

# YEREL HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ İÇİN ISIL ETKENLİĞİ YÜKSEK ÇAPRAZ AKIŞLI LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI

*Design of cross flow plate heat exchanger with high thermal effectiveness for local ventilation systems*

**Murat ÜNVERDİ**  
**Hasan KÜÇÜK**

## ÖZET

Bu çalışmada, küçük kapasitelerdeki havalandırma ihtiyaçlarını karşılayacak bir ısı geri kazanım cihazında kullanılan levhalı ısı değiştiricinin, düşük maliyetli ve geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılarak tasarımı amaçlanmıştır. Levhalı ısı değiştiricinin (LID) tasarımında, Taguchi yöntemi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılmıştır. Isı değiştiricinin boyutları, üç-dört kişinin yaşadığı küçük bir konut için gerekli taze hava debisi (50-200 m<sup>3</sup>/h) dikkate alınarak belirlenmiştir. Isı değiştirici tasarımı için yapılan üç seviyeli Taguchi analizinde seçilen değişkenler; kanal yüksekliği, bölünmüş alt kanal sayısı, ortalama hava akış hızı ve levha malzemesidir. Isı değiştiricinin 3-boyutlu HAD modeli, sıcak ve soğuk hava akımlarının kanala giriş-çıkış etkilerini değerlendirecek şekilde oluşturulmuştur. Taguchi analizinde hedeflenen performans parametresi olarak, temiz tarafta geri kazanılan ısı gücün, aktarabilecek maksimum ısı güce oranı şeklinde tanımlanan, ısıl etkenlik seçilmiştir. Taguchi yönteminden tahmin edilen ısıl etkenlik ile en uygun tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulan HAD modeli çözümünden hesaplanan ısıl etkenlik arasındaki fark, %2.42 olarak elde edilmiştir. LID'nin elde edilen en uygun tasarımı ile konutun temiz hava ihtiyacı için yeterli debisi (~105 m<sup>3</sup>/h) sağlanmaktadır. Bu LID tasarımında ısı değiştirici kanallarındaki ortalama hava akış hızı 2 m/s, ısı değiştiricideki toplam basınç düşümü ~30 Pa ve geri kazanılan ısı gücü de ~330 W (~7.9 kW-h/gün) olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çapraz akışlı levhalı ısı değiştirici, Isıl etkenlik, Isı geri kazanımı, Taguchi yöntemi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.

## ABSTRACT

In this study, it is aimed to design a plate heat exchanger used in heat recovery device to meet the ventilation requirements at small capacities by using low-cost and recyclable materials. Taguchi method and Computational Fluid Dynamics (CFD) have been used in the design of plate heat exchanger (PHE). The dimensions of the heat exchanger have been determined by taking into account fresh air flow rate (50-200 m<sup>3</sup>/h) required for a small residential building inhabited three to four people. The selected variables in the three-level Taguchi analysis for heat exchanger design are channel height, number of divided sub-channels, average air velocity and plate material. The 3-dimensional CFD model of the heat exchanger is designed to evaluate the channel inlet-outlet effects of hot and cold (stale and fresh) air streams. Thermal effectiveness, selected as a performance parameter in Taguchi analysis, is defined as the ratio of recovered thermal power on the fresh side to maximum thermal power that can be transferred. The difference between the thermal effectiveness estimated by the Taguchi method and that calculated from the CFD model solution using optimum design parameters have been obtained as 2.42%. Sufficient flow rate is supplied for the fresh air requirement (~105 m<sup>3</sup>/h) of the dwelling with the optimum design of PHE. The average air velocity on the heat exchanger channels is 2 m/s, the total pressure drop through the heat exchanger is ~30 Pa and the recovered thermal power on the fresh side is ~330 W (~7.9 kW-h/day) for optimum PHE design.

**Key Words:** Cross flow plate heat exchanger, Thermal effectiveness, Heat recovery, Taguchi method, Computational Fluid Dynamics.

## 1. GİRİŞ

Enerji kullanımı için sürekli artan talep tahminleri, çevre ve sürdürülebilirlikle ilgili kaygılar, enerji ve enerjinin verimli kullanılması konularındaki farkındalığın artmasına neden olmaktadır. Küresel ölçekte ve özellikle ülkemizde toplam enerji tüketiminde en önemli alanlardan biri, enerjinin ısıtma, havalandırma ve soğutma amaçlı kullanıldığı binalar ve konfor iklimlendirmesidir. Günümüz iklimlendirme sistemlerindeki ısıtma ve soğutma cihazları, ya doğrudan fosil yakıtları kullanmaktadır ya da çoğunlukla fosil yakıtlara dayanan elektrik enerjisi ile tahrik edilmektedir. Fosil yakıt kullanımının çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve her geçen gün artan ekonomik yükleri nedeniyle, daha verimli, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji teknolojilerinin uygulanması zorunlu hale gelmiştir [1, 2].

Isının geri kazanılması, topraklı kaynaklı ısı pompaları, yerden ısıtma ve tavadan soğutma gibi gelişmiş enerji etkin teknikler daha fazla dikkat çekmektedir. Binaların enerji tüketimini azaltmak için havalandırma ve iklimlendirme sistemlerindeki ısı geri kazanım cihazlarında, havadan-havaya levhalı ısı değiştiricilerin (LID'lerin) kullanımı yaygınlaşmaktadır. LID'leri, ayırık levhaların sıralı istifi ve birbirine eklenmesi ile oluşturulan bir akış kanalları bloğu şeklindeki kompakt ısı değiştiricilerdir. LID'lerin, diğer ısı değiştiricilere göre bazı üstünlükleri vardır. Örneğin; düşük sıcaklık farkları, yüksek ısı verimlilik, birim hacim başına büyük bir ısı geçişi alanı (ortalama 5-6 mm hidrolik çap ve ortalama 200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), birim ısı geçişi için düşük ağırlık ve birçok proses akışı arasında ısı alışverişini yapılabilmesi, LID'lerin üstünlükleri arasında sayılabilir. Bahsedilen nedenlerle, havadan-havaya LID'ler, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerindeki yüksek verimli ısı enerjisi geri kazanım cihazlarında yaygın kullanılmaktadır [3-6].

Havadan-havaya LID'lerin, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde ısı geri kazanımı için kullanılmasıyla, taze hava beslemesindeki ısıtma yükü %45-70 oranında azaltılarak, yüksek enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, LID'lerde, temiz hava ve egzoz havası birbiriyle temas etmediğinden ve karışmadığından, temiz hava tarafında kirlenme olmamaktadır [7].

Gündelik yaşantının daha çok kapalı ortamlarda geçirilmesi, artan şehirli nüfusla birlikte çok katlı modern binaların yaygınlaşması, binalardaki enerji tüketimini, toplam enerji tüketiminin %40'ına yaklaştırmaktadır. Aynı nedenlerle, CO<sub>2</sub> salınımlarının büyük çoğunluğu (~%30) binalar ve inşaat sektöründen kaynaklanmaktadır. Örneğin; İngiltere'de CO<sub>2</sub> salınımının yaklaşık %40'ı yapılardan kaynaklanmaktadır [8-10].

Kapalı ortamlarda geçirilen sürenin uzaması ve düşük hava kalitesinden kaynaklanan sağlık problemlerinin yanı sıra iç mekanlarda kullanılan plastik ve polimer malzemelerden salınan kimyasal madde buharlarının zararları, sağlık bakımından iç hava kalitesinin önemi artırmıştır. Ortam havasındaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, sağlıklı iç hava kalitesi için üst sınır olan 1000 ppm'e yaklaştığında; baş ağrısı, yorgunluk ve konsantrasyon eksikliği gibi insan sağlığı ve verimli çalışma için olumsuz belirtiler görülmektedir [11, 12].

İç mekanlarda hava kalitesinin sürdürülebilmesi için gerekli havalandırma ve klima sistemlerinin boyutsal tasarımında, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ve taze hava üzerinde etkili faktörler olan; kapalı ortamın hacmi ve ortamdaki insan sayısı, ortamda bulunanların aktivite düzeyleri ve bulunma süreleri, varsa ortamdaki yanma süreçleri, hava değişim oranları ve gerekli taze hava debisi dikkate alınmalıdır. Örneğin; Amerika'da yapılan bir çalışma, eğitim binalarındaki dersliklerde CO<sub>2</sub> oranının 1000 ppm'e çıkmasının, derslere girmeme oranında %10 ila %20'lik bir artışa sebep olduğunu göstermiştir. Yapılan başka bir çalışmaya göre de, CO<sub>2</sub> oranındaki her 100 ppm'lik artışın, öğrencilerin derslere katılımını %0.2 oranında düşürdüğü, tam tersine havalandırma oranını artırmanın ise katılımı %10 ila %17 oranında artırdığı belirtilmiştir [12].

Merkezi havalandırmada, çok uzun hava dağıtım ve toplama kanallarının kullanılması, sistemdeki basınç kayıplarını ve fanlardaki enerji tüketimini artırmaktadır. Her bir hacmin bağımsız havalandırılması için kullanılan yerel havalandırma sistemlerinde, hava dağıtım kanalları kısa olduğundan, bu hacimlerdeki hava koşullarını kontrol etmekte; fan, filtre ve ısı değiştiriciden oluşan kompakt üniteler kullanılmaktadır. Yerel havalandırmanın; fanlardaki enerji tüketiminin azaltılması, geçiş mevsimlerinde fan destekli havalandırma yapılabilmesi, kat yüksekliği ile tavan yüksekliği arasındaki farkın (havalandırma kanalları nedeniyle) azalması, bağımsız debi kontrolü, doğal

havalandırmada yüksek katlardaki rüzgar basıncı probleminin engellenmesi gibi bir çok avantajları vardır. Bu avantajlarından dolayı yerel iklimlendirme sistemlerinin, merkezi sistemlerin yerini alabileceği tartışılmaktadır [13].

Havalandırma kaynaklı ısı kayıpları, ısı geri kazanımlı yerel havalandırma sistemleri ile binanın yalıtım ve sızdırmazlık durumuna bağlı olarak %90'a kadar azaltılabilmektedir. Havalandırma sisteminin en önemli parçası olan ısı değiştiricinin boyutları, yapısı ve malzemesi; akışın düzenlenmesi; ısı ve kütle geçişi; hava akımlarının sıcaklığı, nemi ve debileri; fan ve kanalların boyutları; kanallardaki akış hızı ve basınç kayıpları; sistem verimini belirleyen önemli değişkenlerdir [14, 15].

Yerel havalandırma sistemlerinin en önemli parçası olan ısı değiştirici imalatında; ısı iletim katsayılarının, sıcaklık ve mekanik dayanımlarının düşük olması gibi dezavantajlarına rağmen, plastik ve polimer malzemeler; düşük maliyetleri ve kolay işlenebilir olmalarının yanı sıra esneklikleri, yüksek korozyon dirençleri ve düşük yoğunluklarından dolayı kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu malzemelerin özellikleri iyileştirilmeli ve uzun vadeli performansları araştırılmalıdır. Havalandırma ve iklimlendirme sistemlerindeki ısı değiştiricileri plastik malzemeler için uygun bir kullanım alanıdır [16, 17].

Merkezi ve yerel havalandırma sistemlerinde kullanılan havadan havaya LID'leri ile ısının geri kazanıldığı bazı deneysel ve sayısal çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Lu ve diğerleri 300x300 mm boyutlarında ve 180 mm yüksekliğindeki çapraz akışlı bir LID'de ısı geçişini deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, deneylerde hava debilerini 40-160 m<sup>3</sup>/h aralığında değiştirerek, farklı levha malzemeleri ve kalınlıkları için ısı değiştiricinin ısı etkenliğinin %75-45 aralığında değiştiğini ve basınç düşümünün de 20 Pa'dan az olduğunu belirtmişlerdir [18].

Fernández-Seara ve diğerleri, konutlarda kullanılan dengelenmiş havalandırma sistemleri için tasarlanan, 540x385x285 mm boyutlarında, yaklaşık ısı geçiş alanı 19.4 m<sup>2</sup> olan, zıt akışlı, polistrenden yapılmış bir LID'de, ısının geri kazanımını deneysel incelemişlerdir. Temiz hava ve egzoz havası debileri, 50-175 m<sup>3</sup>/h aralığında değiştirilmiştir. 4 saatlik deneyler sonucunda, performansı incelenen LID'de, duyulur ısı etkenliğinin %80 ve geri kazanılan ısı gücünün 672 W olduğu belirtilmiştir [19].

Mardiana-Idayu ve Riffat, 455 mm yüksekliğinde, 545 mm genişliğinde ve 645 mm uzunluğundaki bir LID'de, ısının geri kazanımını deneysel incelemişlerdir. Egzoz ve temiz hava taraflarında dengelenmiş havalandırma yaklaşımını esas alarak, kanallardaki hava hızını 1-3 m/s aralığında değiştirmişlerdir. Deneylerde seçilen hızlar için duyulur ısı etkenliğinin %66-48 aralığında değiştiği, 3 m/s hava hızındaki maksimum ısı geri kazanımının 134 W olduğu ve test edilen hava hızlarındaki sıcaklık farkının 2.9-4.3°C olduğu belirtilmiştir [20].

Al-Waked ve diğerleri, 185x185 mm boyutlarında ve kanal yüksekliği 2 mm olan çapraz akışlı bir levhalı ısı değiştiricide, ısının geri kazanımını, laminer akış koşullarında 3-boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (HAD) kullanarak sayısal incelemişlerdir. Isı geçiş levhası olarak kalınlığı 5µm olan selüloz asetatın kullanıldığı ısı değiştiricide, sıcak ve soğuk hava arasındaki sıcaklık farkının 8°C olduğu kabul edilmiştir. Araştırmacılar, 100-200 m<sup>3</sup>/h debi aralığında yaptıkları sayısal çözümlerde, duyulur ısı etkenliğinin %80-70 olduğunu ve tek bir kanal için 5-40.1 W ısının geri kazanıldığını belirtmişlerdir. Aynı hacimsel debi için hidrolik çap arttıkça kanaldaki akış hızlarının azaldığını ve sabit hidrolik çapta hacimsel debi arttıkça, basınç düşümünün de arttığını belirtmişlerdir [21].

Al-Waked ve diğerleri, enerjinin geri kazanıldığı havalandırma sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricilerdeki, eşlenik (conjugated) ısı geçişini; HAD yaklaşımıyla türbülanslı akış koşullarında incelemişlerdir. Z ve L şekilli akışların ısı değiştiricilerin ısı performansındaki iyileşmeye etkisini değerlendirmişlerdir. Sayısal çözümlerde; Standart k-ε türbülans modelini, eşlenik ısı geçişini ve akışta iyileştirilmiş duvar fonksiyonunu (Enhanced Wall Treatment) ve kağıttan üretilmiş (60 gr/m<sup>2</sup>) ısı geçiş levhasını kullanmışlardır. Isı değiştiricilerin performansını 0.25-3 m/s hava hızı aralığında incelemişlerdir. Düşük (0.76 m/s) ve yüksek (2 m/s) hava hızlarında yaptıkları analizlerde, duyulur ısı etkenliğinin %78.4-43.1 aralığında değiştiğini, ısı enerji kazanımının 18.4 W ila 103.6 W aralığında olduğunu ve basınç düşümünün 3.6-168.5 Pa aralığında değiştiğini belirtmişlerdir [22].

Bu çalışmada, küçük ölçekli yerel havalandırma ve iklimlendirme uygulamaları için üretilecek bir ısı geri kazanım cihazında kullanılmak üzere, geri dönüştürülebilir ve düşük maliyetli malzemelerle (plastik ve kağıt gibi) çapraz akışlı bir LID'nin tasarlanması amaçlanmaktadır. 50-200 m<sup>3</sup>/h taze hava hacimsel debileri dikkate alınarak ve LID'nin toplam maliyetinin düşük olması için en uygun tasarım ve işletme parametrelerinin seçilmesi hedeflenmiştir. İleride yapılacak deneysel çalışmalar ve LID'nin destek elemanlarının 3-boyutlu yazıcılarda üretilebileceği değerlendirilerek, levha ölçüleri 180x180 mm olarak seçilmiştir. LID'nin imalatının daha kolay olması ve uygulamada daha yaygın kullanılmasından dolayı çapraz akış düzenlemesi tercih edilmiştir. LID'nin kanallarındaki akışın laminer koşullarda kalması şartıyla; **ortalama hava akış hızı**, **kanal yüksekliği**, kanal içindeki hava akımının karışmaması, ısı geçişini iyileştirmek ve sistem mukavemetinin artırılması için kullanılan **alt kanal sayısı** ve ısı geçiş yüzeyi olarak kullanılan **levha malzemesi** tasarım parametreleri olarak seçilmiştir. Yapılan ön hesaplamalar ve literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak, seçilen tasarım parametreleri için en uygun sayısal değerler belirlenmiştir. Üçer seviyeli dört değişken için yapılan Taguchi analizinde, L<sub>9</sub>-(3<sup>4</sup>) ortogonal dizisi kullanılarak, HAD yöntemiyle incelenecek 9 farklı LID modeli belirlenmiştir. LID'in 3-boyutlu HAD modeli, sıcak ve soğuk hava akımlarının kanala giriş-çıkış etkilerini de değerlendirecek şekilde oluşturulmuştur. Taguchi analizinde hedeflenen performans parametresi olarak, "temiz tarafta geri kazanılan ısı gücün, aktarabilecek maksimum ısı güce oranı şeklinde tanımlanan", **ısıl etkenlik** seçilmiştir. Isıl etkenliği en büyük yapmak için her bir değişkene ait seçilmesi gerekli seviye, Taguchi analizi ile elde edilmiştir. Taguchi yöntemi, aynı zamanda ısıl etkenliği en büyük olan tasarıma ait ısı değiştirici performansını da öngörebilmektedir. Bu ısıl etkenlik, en uygun tasarım için oluşturulan HAD modelinden elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

## 2. TAGUCHI YÖNTEMİ

Genichi Taguchi tarafından geliştirilen, güvenilir bir tasarım yöntemi olarak bilinen Taguchi yöntemi, mühendislik süreçlerinin ve tasarımlarının verimliliğini büyük ölçüde geliştirmektedir. Taguchi yöntemi, ürün/süreç tasarımını geliştirmek ve üretim problemlerini çözmek için güçlü bir istatistiksel tekniktir.

Yapılması gereken deneysel çalışmaların sayısı, etkili parametre veya faktörlerin sayısına ve bunların alt seviyelerinin sayısına bağlıdır. Parametre sayısı ve bu parametrelerin seviyeleri arttıkça, deneylerin sayısı da artmaktadır. Dolayısıyla tam faktöriyel yöntemi olarak bilinen tasarım sürecinde, yapılacak deneylerin sayısı, parametrelerin sayısı ve alt seviyelerin sayısı ile hesaplanır. Taguchi tarafından 1980'lerde önerilen ve ortogonal dizi (OD) olarak adlandırılan yeni deney tasarımında; ana verilerde önemli bir kayıp olmadan ve tam faktöriyel deney tasarımından daha az deney sayısı ile hedef tasarım için gerekli bilgileri elde etmede kullanılacak en uygun parametre alt seviyelerinin kombinasyonları sunulmuştur. Örneğin, her birinin dört seviyesi olan üç parametrenin etkilerinin inceleneceği bir deneyi tasarlamak için tam faktöriyel deney tasarımı kullanılacak olursa, 4<sup>3</sup> = 64 deneye ihtiyaç duyulur. Ancak, deneylerin tasarımında Taguchi L<sub>16</sub> OD kullanılırsa, sadece 16 deney yeterli olacaktır. Parametre sayısı ve bu parametrelere ait alt seviyeler arttıkça gerekli deneylerin sayısı da çoğalacaktır. Her biri dörder seviyeli sekiz parametrenin bulunması durumunda, Taguchi OD'ye göre 32 deney gerekirken, tam faktöriyel deney tasarımıyla 4<sup>8</sup> = 65536 deney yapılmalıdır. Verilen örneklerden de anlaşılacağı gibi Taguchi'nin önerdiği OD tasarımları, tam faktöriyel deney tasarımına göre deneysel tasarım yükünü önemli ölçüde hafifletmektedir [23,24].

Taguchi yönteminde, sisteme etkisi olan değişkenler, kontrol edilebilen faktörler (girdiler) ve kontrol edilemeyen faktörler (gürültü) olarak ikiye ayrılmıştır. Kontrol edilemeyen faktörler; pratikte kontrolü olmayan ya da çok pahalıya mal olacağından düzenlenemeyen çevresel faktörler ya da tespit edilemeyen diğer faktörlerdir. Taguchi, gürültü faktörlerinin deneysel sonuçlar üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak ya da azaltmak için gürültü faktörlerinin bir sonucu olarak, kontrol faktörlerinin ve alt seviye değişkenliğinin, ortalama yanıt değerine etkilerini tanımlamada, Sinyal/Gürültü (S/G) oranını kullanmıştır. Bu S/G oranı; en küçük en iyi, en büyük en iyi ve ağırlıklı (nominal) en iyi şeklinde 3 farklı kategoride sınıflandırılmıştır [25].

Etkili değişkenler, performans parametresi ve gürültü faktörlerinin daha iyi anlaşılması için basit bir süreç örneği olarak "kek hamurunun hazırlanması ve pişirilmesi"[26]:

- Kek hazırlanırken girdiler (kontrol edilebilen faktörler): şeker, un, yumurta, süt, yağ, kabartma tozu, pişirme süresi ve sıcaklığı.
- Müşteri gereksinimleri yani performans parametreleri (çıktı) : kekin görünüşü, tadı ve kokusu.
- Kek pişirilirken kontrol edilemeyen faktörler (gürültü): fırın tipi, girdiler ile ilgi kontrol edilemeyen minör kalite parametreleri, deniz seviyesinden olan yükseklik gibi.

Taguchi performans kategorisine göre S/G oranları;

En büyük en iyi (The Higher the Better or the Larger the Better) yanıt/tepki istenildiğinde; daha yüksek veya daha büyük olan seçilmelidir. Örneğin; malzemenin akma dayanımı, kritik elektrik akımı ve bir tankın akışkanla doldurulması için gerekli kütleli debi gibi [27].

$$S/G = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

En küçük en iyi (The Lower the Better or the Smaller the Better) yanıt/tepki istenildiğinde; daha düşük veya daha küçük olan seçilmelidir. Örneğin; bir motorun yakıt tüketimi ve uçak parçalarının ağırlığı gibi [27].

$$S/G = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

Ağırlıklı (nominal) en iyi (Nominal the Better) istenildiğinde ise; belirtilen değerden ne daha küçük ne de daha büyük bir değerde olan seçilmelidir. Örneğin; kimyasal reaksiyon bileşenlerinin oranları ve nominal boyutlara sahip mekanik montaj parçaları gibi [27].

$$S/G = 10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{S_y^2} \right) \quad (3)$$

Yukarıdaki ifadelerde;  $y$ , gözlemlenen verileri,  $\bar{y}$ , gözlemlenen verilerin ortalamasını,  $S_y^2$ ,  $y$ 'nin varyansını ve  $n$  ise gözlem sayısını ifade etmektedir. Taguchi yönteminde, son adımda yapılan ANOVA (Analysis of Variance) analizi; incelenen performans kategorisine göre belirlenen performans ölçütüne, parametrelerdeki herhangi bir farklılığın etkisini belirleyerek, karar vermede yardımcı olmak için kullanılan istatistiksel bir araçtır. Taguchi yönteminde, hangi girdi parametrelerinin ve alt seviyelerinin, cevap veya çıktı olarak seçilen performans ölçütünün kalitesini önemli ölçüde etkilediğinin araştırılmasında, istatistiksel ANOVA analizi kullanılmaktadır [23-25].

## 2.1. Kontrol Parametreleri, Alt Seviyeler ve Performans Ölçütünün Belirlenmesi

Yapılan literatür araştırmalarına göre; LID tasarımında ve sayısal çözümlerde etkileri değerlendirilecek parametre sayısı 4 ve bu parametrelerin her birinin alt seviyelerinin sayısı 3 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla LID tasarımında kullanılacak modellerin sayısını belirlemek için kullanılacak en uygun Taguchi OD'sine göre serbestlik derecesi 9 ( $L_9-3^4$ ) olarak elde edilmiştir.

Tablo 1.'de LID tasarımında performansa etkileri değerlendirilmek üzere seçilen etkili parametreler ve bu parametrelerin literatüre uygun olarak yapılan ön hesaplamalar sonucunda seçilen alt seviyeleri verilmiştir. Tablo 2.'de ise  $L_9$  Taguchi OD'sine göre LID tasarım değişkenlerinin alt seviyeleri ile oluşturulan 9 farklı sayısal model (alt seviye kombinasyonları) verilmiştir.

**Tablo 1.** Seçilen etkili parametreler ve alt seviyeleri.

Seviye No	Alt kanal sayısı N (adet)	Kanal yüksekliği H (mm)	Ortalama akış hızı u ( m/s)	Levha malzemesi M
1	2	2	2	Alüminyum Folyo
2	6	3	2.5	Kağıt
3	18	4	3	ABS Film

**Tablo 2.** L<sub>9</sub> OD'sine göre tasarım değişkenlerinin alt seviyeleri ile oluşturulan 9 farklı sayısal LID modeli.

Sayısal Model No	N (adet)	H (mm)	u (m/s)	M
1	2	2	2	Alüminyum Folyo
2	2	3	2.5	Kağıt
3	2	4	3	ABS Film
4	6	2	2.5	ABS Film
5	6	3	3	Alüminyum Folyo
6	6	4	2	Kağıt
7	18	2	3	Kağıt
8	18	3	2	ABS Film
9	18	4	2.5	Alüminyum Folyo

LID tasarımında, performans ölçütü olarak seçilen “ısı etkenliği” maksimum yapacak tasarım değişkenlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan Taguchi analizinde “en büyük en iyi” kategorisi seçilmiştir.

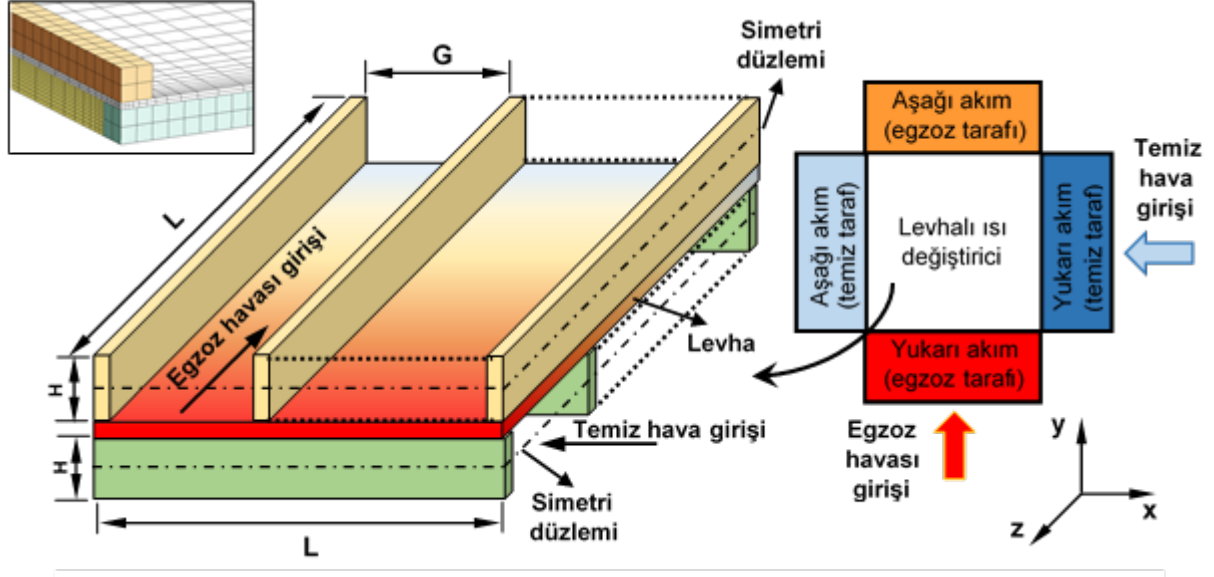
### 3. SAYISAL TASARIM VE ÇÖZÜMLER

Küçük bir konut için tasarlanması hedeflenen, ısı ve hidrolik performansına seçilen tasarım değişkenlerinin etkileri incelenen, havadan havaya çapraz akışlı bir LID'in, levha boyutları ve toplam ısı değiştirici yüksekliği 180 mm seçilmiştir. Konutta iç ortamdan çevreye atılan egzoz ve çevreden iç ortama alınan temiz hava debileri eşit (dengelenmiş havalandırma) tutulmuştur. LID'nin şematik resmi, boyutları, sınır şartları ve ağ yapısı Şekil 1'de verilmiştir. LID'de kullanılan levha sayısının fazla olmasından dolayı LID'nin tamamının modellenmesi yerine, temiz taraf ve egzoz tarafından birer kanal seçilmiştir. Bu kanalların da yarısı ile simetrik sınır şartı tanımlanarak, LID'in sayısal modeli oluşturulmuştur. LID sayısal modelinin çözümünde yapısal ağ kullanılmıştır. Temiz ve egzoz hava kanallarında kullanılan ağ yapısı levha yüzeylerine doğru sıkılaştırılmıştır.

Sayısal çözümlerde; laminer alt tabakanın çözümünde genellikle  $y^+ < 5$  için ince yapısal ağlar (fine mesh) gerekmektedir [28]. Bu gerekçeyle çalışmada seçilen en yüksek hacimsel debide (ortalama hava akış hızında) ve kanallar içerisindeki Reynolds sayısının düşük olması nedeniyle,  $y^+ < 5$  için ağ yapısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. 5 farklı ağ yapısı için sonuçlar Tablo 3.'de verilmiştir. Sayısal çözümlerde iyileştirilmiş duvar fonksiyonu (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır. Daha düşük hacimsel debilerde de aynı ağ yapısı kullanılarak sayısal çözümler yapılmıştır. LID kanallarının giriş ve çıkışında oluşacak türbülans etkilerini de dikkate almak için sayısal çözümlerde, Standart k-ε (epsilon) türbülans modeli seçilmiştir [29,30]. Ayrıca LID tasarımını daha gerçekçi koşullarda yapmak için hem temiz hava hem de egzoz tarafında kanalların girişlerinden önce ve çıkışlarından sonra sayısal çözüm bölgeleri ellişer mm uzatılmıştır. Her iki kanaldaki akışlar ve iki kanalı ayıran levha üzerinden gerçekleşen eşlenik ısı geçişi için sayısal çözümler 3-boyutlu olarak ele alınmıştır.

Temiz ve egzoz havası tarafında, uzatılan bölgelerin girişindeki hız ve sıcaklık profillerinin düzgün dağılımlı ve çıkışlarda ise basıncın sabit olduğu (pressure outlet=0) kabul edilmiştir. Sayısal çözümlerde, egzoz havasının 298 K ve temiz havanın 283 K'de LID'ye girdiği ve giriş sıcaklıkları arasındaki farkın 15 K olduğu kabul edilmiştir. Temiz hava ve egzoz havası arasındaki ısı geçişi

yüzeyini ve aynı zamanda LID kanallarını oluşturan levha malzemesi olarak; ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene,  $k= 0.15 \text{ W/mK}$ ), alüminyum folyo ( $k=202.4 \text{ W/mK}$ ) ve kağıt ( $k=0.09 \text{ W/mK}$ ) seçilmiştir. Levhalarının kalınlıkları eşit ve  $0.2 \text{ mm}$ 'dir. Havanın termofiziksel özellikleri ise Kaynak [31]'den alınmıştır.



**Şekil 1.** Levhali ısı değiştiricinin şematik resmi, boyutları, sınır şartları ve ağ yapısı.

Sıkıştırılamaz, zamandan bağımsız ve yerçekimi etkisinin ihmal edildiği kanal akışlarının sayısal çözümünde kullanılan Navier-Stokes ve türbülans modeli denklemleri, Fluentte ayrıklaştırılmış ve çözülmüştür. Hız-basınç ikilisinin tanımlanmasında SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması seçilmiş ve bu algorithmada ikinci mertebeden (Second Order Upwind) ayrıklaştırmalar kullanılmıştır [32]. Varsayılan rahatlatma parametreleri (Under-Relaxation factors; basınç: 0.3, momentum: 0.7, türbülans kinetik enerji: 0.8 ve türbülans yıkım oranı: 0.8) seçilmiştir. Yakınsama kriteri için geçerli değerler (süreklilik, hız bileşenleri,  $k$  ve epsilon denklemleri:  $10^{-3}$ , enerji denklemi:  $10^{-8}$ ) kullanılmıştır [33]. Sayısal çözümler ortalama 130 iterasyonda tamamlanmıştır.

**Tablo 3.** Ağ yapısından bağımsızlık çalışması.

Ağ sayısı	$\Delta T_{\text{temiz}}$ (K)	$\Delta p_{\text{temiz}}$ (Pa)	$\Delta T_{\text{egzoz}}$ (K)	$\Delta p_{\text{egzoz}}$ (Pa)
1379615	8.89	75.85	8.90	73.41
1758000	8.64	73.83	8.64	66.92
1956765	8.71	72.72	8.71	69.69
2172975	8.71	72.44	8.71	69.77
2314715	8.72	72.52	8.72	69.65

Sayısal çözümlerde, her iki akış tarafı için kütlelenin ve egzoz-temiz hava tarafları arasında enerjinin korunum denklemleri [34]:

$$\dot{m}_{\text{giren}} = \dot{m}_{\text{çıkan}} \quad (\text{kg/s}) \quad (4)$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{E}_{\text{çıkan}} \quad (\text{W}) \quad (5)$$

şeklinde. Sayısal çözüm sonuçları kullanılarak hesaplanacak bağımlı değişken (performans ölçütü) olan ısı etkenlik; “temiz tarafta geri kazanılan ısı gücün, geri kazanılabilecek maksimum ısı güce oranı” şeklinde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [35].

$$\varepsilon = \frac{Q_{gk}}{Q_{mak.}} \quad (6)$$

Temiz tarafta geri kazanılan ısı gücü ve maksimum ısı gücü ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$Q_{gk} = \dot{m} c_p (T_{\phi} - T_g) \quad (W) \quad (7)$$

$$Q_{mak.} = \dot{m} c_p (T_{egzoz,g} - T_{temiz,g}) \quad (W) \quad (8)$$

Sayısal çözüm sonuçları kullanılarak hesaplanan ısı etkenlikler, en büyük en iyi kategorisinde S/G oranına dönüştürülmüştür. S/G oranına göre performansı en yüksek LID tasarımı için seçilmesi gerekli parametrelerin alt seviyeleri belirlenmiştir. Tablo 2.'de verilen  $L_9$  OD'de bulunmayan bu parametre alt seviyeleri kullanılarak yeni bir sayısal LID modeli oluşturulmuştur. Bu modelin çözümünden elde edilen sonuçlarla; ısı etkenliği maksimum yapacak parametre alt seviyelerinin kullanılması durumunda ulaşılabilecek maksimum ısı etkenlik belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Seçilen parametreler ve alt seviyeleri ile  $L_9$  OD'sine uygun oluşturulan 9 model için yapılan sayısal çözümlerin sonuçları kullanılarak, hesaplanan ısı etkenlikler ve en büyük en iyi kategorisi için S/G oranları Tablo 4.'de verilmiştir. Tablo 2. ve Tablo 4.'e göre en büyük en iyi S/G oranında, en yüksek ısı etkenliğinin elde edildiği 4 numaralı modele ait parametre seviyeleri; **alt kanal sayısı 6, kanal yüksekliği 2 mm, ortalama hava hızı 2.5 m/s ve levha malzemesi ABS Film** şeklindedir. S/G oranı ne kadar büyük olursa, ortalama değer etrafındaki değişkenlik ve kalite kaybı da o kadar az olmaktadır. Yüksek S/G oranları; sinyalin etkisinin, gürültü faktörlerinin rastgele etkilerinden çok daha baskın olduğunu belirtmektedir. Yüksek S/G oranı, her zaman minimum varyansla seçilen performans parametresi üzerinde en iyi sonucu sağlamaktadır. Bu nedenle, en büyük en iyi kategorisine göre en küçük varyansla, Tablo 2.'deki 4 numaralı LID sayısal modelinde beklenen sonuç (en yüksek ısı etkenlik) elde edilmiştir. Ancak 4 numaralı LID modelinde kullanılan parametre alt seviyeleri, başlıca etkiler analizinden (Analysis of Means-ANOM) elde edilen en uygun parametre alt seviyelerinin kombinasyonundan farklıdır.

Başlıca etkiler analizinde, bir başka deyişle seçilen faktörlerin önem derecelendirmesinde kullanılacak ortalama S/G oranları, her bir parametre ve alt seviyeleri için hesaplanarak Tablo 5.'de verilmiştir.

Ortalama S/G oranı sonuçları kullanılarak, istatistiksel bir yaklaşım olan ANOM'a göre faktörlerin önem seviyeleri belirlenmiştir [36]. En büyük en iyi için ANOM sonuçları Tablo 6.'da verilmiştir. Tablo 6.'daki delta ( $\Delta$ ), bir faktör için ortalama S/G oranlarının en yüksek ve en düşük değerleri arasındaki farktır. Delta, LID tasarımında performans ölçütü olan ısı etkenlikte, faktörlerin önem sıralamasını belirlemektedir ve hangi faktörün performans parametresini (ısı etkenlik) daha fazla etkilediğini belirlememize yardımcı olmaktadır. Taguchi'de ısı etkenlik için faktörlerin önem sıralaması ANOM'a göre; kanal yüksekliği, alt kanal sayısı, ortalama hava akış hızı ve levha malzemesi olarak belirlenmiştir. ANOM'daki S/G oranı sonuçları, aynı zamanda en yüksek ısı etkenliğe sahip LID tasarımı için en uygun tasarım değişkenlerinin belirlenmesini sağlamaktadır.



**Tablo 4.** Isıl etkenlik için S/G oranları.

Sayısal Model No	$\epsilon$ (%)	S/G
1	58.30	35.31
2	45.25	33.11
3	34.45	30.74
<b>4</b>	<b>60.01</b>	<b>35.56</b>
5	46.46	33.34
6	38.87	31.79
7	58.93	35.41
8	50.21	34.02
9	39.79	32.00

**Tablo 5.** Başlıca etkiler için parametre seviyelerin S/G oranları ortalaması.

N (adet)	S/G	H (mm)	S/G
2	33.06	<b>2</b>	<b>35.43</b>
6	33.57	3	33.49
<b>18</b>	<b>33.81</b>	4	31.51
u (m/s)	S/G	M	S/G
<b>2</b>	<b>33.71</b>	<b>Alüminyum Folyo</b>	<b>33.55</b>
2,5	33.56	Kağıt	33.43
3	33.16	ABS Film	33.44

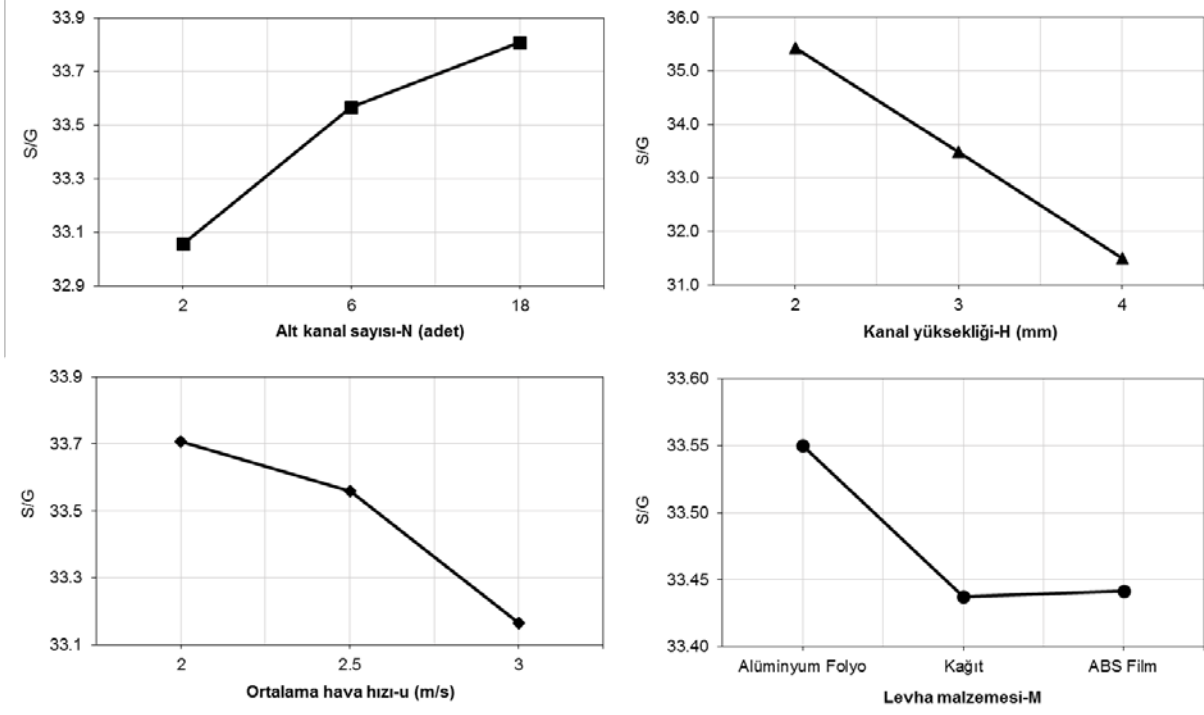
**Tablo 6.** S/G oranları için en büyük en iyi ANOM sonuçları.

Seviye	N (adet)	H (mm)	u (m/s)	M
1	33.06	35.43	33.71	33.55
2	33.57	33.49	33.56	33.43
3	33.81	31.51	33.16	33.44
$\Delta$ (mak–min)	0.75	3.92	0.55	0.12
Sıralama (Rank)	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>

Şekil 2.'de maksimum ısıl etkenlik için ANOM sonuçlarından en uygun LID tasarımı için elde edilen S/G oranı grafikleri verilmiştir. Maksimum ısıl etkenlik için Taguchi ile en büyük en iyi kategorisinde, parametrelerin en uygun alt seviyelerinin kombinasyonu; **alt kanal sayısı:18, kanal yüksekliği:2 mm, ortalama hava akış hızı:2 m/s ve levha malzemesi alüminyum folyo** olarak belirlenmiştir.

#### 4.1. Varyans Analizi (ANOVA)

LID tasarımında performans ölçütü olarak seçilen ısıl etkenliğe, her bir faktörün etkisini değerlendirmek için Taguchi analizi ile birlikte istatistiksel bir yaklaşım olan varyans analizi de (ANOVA) yapılmıştır. Seçilen parametrelerin performans ölçütü olarak belirlenen ısıl etkenliğe nicel etkileri ANOVA kullanılarak tahmin edilmiştir [37].



**Şekil 2.** Maksimum ısı etkenlik için parametrelerin S/G oranları.

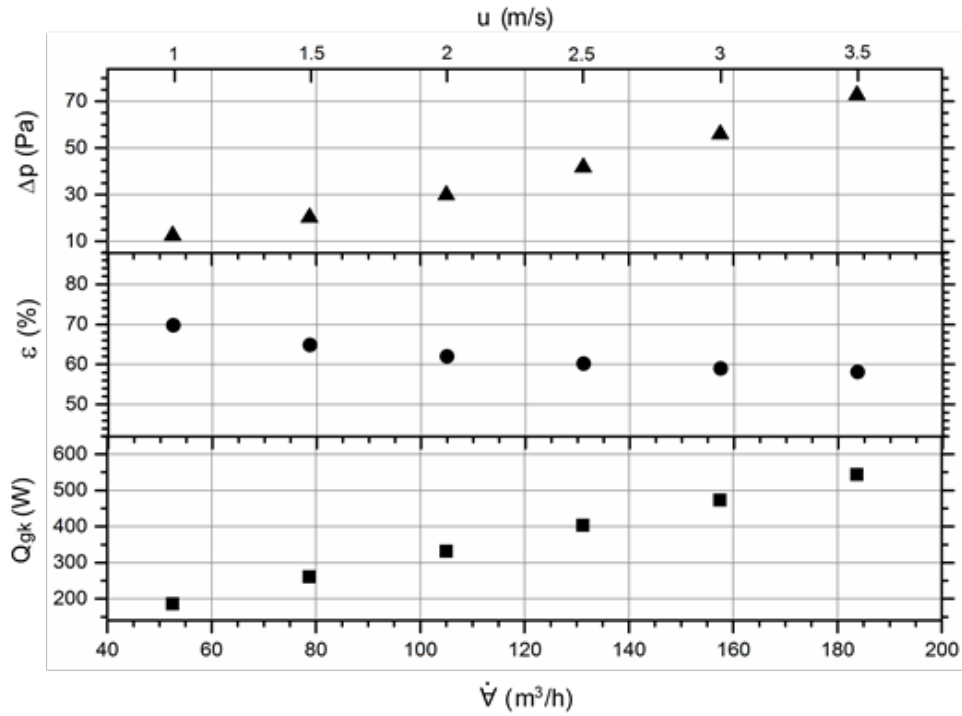
Tablo 7.'de %90 güven aralığı için ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. P-değeri 0.1'den küçük olan parametrelerin performans ölçütüne, istatistiksel olarak anlamlı bir katkısı olduğu değerlendirilmiştir. Tablo 7.'deki son sütunda parametrelerin yüzde etkileri verilmiştir. En yüksek etki %95.33 ile kanal yüksekliğinde iken diğer parametrelerin etkisi; alt kanal sayısı için %2.28, hız için %1.32 ve levha malzemesi için %1'den azdır. Bu nedenle LID tasarımında ele alınan parametrelerden, kanal yüksekliği ve alt kanal sayısının, ısı etkenlik bakımından en önemli parametreler olduğu elde edilmiştir.

**Tablo 7.** Varyans analizi sonuçları. Kategorik tahmin kodlaması (-1,0,1).

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	% Etki
Alt kanal sayısı	1	16.374	16.374	6.86	0.003	2.28
Kanal yüksekliği	1	685.657	685.657	287.11	0.079	95.33
Ortalama akış hızı	1	9.475	9.475	3.97	0.000	1.32
Levha malzemesi	2	0.543	0.272	0.11	0.140	0.08
Hata	3	7.164	2.388		0.896	0.99
Toplam	8	719.214				100

$F_{0.1,1,3}=5.54$

LID tasarımında; ANOM sonuçlarına göre levha malzemesinin etkisi son sıradadır ve ANOVA sonuçlarına göre de levha malzemesinin etkisi %1'den azdır. Ayrıca Tablo 5.'de levha malzemeleri için elde edilen S/G oranları arasındaki farklar da %1'den azdır. Taguchi sonuçlarına göre; LID'de sıcak ve soğuk hava tarafları arasında ısı geçiş yüzeyi olarak kullanılacak alüminyum folyonun işlenmesinde zorluklar (işleme sırasında daha kolay yırtılma, yüzeyin daha çabuk bozulması gibi) bulunmaktadır. Bahsedilen tüm koşullar birlikte değerlendirildiğinde, temini, işlenmesi ve geri dönüştürülmesi diğer levha malzemelerine göre daha kolay olduğundan, levha malzemesi olarak kağıt tercih edilebilir.



**Şekil 3.** En uygun levhalı ısı değıştirci tasarım için geri kazanılan ısı güç, ısıl etkenlik ve basınç düşümünün hacimsel debiye bağılı değışimi.

Şekil 3.'de Taguchi yöntemi ve HAD kullanarak elde edilen en uygun LID tasarımında geri kazanılan ısı güç ( $Q_{gk}$ ), ısıl etkenlik ( $\epsilon$ ) ve uzatılan bölgelerle birlikte LID kanallarındaki basınç düşümünün ( $\Delta p$ ) hacimsel debiye bağılı değışimleri verilmiştir. Hacimsel debinin artmasıyla geri kazanılan ısı güç ve basınç düşümü artarken, ısıl etkenlik azalarak sabitlenmiştir. Tasarlanan LID'de  $\sim 170$  m<sup>3</sup>/h hacimsel debiden sonra ısıl etkenlikte çok fazla bir değışim olmadığı elde edilmiştir. Dolayısıyla,  $170$  m<sup>3</sup>/h hacimsel debide geri kazanılan ısı güç  $\sim 570$  W ( $\sim 13.7$  kW-h/gün) ve ısıl etkenlik  $\sim 58.5$  iken, basınç düşümü  $\sim 65$  Pa olarak elde edilmiştir. Ancak LID tasarımında Taguchi yönteminde seçilen alt seviyelerin en uygun kombinasyonuna göre oluşturulan tasarımda; hava debisi  $\sim 105$  m<sup>3</sup>/h, geri kazanılan ısı güç  $\sim 330$  W ( $\sim 7.9$  kW-h/gün), ısıl etkenlik %62.02 ve basınç düşümü  $\sim 30$  Pa olarak elde edilmiştir.

#### 4.2. Taguchi Analizinin Doğrulanması

En uygun kombinasyondaki parametre alt seviyeleri kullanılarak oluşturulan LID sayısal modeli, Bölüm 3.'de bahsedilen aynı sınır şartları için tekrardan çözümlenerek, elde edilen sonuçlarla ısıl etkenlik hesaplanmıştır. En uygun kombinasyon için elde edilen ısıl etkenlik değeri, Taguchi analizi ile tahmin edilen değere karşılaştırılarak doğrulanmıştır [38]. Tablo 8.'de Taguchi ile tahmin edilen ve en uygun kombinasyondan elde edilen ısıl etkenlik sonuçları verilmiştir. Taguchi tahmini ve sayısal çözümler arasındaki fark %2.42'dir. Bu sonuçlar Taguchi tahmini ile sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.

**Tablo 8.** Sayısal çözümler ve Taguchi ile tahmin edilen ısıl etkenliklerin karşılaştırılması.

	Taguchi tahmini	Sayısal çözümler	Fark (%)
$\epsilon$ (%)	63.56	62.02	2.42
S/G	36.06	35.85	-

## 5. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, üç-dört kişinin yaşadığı küçük bir konutun havalandırılması ( $50-200 \text{ m}^3/\text{h}$ ) için kullanılacak havadan havaya çapraz akışlı bir LID'nin, en yüksek ısıl etkenlikle, tasarlanması amaçlanmıştır. Seçilen tasarım değişkenlerinin, ısıl etkenliğe etkilerinin incelenmesinde ve en uygun alt seviye kombinasyonunun belirlenmesinde, Taguchi yöntemi ve HAD sayısal tasarım yöntemi birlikte kullanılmıştır. Başka bir ifadeyle çapraz akışlı bir LID'de; alt kanal sayısı, kanal yüksekliği, ortalama hava akış hızı ve levha malzemesinin, "temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücün, aktarılacak maksimum ısıl güce oranı" şeklinde tanımlanan ısıl etkenlik üzerindeki etkileri, Taguchi yöntemi ile incelenmiştir. LID tasarımı için seçilen yapısal ve işletme parametrelerinin yanında geometrik parametreler de göz önünde bulundurularak, en yüksek ısıl etkenlik, oluşturulan 3-boyutlu sayısal modeller kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- OD'deki faktörlerin alt seviyelerinin kombinasyonlarından, en büyük en iyi kategorisinde minimum varyansla hedeflenen değer (en yüksek ısıl etkenlik); alt kanal sayısı: 6, kanal yüksekliği: 2 mm, ortalama hava akış hızı: 2.5 m/s ve levha malzemesi ABS film kombinasyonunda elde edilmiştir.
- En yüksek ısıl etkenlik için ANOM'a göre faktörlerin en uygun alt seviyelerinin kombinasyonu ise; alt kanal sayısı: 18, kanal yüksekliği: 2 mm, ortalama hava akış hızı: 2 m/s ve levha malzemesi: alüminyum folyo olarak elde edilmiştir. Ancak levha malzemesinin LID tasarımına etkisinin son sırada ve çok az (<1%) olmasından dolayı, daha kolay temin edilen ve işlenebilen kağıt, levha malzemesi olarak tercih edilebilir.
- ANOVA analizi sonuçlarına göre seçilen tasarım parametrelerinin ısıl etkenliğe olan yüzde etkileri sırasıyla; alt kanal sayısı için %2.28, kanal yüksekliği için %95.33, ortalama hava akış hızı için %1.32, levha malzemesi için %0.08 olarak elde edilmiştir.
- En yüksek ısıl etkenlik için faktörlerin en uygun seviyeleri kullanılarak; Taguchi yöntemi ile tahmin edilen ısıl etkenlik (%63.56) ve yeni LID sayısal modelinin sabit sınır şartlarındaki çözümünden elde edilen ısıl etkenlik (%62.02) arasındaki fark %2.42'dir.
- Taguchi yöntemi ve sayısal çözüm ile elde edilen en yüksek ısıl etkenliğe sahip LID için elde edilen tasarım parametrelerinin kullanılması durumunda, çalışmanın asıl hedefi olan konuttaki temiz hava ihtiyacını karşılamada yeterli hava debisi  $\sim 105 \text{ m}^3/\text{h}$  ile sağlanırken,  $\sim 330 \text{ W}$  ( $\sim 7.9 \text{ kW-h/gün}$ ) ısıl güç de geri kazanılmıştır. Bu durumdaki basınç düşümü  $\sim 30 \text{ Pa}$  iken, ısıl etkenlik %62 olarak elde edilmiştir. Fert başına gerekli olan ortalama temiz hava debisinin  $\sim 25 \text{ m}^3/\text{h}$  olduğu durumda, bu küçük konut için en yüksek ısıl etkenlik hedeflenerek elde edilen LID tasarımı ile 4 kişinin taze hava ihtiyacı karşılanabilmektedir.

## 6. SEMBOLLER ve KISALTMALAR

ANOM	- Analysis of Means
ANOVA	- Analysis of Variance
$c_p$	- özgül ısı, (J/kg K)
H	- kanal yüksekliği, (mm)
HAD	- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LID	- Levhalı Isı Değiştirici
M	- levha malzemesi
N	- alt kanal sayısı, (adet)
OD	- ortogonal dizi
Q	- ısıl güç, (W)
S/G	- Sinyal/Gürültü oranı
T	- sıcaklık, (K)
u	- ortalama hava akış hızı, (m/s)
$\epsilon$	- ısıl etkenlik, (%)
$\dot{m}$	- kütleli debi, (kg/s)
$\dot{E}$	- enerji, (W)
$\dot{V}$	- hacimsel debi, ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
$\Delta p$	- basınç düşümü, (Pa)
$\Delta T$	- sıcaklık farkı, (K)

### Alt indisler

$\dot{c}$	- çıkan
g	- giren
gk	- geri kazanılan
mak.	- maksimum

**KAYNAKLAR**

- [1] CUCE, M., P., RIFFAT, S., “A comprehensive review of heat recovery systems for building applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (47) 665–682, 2015.
- [2] WERNER, S., “International review of district heating and cooling”, *Energy* (137) 617-631, 2017.
- [3] PICON-NUNEZ, M., POLLEY, G., TORRES-REYES, E., GALLEGOS-MUNOZ, A., “Surface selection and design of plate–fin heat exchangers”, *Applied. Thermal. Engineering* (19) 917–931, 1999.
- [4] REN, C., DENG, Y., CAO, S.J., “Evaluation of polyethylene and steel heat exchangers of ground source heat pump systems based on seasonal performance comparison and life cycle assessment”, *Energy and Building* (162) 54-64, 2018.
- [5] M.K. KIM, M.K., LIU, J., CAO, S.J., “Energy analysis of a hybrid radiant cooling system under hot and humid climates: a case study at Shanghai in China”, *Building and Environment* (137) 208–214, 2018.
- [6] WADEKAR, V.V., “Heat exchangers in process industry and mini and microscale heat transfer, Proceedings of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology”, Eds. Shah, R.K., Ishizuka, M., Rudy, T.M., Wadekar, V.V., Engineering Conferences International, Hoboken, NJ, USA, September, 2005.
- [7] ZHANG XIAOSONG, L.S., KAITAO, Z., JIMING, C., “Research on energy recovery from exhaust air using plate-fin heat exchanger in air conditioning system”, *Ventilation Dust Removal* 4–7, 1998.
- [8] JUNGHANS, L., WIDERIN, P., “Thermal comfort and indoor air quality of the “Concept 22/26”, a new high performance building standard”, *Energy and Buildings* (149) 114–122, 2017.
- [9] WANG, Y., KUCKELKORN, J., ZHAO, F.Y., SPLIETHOFF, H., LANG, W., “A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 1303–1319, 2017.
- [10] WANG, Y., KUCKELKORN, J., LIU, Y., “A state of art review on methodologies for control strategies in low energy buildings in the period from 2006 to 2016”, *Energy and Buildings* 147, 27–40, 2017.
- [11] KÜÇÜK, H., ÜNVERDİ, M., MACAR, H., “Havadan-havaya ısı geri kazanım cihazının Taguchi yöntemi ve HAD analizleri ile tasarımı”, *ULIBTK'17* 21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 429-437, 2017.
- [12] TESTO WHITEPAPER “CO<sub>2</sub> izleme ve iç hava kalitesi”.
- [13] KIM, M. K., BALDINI, L., “Energy analysis of a decentralized ventilation system compared with centralized ventilation systems in European climates: Based on review of analyses”, *Energy and Buildings* (111) 424–433, 2016.
- [14] ZENG, C., LIU, S., SHUKLA, A., “A review on the air-to-air heat and mass exchanger technologies for building applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 753–774, 2017.
- [15] MARDIANA-IDAYUA, A., RIFFAT S.B., “Review on physical and performance parameters of heat recovery systems for building applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (28) 174–190, 2013.
- [16] TJOENA, C., PARK, Y., WANG, Q., SOMMERS, A., HAN, X., JACOBI, A., “A review on polymer heat exchangers for HVAC&R applications”, *International Journal of Refrigeration* (32) 763–779, 2009.
- [17] CEVALLOS, J.G., BERGLES, A.E., BAR-COHEN, A., RODGERS, P., GUPTA, S.K., “Polymer Heat Exchangers History, Opportunities, and Challenges”, *Heat Transfer Engineering* 33 (13), 1075–1093, 2012.
- [18] LU, Y., WANG, Y., ZHU, L., WANG, Q., “Enhanced performance of heat recovery ventilator by airflow-induced film vibration (HRV performance enhanced by FIV)”, *International Journal of Thermal Sciences* (49), 2037-2041, 2010.
- [19] FERNÁNDEZ-SEARA, J., DIZ, R., UHÍA, F.J., DOPAZO, A., FERRO, J.M., “Experimental analysis of an air-to-air heat recovery unit for balanced ventilation systems in residential buildings *Energy Conversion and Management* (52), 635–640, 2011.
- [20] MARDIANA-IDAYU, A., RIFFAT, S.B., “An experimental study on the performance of enthalpy recovery system for building applications”, *Energy and Building* (43), 2533–8, 2011.
- [21] AL-WAKED, R., NASIF, M.S., MORRISON, G., BEHNIA, M., “CFD simulation of air to air enthalpy heat exchanger: Variable membrane moisture resistance”, *Applied Thermal Engineering* (84), 301-309, 2015.

- [22] AL-WAKEDA, R., NASIF, M.S., MOSTAFA, D.B., “Enhancing the performance of energy recovery ventilators”, *Energy Conversion and Management* (171), 196–210, 2018.
- [23] ŠIBALIJA, T. V., MAJSTOROVIĆ, V.D., “Advanced Multiresponse Process Optimization: An Intelligent and Integrated Approach”, Springer, 2016.
- [24] MORI, T., TSAI, S.C., “Taguchi Methods Benefits, Impacts, Mathematics, Statistics, and Applications”, ASME, 2011.
- [25] MITRA, A., “Fundamentals of quality control and improvement”, Wiley, 2016.
- [26] [https://www.librarytop.com/deney/y894r0wd12\\_deney\\_tasarimi\\_ve\\_taguchi%CC%87\\_metodu](https://www.librarytop.com/deney/y894r0wd12_deney_tasarimi_ve_taguchi%CC%87_metodu), Erişim tarihi: 12/12/2018.
- [27] RAWENI, A., MAJSTOROVIĆ, V., SEDMAK, A., TADIĆ, S., KIRIN, S., “Optimization of AA5083 Friction Stir Welding Parameters Using Taguchi Method”, *Tehnički vjesnik*, 3(25), 861-866, 2018.
- [28] ANSYS/Fluent Theory Guide, version 15, Ansys Inc., 2013.
- [29] WEN, J., LI, Y., ZHOU, A., ZHANG, K., “An experimental and numerical investigation of flow patterns in the entrance of plate-fin heat exchanger”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (49), 667–1678, 2006.
- [30] ISMAIL, L.S., RANGANAYAKULU, C., SHAH R.K., “Numerical study of flow patterns of compact plate-fin heat exchangers and generation of design data for offset and wavy fins”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 3972–3983, 2009.
- [31] ÇENGEL, Y., “Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer”, USA, McGraw-Hill, 2007.
- [32] PATANKAR, S.V., “Numerical heat transfer and fluid flow”, Hemisphere, Washington, DC, 1980.
- [33] ANSYS/Fluent User’s Guide, version 15, Ansys Inc., 2013.
- [34] BEJAN, A., “Advanced Engineering Thermodynamics”, Fourth Edition, USA, Wiley, 2016.
- [35] HESSELGREAves, J.E., LAW, R., REAY, D.A., “COMPACT HEAT EXCHANGERS: Selection, Design and Operation”, 2017.
- [36] NELSON, P.R., WLUDYKA, P.S., COPELAND, K.A.F., “The Analysis of Means, Society for Industrial and Applied Mathematics”, Philadelphia, Pennsylvania, 2005.
- [37] MONTGOMERY, D.C., RUNGER G.C., “Applied Statistics and Probability for Engineers (Fifth Ed.)”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011.
- [38] PHADKE, M.S., “Quality Engineering Using Robust Design”, Prentice Hall, New Jersey, 1989.

## ÖZGEÇMİŞ

### Murat ÜNVERDİ

1984 Bozdoğan/Aydın doğumludur. 2008 yılında Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2011 yılında Celal Bayar Üniversitesinde Yüksek Mühendis ve 2016 yılında Sakarya Üniversitesinde Doktor unvanlarını almıştır. 2011 yılından beri Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Termodinamik ve Isı Tekniği Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Isı geçişi, taşınım ile ısı geçişinin iyileştirilmesi, ısı geçişinde deneysel-sayısal yöntemler, ısı değiştiricileri, yenilenebilir enerji, güç çevrimleri ve uygulamaları konularında çalışmaktadır.

### Hasan KÜÇÜK

1970 Akseki doğumludur. 1991 yılında İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. İTÜ’nden; 1995 yılında Yüksek Mühendis ve 2002 yılında Doktor unvanlarını almıştır. Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik ve Isı Tekniği Bilim Dalında, 1992-2002 yılları arasında, Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır. 2002-2011 yılları arasında, Yrd. Doç. Dr. olarak görev yaptığı Sakarya Üniversitesi Akyazı Meslek Yüksek Okulunda 2007-2016 yılları arasında okul müdürlüğü yapmıştır. 2011 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik ve Isı Tekniği Bilim Dalında, Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Isı geçişi, Termodinamik, Akışkanlar Mekaniği, ısı geçişinde deneysel ve sayısal yöntemler, ısı değiştiricileri ile enerji sistemleri konularında çalışmaktadır.