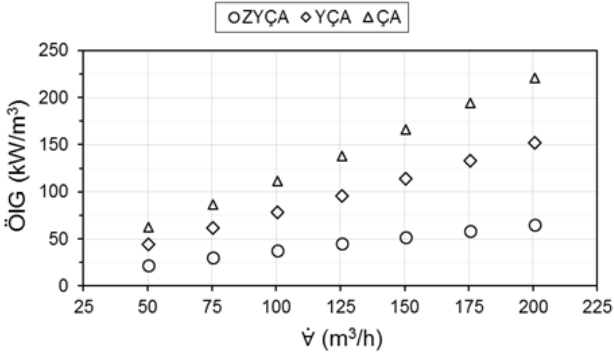
Şekil 8’de LID’lerdeki ortalama ısı akısının hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça tüm LID’lerin ortalama ısı akısı artmıştır. ÇA LID’de en yüksek ortalama ısı akısı elde edilmiştir ve ortalama ısı akısındaki artış diğer LID’lere göre daha yüksektir. ÇA LID’nin ortalama ısı akısı, YÇA ve ZYÇA LID’lere göre sırasıyla ortalama ~%43 ve ortalama ~%72 daha fazladır. YÇA ve ZYÇA LID’lerin ortalama ısı akıları, 125m³/h debiye kadar birbirine yakın değerler almıştır. 125 m³/h üzerinde, YÇA LID’nin ortalama ısı akısı, ZYÇA LID’ye göre ortalama ~%26 daha yüksektir. Ortalama ısı akısı bakımından değerlendirildiğinde; ÇA LID, YÇA ve ZYÇA LID’lere göre daha avantajlıdır.

Şekil 9’da LID ÖİG’lerinin hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, tüm LID’lerin ÖİG’ü artmıştır. Ortalama ısı akısı sonuçlarına benzer olarak, ÇA LID’de daha yüksek ÖİG elde edilirken, YÇA ve ZYÇA LID’lerin ÖİG’leri daha düşüktür. ÇA LID’nin ortalama ÖİG’ü YÇA ve ZYÇA LID’lere göre sırasıyla, ortalama ~1.5 kat ve ~3 kat daha yüksektir.

Ortalama ısı akısına benzer şekilde, ÖİG bakımından yapılan değerlendirmeye göre de, ÇA LID diğer LID'lerden daha avantajlıdır.



Şekil 8. Ortalama ısı akısının hacimsel debiye bağlı değişimleri



Şekil 9. ÖİG'nin hacimsel debiye bağlı değişimleri

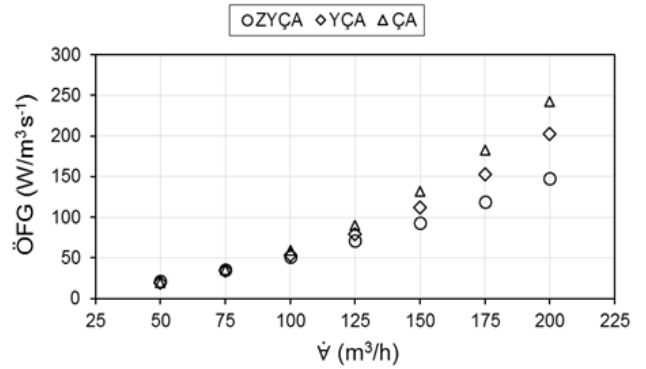
Şekil 10'da LID'lerde harcanan ÖFG'nün hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça tüm LID'lerde akışın devamı için gerekli ÖFG'ü artmıştır. 125 m³/h debiye kadar LID'lerin tamamında ÖFG'leri arasında çok önemli bir fark görülmemektedir. Ancak ZYÇA LID'de, zıt akış bölgesinin etkisiyle, 125 m³/h debinin üzerinde ÖFG'ündeki artış, ÇA ve YÇA LID'lere göre daha düşüktür. 125–200 m³/h debi aralığında, ZYÇA LID'nin ÖFG'ü, YÇA ve ÇA LID'ye göre sırasıyla ~%23 ve ~%46 daha düşüktür. ÖFG'ü bakımından değerlendirildiğinde; LID'de zıt akış bölgesinin oluşturulduğu, ZYÇA LID tasarımı, YÇA ve ÇA LID tasarımlarına göre daha avantajlıdır.

Şekil 11'de LID'lerin HIBO'larının hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça tüm LID'lerde HIBO azalmıştır. ZYÇA LID'nin HIBO, genel olarak diğer LID'lere göre daha yüksektir. ZYÇA LID'nin HIBO, YÇA ve ÇA LID'ye göre sırasıyla ortalama ~%10 ve ~%47 daha yüksektir. Zıt akış bölgesi LID'nin HIBO'nı olumlu etkilediğinden, ZYÇA LID tasarımı, YÇA ve ÇA LID tasarımlarına göre daha avantajlıdır.

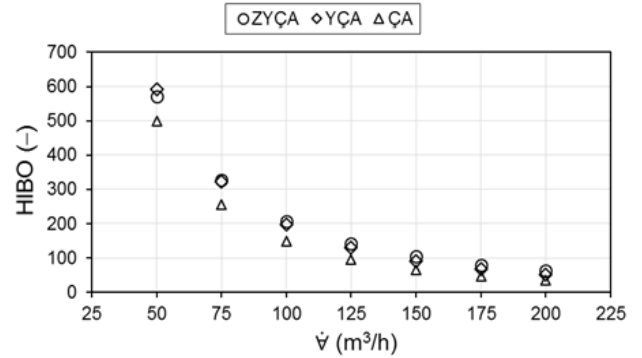
125 m³/h debide; HIBO'nına göre sadece LID'de oluşan basınç kayıpları dikkate alındığında, IGK yerel havalandırma ile akışın devamı için harcanan hidrodinamik

güç, ÇA, YÇA ve ZYÇA LID'lerde sırasıyla 96, 130 ve 140 kat ısıl gücün geri kazanılmasını sağlamaktadır.

Şekil 12'de 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin temiz hava tarafı simetri düzlemlerindeki (giriş ve çıkış kanalları dahil) hız dağılımları verilmiştir. ZYÇA LID'de, diğer LID tasarımlarına göre daha düzgün (üniform) hız dağılımı elde edilmiştir. LID'de zıt akış bölgesinin oluşturulmasıyla, LID akış kanalında ortalama akış hızının düştüğü ve akış boyunca akış en-kesitinde daha düzgün hız dağılımı sağlandığı, dolayısıyla da LID hidrodinamik performansının iyileştiği değerlendirilmektedir. Bu nedenle ZYÇA LID'de, 125m³/h debiye kadar, yaklaşık aynı basınç düşümünde (Şekil 6), diğer LID'lere göre temiz tarafta geri kazanılan ısıl güç (Şekil 5) daha fazladır. Bu da yaklaşık aynı ÖFG'ünde (Şekil 10), ZYÇA LID'nin duyulur ısıl etkinliğini (Şekil 7) ve HIBO'nı (Şekil 11) diğer LID'lere göre yükseltmiştir.



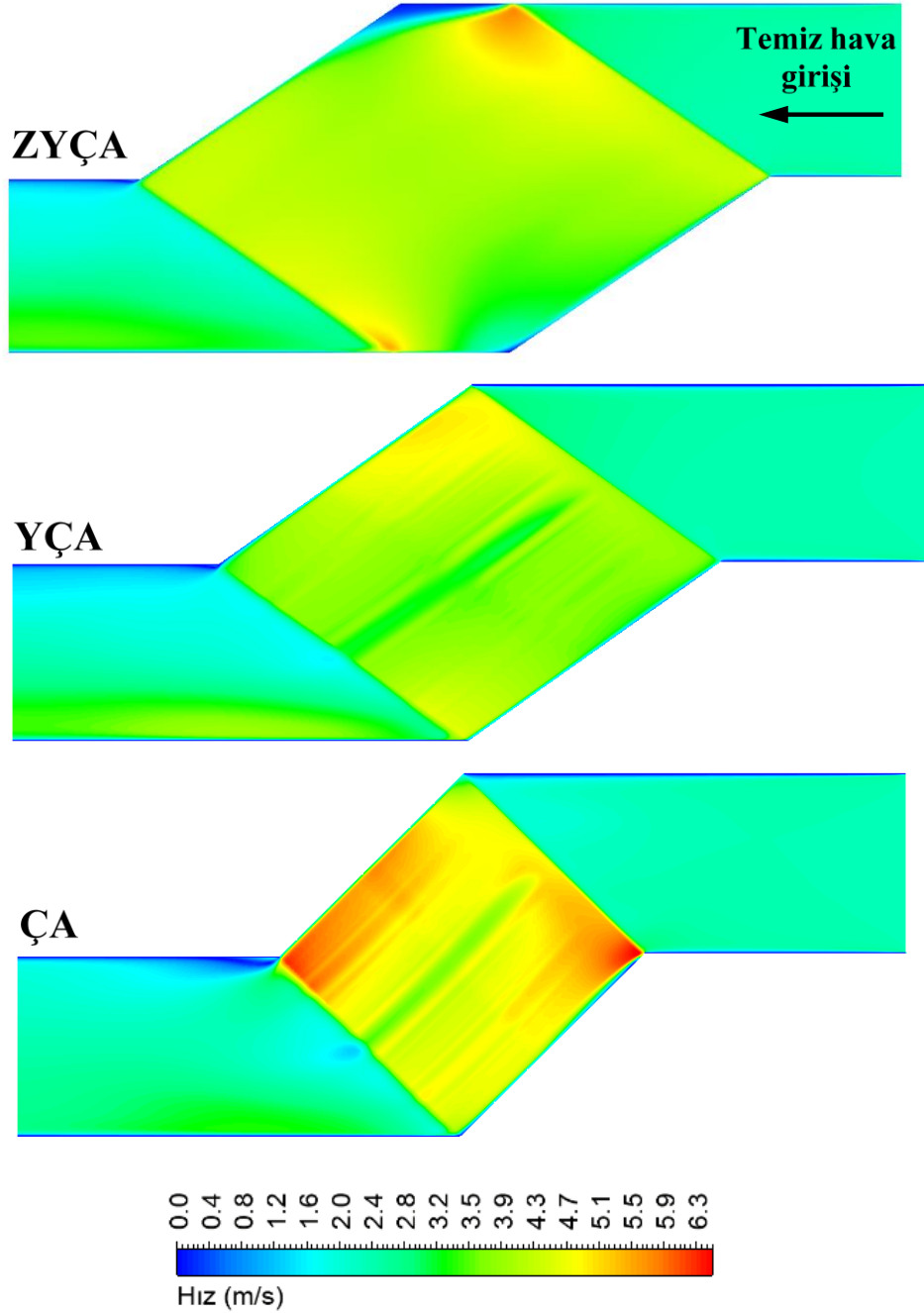
Şekil 10. ÖFG'nin hacimsel debiye bağlı değişimleri



Şekil 11. HIBO'nun hacimsel debiye bağlı değişimleri

125m³/h'in üzerinde YÇA LID'de temiz tarafta geri kazanılan ısıl güç, ZYÇA LID'ye göre biraz daha yüksektir (Şekil 5). Ancak hidrodinamik performansının üstünlüğü nedeniyle, ZYÇA LID'nin ÖFG'ü artışı (Şekil 10), diğer LID'lere göre daha düşük olduğundan, ZYÇA LID, 125m³/h'in üzerinde de HIBO bakımından avantajlıdır (Şekil 11).

Şekil 13'de 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin levhalarındaki sıcaklık dağılımları, levha düzlemindeki egzoz ve temiz hava tarafı giriş ve çıkış kanalları ile birlikte verilmiştir.



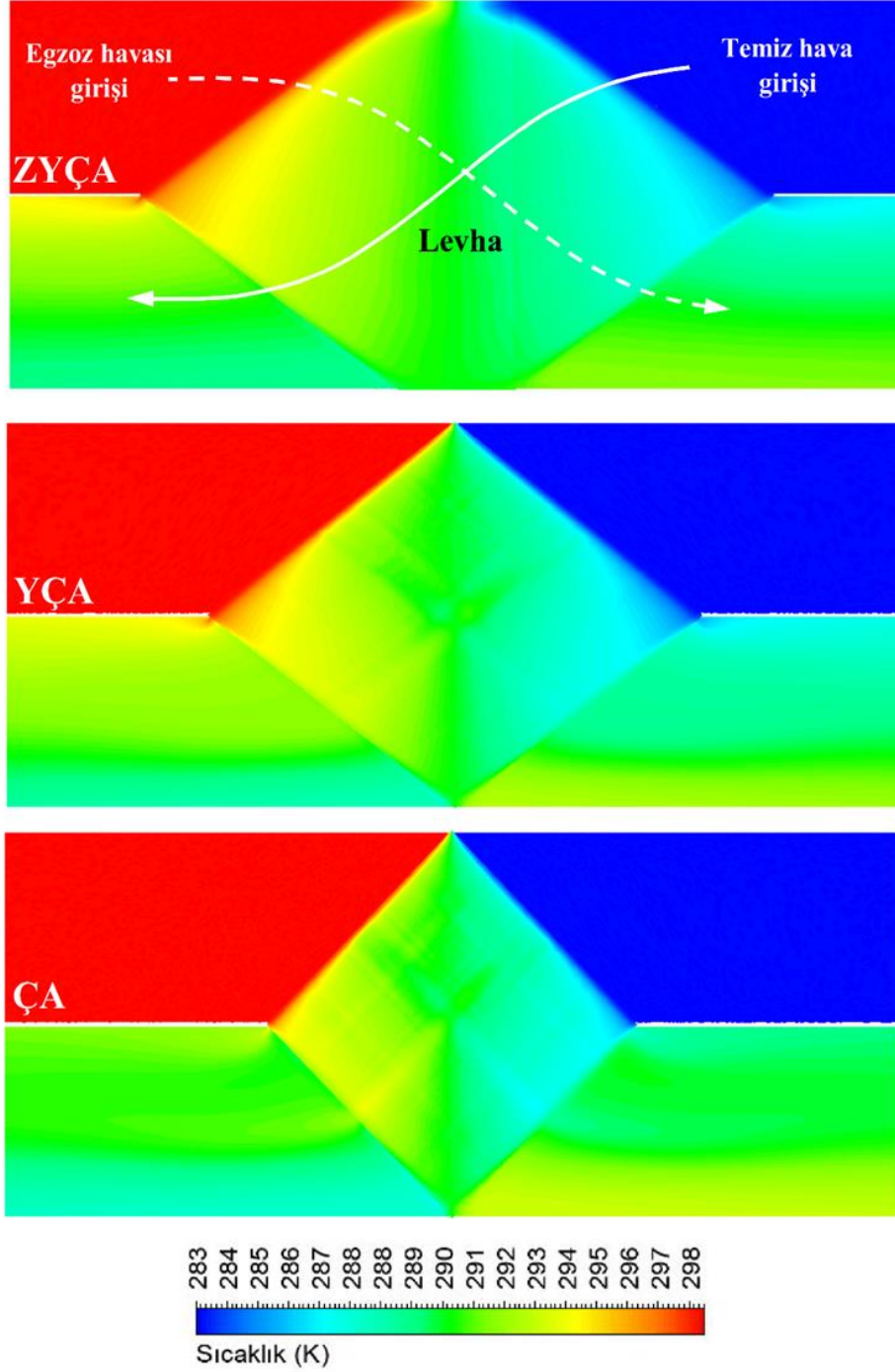
Şekil 12. 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin temiz hava tarafı simetri düzlemindeki hız dağılımları

Şekil 13'de görüldüğü gibi ZYÇA LID'nin levha yüzeyinde, akış doğrultusunda konuma bağlı sıcak farkları (değişimleri), daha azdır. Başka bir deyişle; ZYÇA LID'nin levha yüzeyinde sıcaklık daha düzgün dağılırken, diğer ısı değiştiricilerde levha yüzeyinde sıcaklık dağılımı daha düzensizdir. Ayrıca temiz hava ve egzoz havası çıkış kanallarındaki sıcaklık dağılımlarının da ZYÇA LID'de, diğer LID'lere göre daha üniform olduğu görülmektedir.

Şekil 12'de verilen simetri düzlemindeki hız dağılımı sonuçlarında olduğu gibi, levha yüzeyindeki ve çıkış kanallarındaki sıcaklık dağılımları da, ZYÇA LID'nin ısı ve

hidrodinamik performans bakımından daha avantajlı olduğunu gösteren sonuçları desteklemektedir.

Şekil 14'de ZYÇA, YÇA ve ÇA LID'lerin 125 m³/h debide, temiz taraf akış kanalı simetri düzleminde, levha yüzeyinde girişten-çıkışa yerel ısı taşınım katsayılarının ve yerel hız profillerinin konuma (L/D_h) bağlı değişimleri verilmiştir. Bu değişimler, temiz taraf akış kanalında hız dağılımı bakımından benzer karakteristikleri gösteren bölgeler dikkate alınarak, akış doğrultusunda seçilen akış kesiti boyunca verilmiştir.

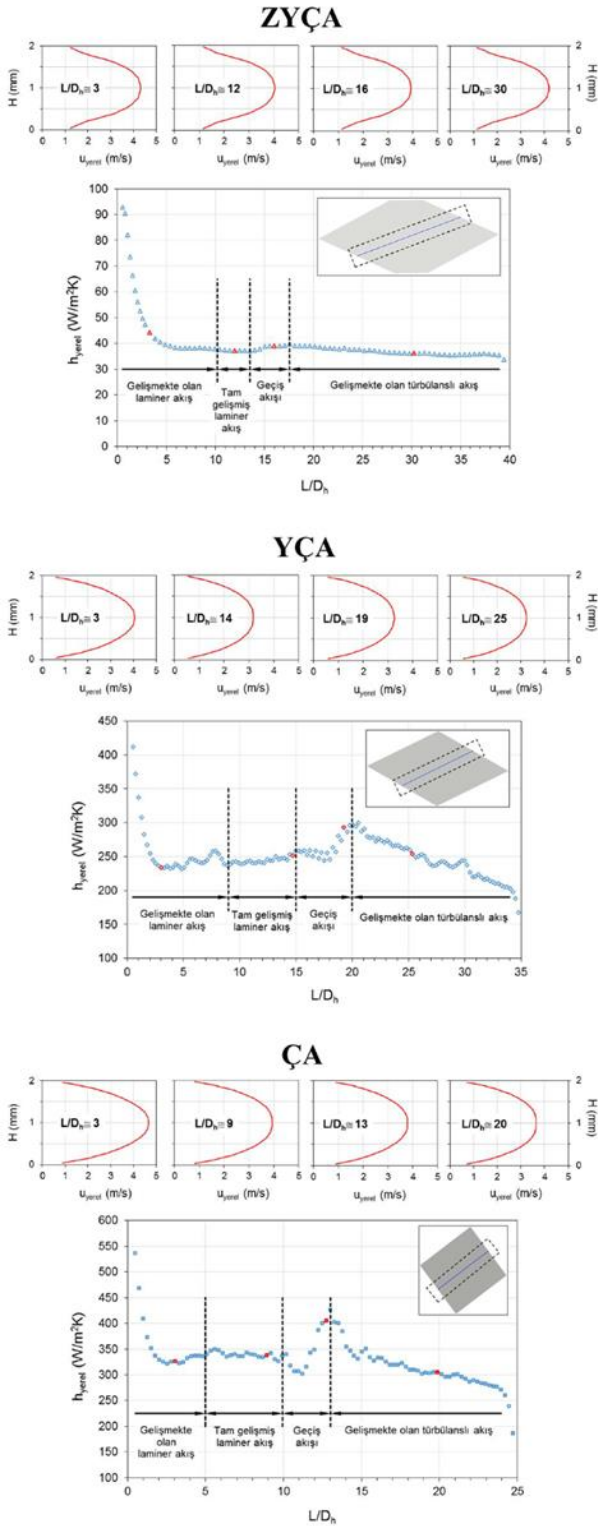


Şekil 13. 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin levhalarında ve egzoz–temiz hava tarafı giriş–çıkış kanallarında sıcaklık dağılımları

Şekil 14'e göre ZYÇA, YÇA ve ÇA ısı değiştiricilerde, akış doğrultusunda dört farklı akış bölgesi bulunmaktadır. Birinci bölgede; giriş ve gelişmekte olan laminer akış etkileri, ikinci bölgede; tam gelişmiş laminer akış, üçüncü bölgede; geçiş akışı ve dördüncü bölgede; gelişmekte olan türbülanslı akış ve çıkış etkileri görülmektedir. Şekil 14'de akış doğrultusundaki hız profillerinin alındığı boyuna akış en-kesitleri sağ üst köşede ve bu kesitlerde yerel hız

profillerinin alındığı akış en-kesitlerinin konumları da, grafiklerdeki kırmızı sembollerle gösterilmiştir.

125 m³/h debide; farklı L/D_h için YÇA ve ÇA LID'lerin hız profilleri, ZYÇA ısı değiştiriciyle karşılaştırıldığında daha paraboliktir. Diğer bir deyişle, ZYÇA ısı değiştiricide akışa dik doğrultuda hızdaki değişim daha az olduğundan, sınır tabaka daha kalındır. Bu nedenle, YÇA ve ÇA LID'lerde daha yüksek yerel ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir.



Şekil 14. 125 m³/h debide temiz taraf akış kanalı simetri düzleminde yerel ısı taşınım katsayıları ve yerel hız profillerinin akış doğrultusunda seçilen akış kesiti boyunca değişimleri

Sayısal çözüm sonuçları, aynı zamanda tasarım koşulları olan 3–5 kişinin yaşadığı bir konuttaki taze hava ihtiyacı (kişi başına 20–25 m³/h) dikkate alınarak, 125 m³/h debi için **Tablo 3**'de özetlenmiştir.

Tablo 3. 125 m³/h debide, LID performans sonuçlarının karşılaştırılması

Performans değişkenleri	LID tasarımı-(θ°)		
	ZYÇA-(70°)	YÇA-(60°)	ÇA-(90°)
Q _{gk,temiz} (W)	356	359[♣] (+%1)	303 (-%14.9)
ε (%)	56.2	56.7[♣] (+%1)	48 (-%14.6)
Δp (Pa)	35.9[♣]	39.4 (+%9.7)	45.4 (+%26.5)
q _{ort} (W/m ²)	180	213 (+%18.3)	306[♣] (+%70)
ÖİG (kW/m ³)	44.74	95.93 (+%114.4)	137.73[♣] (+%207.8)
ÖFG (W/(m ³ s ⁻¹))	71.9[♣]	78.9 (+%9.7)	90.7 (+%26.1)
HİBO (-)	142[♣]	130 (-%9.7)	96 (-%32.4)
h _{ort} (W/m ² K)	130	153 (+%17.7)	230[♣] (+%76.9)

Notlar:

- Parantez içerisindeki sonuçlar, ZYÇA LID ile karşılaştırılarak elde edilmiştir.
- LIDler için en yüksek performans sonuçları [♣] ile gösterilmiştir.

4 Değerlendirme

Bu çalışmada, küçük kapasiteli (50–200 m³/h) IGK–YHS'lerinde kullanılmak üzere ZYÇA LID tasarlanmıştır. Tasarlanan ısı değiştiricinin sayısal çözümleri Fluent ile yapılmıştır. ZYÇA LID'nin sayısal çözümlerle elde edilen performans sonuçları (temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç, ısıl etkenlik, basınç düşümü, ortalama ısı akısı, ÖİG, ÖFG, HİBO), daha önceki çalışmalarımızda sunulan YÇA ve ÇA LID performans sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, 3–5 kişinin taze hava ihtiyacı olan 125 m³/h debide; temiz hava tarafı simetri düzlemindeki hız dağılımları, LID levhalarında ve egzoz–temiz hava tarafı giriş–çıkış kanallarında sıcaklık dağılımları, temiz taraf akış kanalı simetri düzleminde yerel ısı taşınım katsayıları ve yerel hız profillerinin akış doğrultusundaki değişimleri karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

–Geri kazanılan ısı güç ve basınç düşümü sonuçları bakımından tasarıma zıt akış bölgesinin eklenmesi (ZYÇA) 125 m³/h'e kadar LID performansını çok fazla etkilememiştir. Ancak, 125 m³/h'in üzerinde ZYÇA LID'nin basınç düşümü ÇA ve YÇA LID'lerdeki kadar artmamıştır. Diğer bir deyişle, zıt akış bölgesinin LID'nin ısıl ve hidrodinamik performansına etkisi olumludur.

–Hacimsel debi arttıkça, 125m³/h'e kadar tüm LID'lerin ısıl etkenliği azalmıştır. 50–100 m³/h aralığında, ZYÇA ve YÇA LID'lerin ısıl etkenliği, ÇA LID'ye göre yaklaşık %20–25 daha yüksektir. Zıt akış bölgesi, 125 m³/h'in altında, ısıl etkenliği artırmıştır. ÇA LID'ye zıt akış bölgesinin eklenmesi ısıl etkenliği ortalama ~%17 iyileştirmiştir.

–Ortalama ısı akısı ve ÖİG bakımından; ÇA LID, ZYÇA ve YÇA LID'ye göre daha avantajlıdır. Zıt akış bölgesi nedeniyle, artan toplam ısı geçiş alanı ve toplam hacim, LID performansını olumsuz etkilemiştir.

–ÖFG ve HİBO bakımından; zıt akış bölgesi LID performansını olumlu etkilemiştir. 125 m³/h debide, ÇA, YÇA ve ZYÇA LID'lerde akışın sürdürülebilmesi için gerekli hidrodinamik gücün, sırasıyla 96, 130 ve 140 katı ısı güç temiz hava tarafında geri kazanılmıştır.

Zıt akış bölgesi, LID'nin toplam ısı geçiş alanını artırır. Bu tasarım değişikliği, ısı değiştirici üretim maliyetlerinde

artışa neden olacaktır. Ancak, üretim ve işletme maliyetleri birlikte değerlendirildiğinde; işletme (elektrik enerjisi) maliyetlerindeki azalma ile üretim maliyetindeki artış kısa zaman içerisinde geri ödenecektir. IGK merkezi ve yerel havalandırma sistemlerinin karşılaştırılmasında; LID sürtünme basınç kayıplarına, cihaz ve kanallardaki diğer basınç kayıpları da eklenip, kullanılan birincil enerji kaynaklarının tamamı hesaba katılarak, daha gerçekçi bir değerlendirme yapılabilir.

Semboller ve indisler

A	–alan (m ²)
Ė	–enerji (kJ/s)
ε	–ısıl etkenlik (%)
c _p	–özgül ısı (kJ/kgK)
h	–ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
H	–kanal yüksekliği (mm)
θ	–tepe açısı (°)
k	–ısı iletim katsayısı (W/mK)
L	–zıt akış bölgesi uzunluğu (mm)
L/D _h	–hidrolik çapa bağlı konum (–)
ṁ	–kütlesel debi (kg/s)
N	–toplam kanal sayısı (adet)
p ₀	–atmosfer basıncı (Pa)
Δp	–basınç düşümü (Pa)
q	–ısı akısı (W/m ²)
Q̇	–geri kazanılan ısı gücü (W)
S	–giriş-çıkış akış hacmi uzunluğu (mm)
T	–sıcaklık (K)
t	–levha kalınlığı (mm)
u	–hız (m/s)
V	–hacim (m ³)
Ṡ	–hacimsel debi (m ³ /h)
W	–levha genişliği (mm)
Ẇ _{fan}	–fan gücü (W)

Alt indisler

c,ç	–soğuk çıkış
c,g	–soğuk giriş
gk	–geri kazanılan
h,g	–sıcak giriş
mak.	–maksimum
ort.	–ortalama
top.	–toplam

Kısaltmalar

ÇA	–çapraz akışlı
HIBO	–hidrodinamik-ısıl büyüme oranı
IGK	–ısı geri kazanımlı
LID	–levhalı ısı değiştirici
MHS	–merkezi havalandırma sistemi
ÖFG	–özgül fan gücü
ÖIG	–özgül ısıl güç
YÇA	–yarı çapraz akışlı
YHS	–yerel havalandırma sistemi
ZYÇA	–zıt-yarı çapraz akışlı

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 1

Kaynaklar

- [1] H. Goodfellow and Y. Wang, Industrial ventilation design guidebook Volume 1: Fundamentals. Elsevier, United Kingdom, 2020.
- [2] Z. Lu, Z. Xie, Q. Lu and Z. Zhao, An encyclopedia of architecture & civil engineering of China. China Architecture & Building Press, Beijing, 2000.
- [3] H. Goodfellow and Y. Wang, Industrial ventilation design guidebook Volume 2: Engineering Design and Applications. Elsevier, United Kingdom, 2021.
- [4] E. Zender-S'wiercz, A review of heat recovery in ventilation. *Energies*, 14, 1759, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061759>.
- [5] A. Mardiana-Idayu and S.B. Riffat, Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2), 1241–1255, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026>.
- [6] Heat Recovery Ventilation. <https://www.zephyrventilation.net.au/heat-recovery-ventilation/>, Accessed 1 May 2022.
- [7] D. O'Connor, J.K.S. Calautit and B.R. Hughes, A review of heat recovery technology for passive ventilation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1481-1493, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039>.
- [8] B.D. Ghida, Heat recovery ventilation for energy-efficient buildings: Design, Operation and Maintenance. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(1), 3713–3715, 2019. [doi:10.35940/ijitee.A4795.119119](https://doi.org/10.35940/ijitee.A4795.119119).
- [9] A. Meiss, M.Á. Padilla-Marcos, I. Poza-Casado and A.A. Álvaro-Tordesillas, Graphical Tool to Estimate the Air Change Efficiency in Rooms with Heat Recovery Systems. *Sustainability*, 12(3), 1031, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12031031>.
- [10] V. Misevičiūtė, V. Motuzienė and K. Valančius, The application of the Pinch method for the analysis of the heat exchangers network in a ventilation system of a building. *Applied Thermal Engineering*, 129, 772–781, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.051>.
- [11] O. Hänninen, National Institute for Health and Welfare (THL), Health Vent Health-Based Ventilation Guidelines for Europe Project; Deliverable 8: Report on the impact of guideline implementation on health and energy. National Institute for Health and Welfare, Kuopio, Finland, December 2012.
- [12] D. Mumovic, J. Palmer, M. Davies, M. Orme, I. Ridley, T. Oreszczyn, C. Judd, R. Critchlow, H.A. Medina, G. Pilmoor and et al., Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. *Building and Environment*, 44 (7), 466–1477, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.014>.

- [13] A. Mikola, T. Kalamees and T.-A. Kõiv, Performance of ventilation in Estonian apartment buildings. *Energy Procedia*, 132, 963–968, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.681>.
- [14] T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü ve Türkiye Kimya, Petrol, Lastik ve Plastik Sanayii İşverenleri Sendikası (KİPLAS). COVID-19 döneminde havalandırma ve klima sistemleri rehberi, 2021. <https://www.csgeb.gov.tr/media/68337/kiplas-covid-19-doneminde-havalandirma-ve-klima-sistemleri-rehberi-26022021.pdf>, Accessed 10 May 2022.
- [15] DSÖ'nün Covid-19 ortam havalandırması yol haritası. <https://yetkinreport.com/2021/04/19/dsonun-covid-19-ortam-havalandirmasi-yol-haritasi/>, Accessed 11 May 2022.
- [16] L-Z. Zhang, Heat and mass transfer in a quasi-counter flow membrane-based total heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 23–24, 5478-5486, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.009>.
- [17] L-Z. Zhang, C.-H. Liang, L-X. Pei, Heat and moisture transfer in application scale parallel-plates enthalpy exchangers with novel membrane materials. *Journal of Membrane Science*, 325(2): 672–682, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.08.041>.
- [18] R. Al-Waked, M. S. Nasif, G.Morrison, M. Behnia, CFD simulation of air to air enthalpy heat exchanger: Variable membrane moisture resistance. *Applied Thermal Engineering*, 84, 301–309, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.067>.
- [19] E-J. Lee, J. P. Lee, H.M. Sim, N.H. Kim, Modeling and verification of heat and moisture transfer in an enthalpy exchanger made of paper membrane. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 20(3): 1250015, 2012. <https://doi.org/10.1142/S2010132512500150>.
- [20] M. Nasif, , R. Al-Waked, G.Morrison, M. Behnia, Membrane heat exchanger in HVAC energy recovery systems, systems energy analysis. *Energy and Buildings*, 42(10): 1833–1840, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.020>.
- [21] A. Mardiana-Idayu, S. B. Riffat, An experimental study on the performance of enthalpy recovery system for building applications. *Energy and Buildings*, 43(9): 2533–2538, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.009>.
- [22] M. Ünverdi and H. Kucuk, Comparison of hydraulic and thermal performance of small capacity air to air cross and semi-cross flow plate heat exchangers using CFD analysis. 18th International Conference on Latest Trends in Engineering and Technology, pp. 50–57, İstanbul, Türkiye, 2018 March 21-23.
- [23] M. Ünverdi and H. Küçük, Taguchi yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tasarlanan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarının karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 373–386, 2019. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.35493>.
- [24] Y. Çengel, *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. McGraw-Hill, USA, 2007.
- [25] L-Z. Zhang, Progress on heat and moisture recovery with membranes: From fundamentals to engineering applications. *Energy Conversion and Management*, 63, 173–195, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.033>.

