

Çoklu Çarpan Jetli Dikdörtgen Kanalda Yüzey Isı Geçişinin Deneysel Araştırılması

¹Dr. Öğr. Üyesi Ünal UYSAL ve *² Metin SÖZBİR

¹Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 54187 Serdivan, Sakarya,

*²Sakarya Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi A.B.D. 54187 Serdivan, Sakarya,

Özet :

Gaz türbinleri savunma sanayiinde ve elektrik enerjisi üretiminde yaygın şekilde kullanılan sistemlerdir. Gaz türbininin türbin giriş sıcaklığı yeni modellerde 1700°C - 2200°C'ye yaklaşmaktadır. Gaz türbin giriş sıcaklığının artması, aynı zamanda türbin kanatları ile sıcak gaz yolu üzerindeki diğer ekipmanların maruz kaldığı mekanik ve ısı zorlamalarının etkisini de ciddi ölçüde arttırmakta; bundan en çok nasibi türbin kanatları almaktadır. Gaz türbinlerinin ömürleri, türbin bakımına ve türbin kanatlarının ömürlerine bağlıdır. Bu yüksek sıcaklıklara karşın türbin kanatçıklarının, ısı şoklardan veya ısı gerilmelerden korunması ve güvenli şekilde çalışmasını sürdürebilmesi maksadıyla soğutulması zarureti ortaya çıkmaktadır. Tasarımcılar bu soğutma kanallarının geliştirilmesi için farklı geometrik kesitli kanal ile kanal içinde rip konfigürasyonu v.s. alanlarda çarpmalı jet ve çapraz akışın artırılması hususunda araştırmalar yapmaktadır. Bu çalışmada bir jet plaka üzerinde 5x10 sıralı, toplamda 50 adet, 3 farklı hidrolik çaplı çarpan dairesel jetlerin olduğu ve jet-hedef plakalar arasında 3 farklı aralıkta oluşan hedef plaka yüzeylerinin ısı geçiş dağılımı dört farklı debilerde ve Reynolds sayısında deneysel olarak araştırılmıştır. Yüzeydeki ısı geçiş katsayısı dağılımını tespit etmek için Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda kurulu bulunan TLC (Termokromik Sıvı Kristal) deney düzeneği ve modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda jet-hedef plaka aralığının ve jet çaplarının ısı geçiş katsayısının dağılımını etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı geçiş katsayısı dağılımı, sıvı kristal termografisi, gaz türbinlerinin soğutulması.

1. Giriş

Gaz türbinleri teknolojik olarak çağımızda enerji üreten en üst düzey makinelerdir. Gaz türbinleri savunma sanayiinde özellikle; uçak ve helikopter gibi süratli araçlar ile elektrik santralleri ve gemi motorlarında enerji üretmek için kullanılmaktadır. Gaz türbini malzemesinin gelişmesi malzeme teknolojisindeki gelişmelerle paralellik teşkil etmektedir. Malzeme teknolojisi oldukça ileri düzeylere ulaşmasına rağmen gaz türbinlerinin giriş sıcaklıkları, kanat malzemelerinin dayanma sıcaklıklarından çok daha yüksektir. Gaz türbin giriş sıcaklığının artması, aynı zamanda türbin kanatları ile sıcak gaz yolu üzerindeki diğer ekipmanların maruz kaldığı, mekanik ve ısı zorlamalarının etkisini de ciddi ölçüde arttırmakta; bundan en çok nasibi türbin kanatları almaktadır. Bu yüksek sıcaklıklara karşın türbin kanatçıklarının, ısı şoklardan veya ısı gerilmelerden

* Sorumlu yazar: Adres: Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Sakarya Üniversitesi, 54187, Sakarya TÜRKİYE. E-posta adresi: uysal@sakarya.edu.tr, Tel: +902642955849

korunması ve güvenli bir şekilde çalışmasını sürdürebilmesi maksadıyla soğutulması zarureti ortaya çıkmaktadır. Birçok türbin kanatçığı soğutma tekniği mevcutsa da kompresörden alınan havayla yapılan soğutma en yaygın ve en çok kullanılan soğutma tekniğidir. Bu nedenle, ileri malzeme teknolojisi ile üretilen türbin kanatlarının da mutlak surette soğutulması gerekmektedir. Soğutmanın bu denli önemli olması, gaz türbini üreticilerini özellikle kanat soğutma teknolojileri konusunda yoğun araştırmalar yapmaya yöneltmiştir.

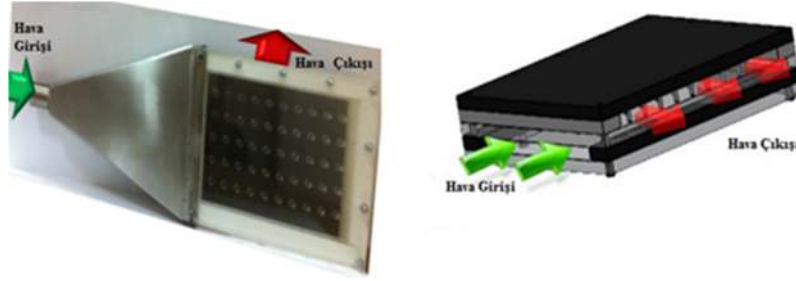
Gaz türbini kanatlarında soğutmanın artırılmasında kanat içerisindeki iç kanalların kullanılması son derece önemlidir. Özellikle türbinlerin birincil kanatlarının soğutulması için farklı geometrilerde ve farklı kombinasyonlarda iç geçiş kanalları kullanılmaktadır. Tasarımcılar bu soğutma kanallarının geliştirilmesi için farklı geometrik kesitli kanal ile kanal içinde rip konfigürasyonu v.s. alanlarda çarpmalı jet ve çapraz akışın artırılması hususunda araştırmalar yapmışlardır [1-5]. Türbin kanatlarının ömürlerini artırmak ve çalışma güvenliğini sağlamak; türbin kanadında meydana gelen aşırı ısı yükünün alınması iç ve dış soğutma teknikleri ile mümkün olmaktadır. Soğutma yöntemlerinin daha ucuza mal edilmesi tercih olarak ön plana çıkmaktadır. Bundan dolayı tasarımcıların ilgi odağı gaz türbinlerinin soğutma yöntemleri olmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında; türbin kanat malzemesinin iyileştirilmesi, kanat kaplamaları ve kanat soğutma yöntemleri konuları üzerinde mühendislik çalışmaları yoğunlaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında; gaz türbin problemlerinden birisi olan kanatların soğutulması kapsamında gaz türbin kanatları içindeki soğutma kanallarına benzeyen bir modül oluşturularak; bir jet plaka üzerinde 5 sıralı, her sırada 10 adet, toplamda 50 adet jet dairesel geometrisine sahip hidrolik çapları (2.5 mm, 5 mm ve 7,5 mm) aynı olan kanalarda ve jet-hedef plakalar arasında 10 mm, 15 mm ve 20 mm aralık olan hedef plaka yüzeyinin ısı geçişi dört farklı debi (20 m³/h; 30m³/h; 40m³/h; 50 m³/h) ve Reynolds sayısında sıvı kristal termografisi metodu kullanılarak deneysel incelenmiştir. Bu çalışmanın konusu hidrolik çapları değişen çarpmalı jet geometrilerinden oluşmuş bir hedef ve jet yüzeylerinde en homojen ısı geçişini sağlamaktır. Bu nedenle çarpmalı jetin büyüklüğü, geometrisi ve iki yüzey (alt-jet ve jet-hedef) plaka arasındaki uzaklıklar önemlidir. Isı geçiş büyüklüklerinin yüzeyde homojen olması istenmekte böylece ısınan yüzeyin homojen bir soğutma-ısıtma işlemine tabi tutulduğunu göstermektedir. Yüzeydeki ısı geçiş katsayısı dağılımını tespit etmek için Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında kurulu bulunan TLC (Termokromik Sıvı Kristal) deney seti ve iki kademeli tasarlanan türbin kanat modülü kullanılmıştır. Bu çalışmada LCR Hallcrest,IL/USA tarafından imalatı ve kalibrasyonu yapılan R35C5W-tipli TLC kullanılmıştır. LCIA (Liquid Crystal Imaning Analayser) programı USA Pittsburgh Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü tarafından geliştirilmiştir. Deney düzeneğinin çeşitli noktalarına bağlı termoçift elemanlardan alınan sıcaklık değerleri veri toplama kartı ile kaydedilmiş, renk profili kullanılarak yüzeydeki sıcaklık dağılımı ve ısı transfer katsayısı hesaplanabilmiştir. Çalışmanın amacı en homojen, en az basınç kaybına neden olan ve en yüksek zorlanmış ısı geçişi katsayısına sahip olan sistem konfigürasyonun tespit edilmesidir.

2. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada türbin kanatlarında kullanılan geçiş parçaları, geçişli kanalları ve bunlarda kullanılan çarpmalı jet geometrileri üzerine odaklanılmıştır. Çalışmada; dairesel jet geometrisine sahip

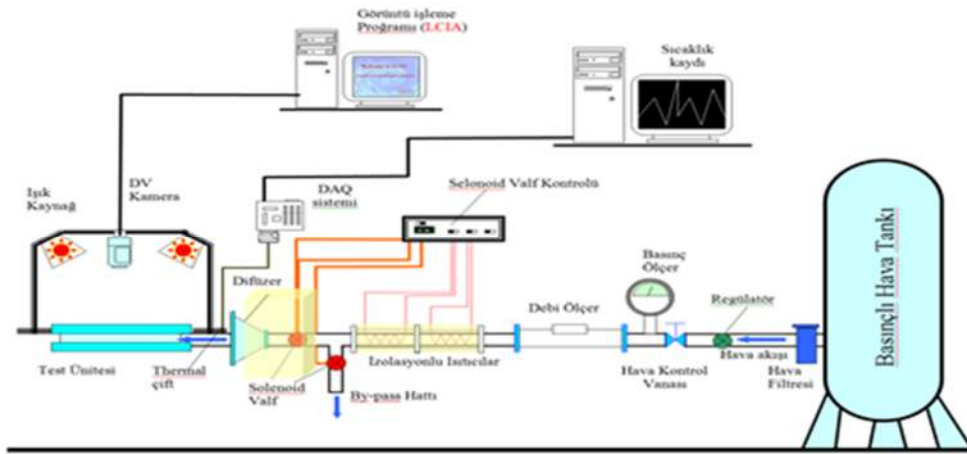
dikdörtgen kesitli kanallarda ısı transferinin TLC metodu kullanılarak deneysel olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Deneyde gaz türbin kanatları içindeki soğutma kanallarına benzeyen bir modül oluşturulmuştur. Modül şeffaf renkte fleksiqlas malzemedan yapılmış ve plakalar (alt, jet, hedef) 10 mm. kalınlığında, ara parça 3 farklı (10 mm,15 mm, 20 mm) ebattadır. Modülün ucunda yarım parmak manşona bağıl huni şeklinde paslanmaz metal malzemedan verilen hava ile modülün kısa kenar ucundan hava girişı yapılmakta, dairesel jet geometrili kanallardan geçerek alta/ikinci kademeye doğru akış sağlanmakta; modülün uzun kenarından L (90°) dönüşü yaparak hava tahliye edilmektedir (şekil 1.).



Şekil 1. Deney modülü ve 3D resmi hava akışı gösterimi..

2.1. Deney Düzenegi

Deney düzenegi 4 ana bölümden meydana gelmektedir (şekil 2.). Birinci bölümde, basınçlı hava kaynağı olarak kullanılan kompresör, hava kontrol vanası, havayı temizlemek için kullanılan bir hava filtresi, havayı ısıtmak için kullanılan boru içi ısıtıcılar, ısıtıcıyı hassas bir şekilde ayarlayabilmek için ısıtıcıya bağıl bir gerilim ayarlayıcı, borudan gelen havanın debisini ve boru içindeki akışkan sıcaklığını ölçmek için kullanılan bir debimetre, basınç ve hava debisini ölçmek için manometre, iki adet solenoid valf ile bypass hattı ve ısıtıcılar ile valflerin bağıl olduğu ve bu valflerin açılıp kapanmasını sağlayan anahtarların bağıl bulunduğu kontrol bölümü, test bölümünden önce bulunan ve akışı düzgünleştirmek için kullanılan bir difüzör bulunmaktadır.



Şekil 2. Deney düzeneginin řematik gösterimi.

İkinci bölümde TLC'lerin renk değişimlerini kayıt edeceğimiz bir adet DV kamera, iki adet yüksek

wattlı ışık kaynağı bulunmaktadır. İyi bir görüntü için test bölümünün alt tarafı, ışık kaynaklarının üst tarafı ve test bölümündeki parlayan her şey siyah örtü ve özel bir bant ile kaplanmıştır. Üçüncü bölümde, test bölümünün giriş ve çıkış sıcaklıklarını, hava sıcaklığını deney süresince ölçen ve bir PC yardımıyla kayıt eden veri toplama sistemi (DAQ) ile termočiftler bulunmaktadır. Buradan alınan verilerle yüzeyin ısı transferi özelliklerini LCIA(Liquid Crystal Imaging Analyzer) yazılımı ile bulmak mümkün olmuştur. Dördüncü bölümde ise; test bölümü bulunmaktadır.

2.2. Deney Belirsizliği

Test yüzeyinde meydana gelen belirsizlik %0.5, giriş sıcaklığında meydana gelen belirsizlik %0.4 ve çıkış sıcaklığında meydana gelen belirsizlik %1'dir. Sıcaklık ölçümlerinin toplam belirsizliği ± 0.2 °C dir. Ayrıca diğer belirsizlikler sıvı kristalin renk kalibrasyon sıcaklığı, renk değişimi sıcaklığı ve katı malzemenin termal difüzyon hızında meydana gelen hatalar yaklaşık olarak %5, %4, %1 şeklindedir. Diğer büyük bir belirsizlik ise deneye gönderilen hava debisi ve Reynolds sayısındaki ölçüm hataları yaklaşık olarak %4 olarak alınabilir. Isı transferi katsayısına tüm bu hataların toplanmasıyla etki eden hata oranı %7 olarak hesaplanabilir.

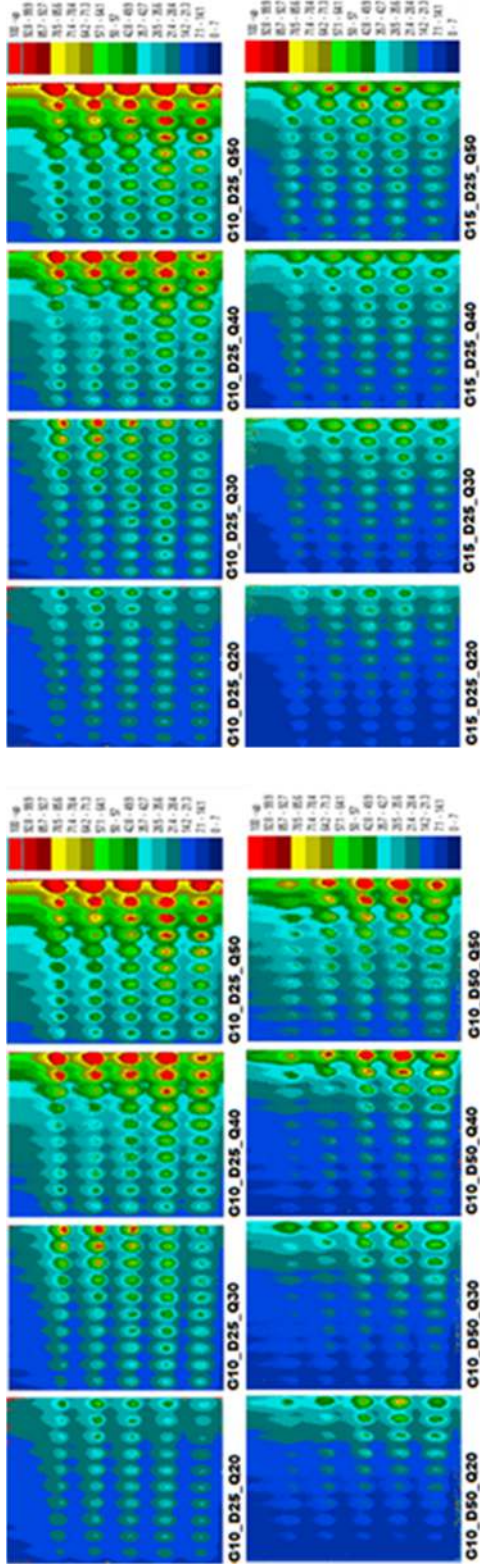
3. Deneysel Çalışmalar

Deneyler her bir jet hidrolik çapı ve ara geçiş parçası kalınlığı olmak üzere dört farklı debide ve Re sayısında gerçekleştirilmiştir (tablo 1).

Tablo 1. 10 mm, 15 mm ve 20 mm aralık için kanal için Re sayısı.

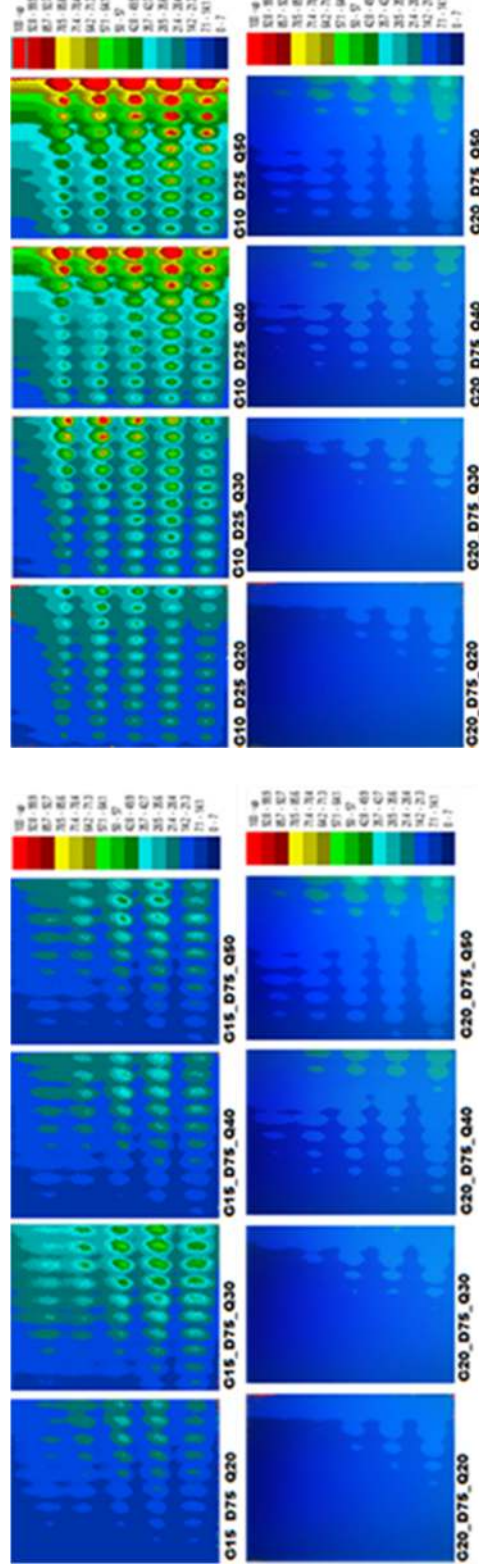
Jet çapı D (Nm ³ /h)	Re giriş				Re çıkış				
	Dikdörtgen Kanal Kesit Alanı (mm ²)			Jet	Dikdörtgen Kanal Kesit Alanı (mm ²)			Jet	
	(120x10)	(120x15)	(120x20)		(170x10)	(170x15)	(170x20)		
2,5 mm	20	4005,368954	3857,021956	3719,271172	2836,374573	2892,766467	2814,583589	2740,5156	2836,374573
	30	6008,053431	5785,532934	5578,906758	4254,561859	4339,1497	4221,875384	4110,7734	4254,561859
	40	8010,737908	7714,043912	7438,542344	5672,749145	5785,532934	5629,167179	5481,0312	5672,749145
	50	10013,42239	9642,55489	9298,177929	7090,936431	7231,916167	7036,458974	6851,289001	7090,936431
5,0 mm	20	12016,10686	11571,06587	11157,81352	1418,187286	8678,299401	8443,750768	8221,546801	1418,187286
	30	14018,79134	13499,57685	13017,4491	2127,280929	10124,68263	9851,042563	9591,804601	2127,280929
	40	16021,47582	15428,08782	14877,08469	2836,374573	11571,06587	11258,33436	10962,0624	2836,374573
	50	18024,16029	17356,5988	16736,72027	3545,468216	13017,4491	12665,62615	12332,3202	3545,468216
7,5 mm	20	20026,84477	19285,10978	18596,35586	2127,82305	14463,83233	14072,91795	13702,578	2127,82305
	30	22029,52925	21213,62076	20455,99144	3191,734575	15910,21557	15480,20974	15072,8358	3191,734575
	40	24032,21373	23142,13174	22315,62703	4255,6461	17356,5988	16887,50154	16443,0936	4255,6461
	50	26034,8982	25070,64271	24175,26262	5319,557625	18802,98203	18294,79333	17813,3514	5319,557625

Resim ve grafik isimlendirilmesinde; plaka aralığı 10 mm; jet hidrolik çapı daire 2,5 mm; debi 20 Nm³/h olan deney modülü **G10_D25_Q20** şeklinde yazılmıştır. Elde edilen sayısal ve deneysel veriler birbiriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde temel olarak dört tür yaklaşım uygulanmıştır. Bunlar sırasıyla;



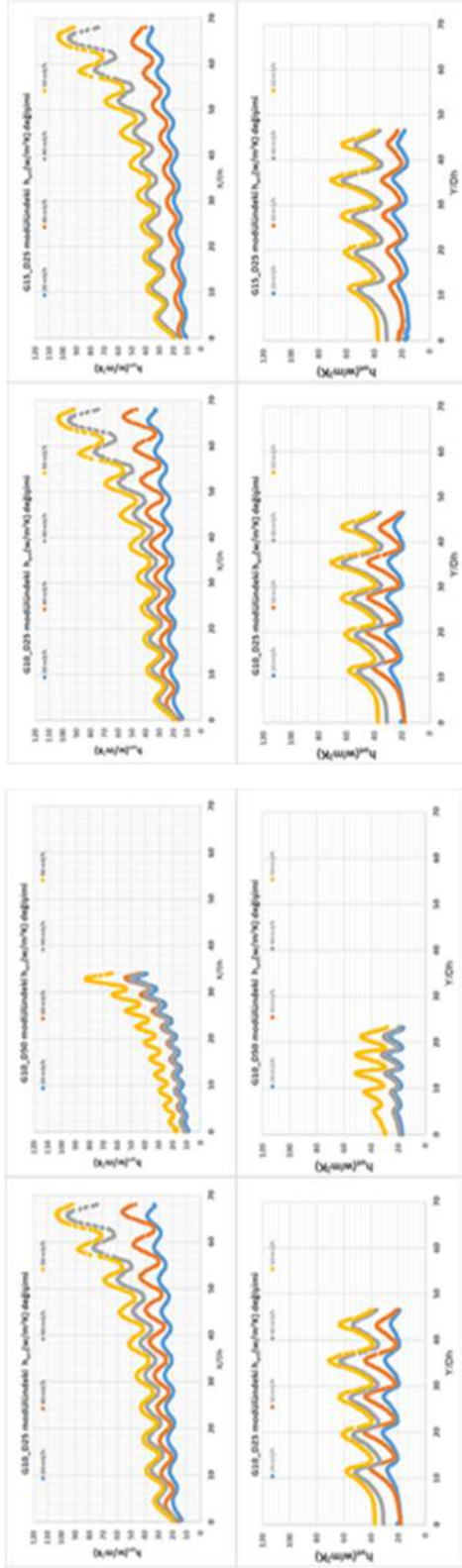
Şekil 3. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ve jet çapı 2,5 mm ile 5 mm olan dairelerin farklı çalışma debilerindeki hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısının dağılım görüntüleri.

Şekil 4. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ile 15 mm ve jet çapı 2,5 mm olan dairelerin farklı çalışma debilerindeki hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısının dağılım görüntüleri.



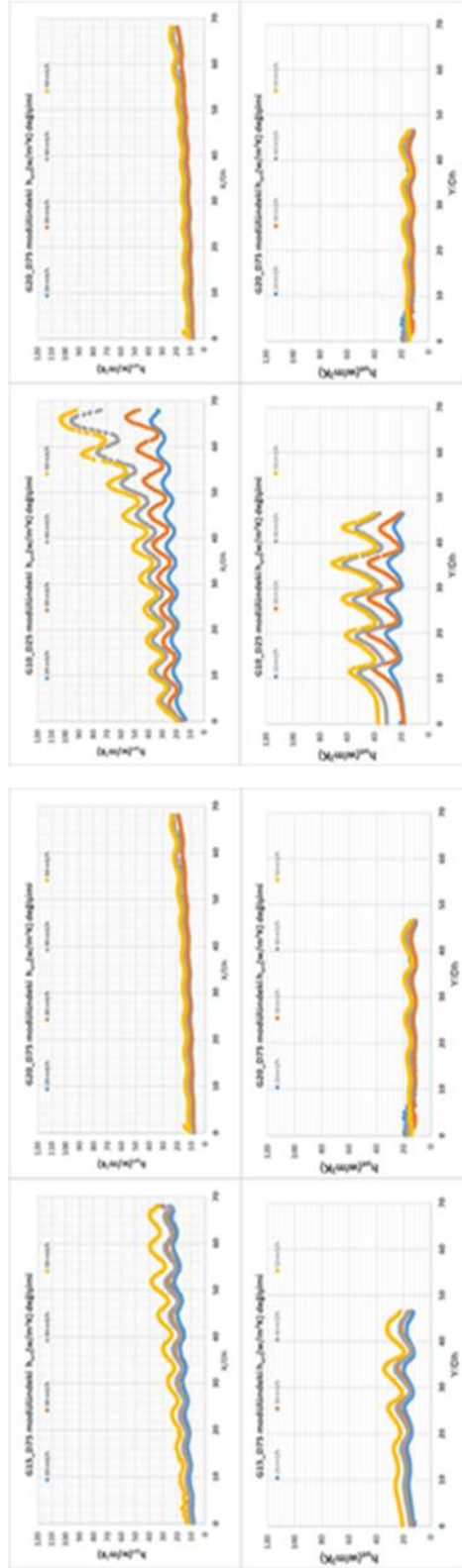
Şekil 5. Jet-hedef plaka aralığı 15 mm ile 20 mm ve jet çapı 7,5 mm olan dairelerin farklı çalışma debilerindeki hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısının dağılım görüntüleri.

Şekil 6. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm; jet çapı 2,5 mm ile jet-hedef plaka aralığı 20 mm jet çapı 7,5 mm olan dairelerin farklı çalışma debilerindeki hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısının dağılım görüntüleri.



Şekil 7. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ve jet çapı 2,5 mm ile 5 mm olan dairelerde yapılan çalışmalar sonucunda yatay (X) ve dikey (Y) yönlerinde hedef plaka yüzeyinde meydana gelen dört farklı debideki ısı geçiş katsayısı ortalama değerleri

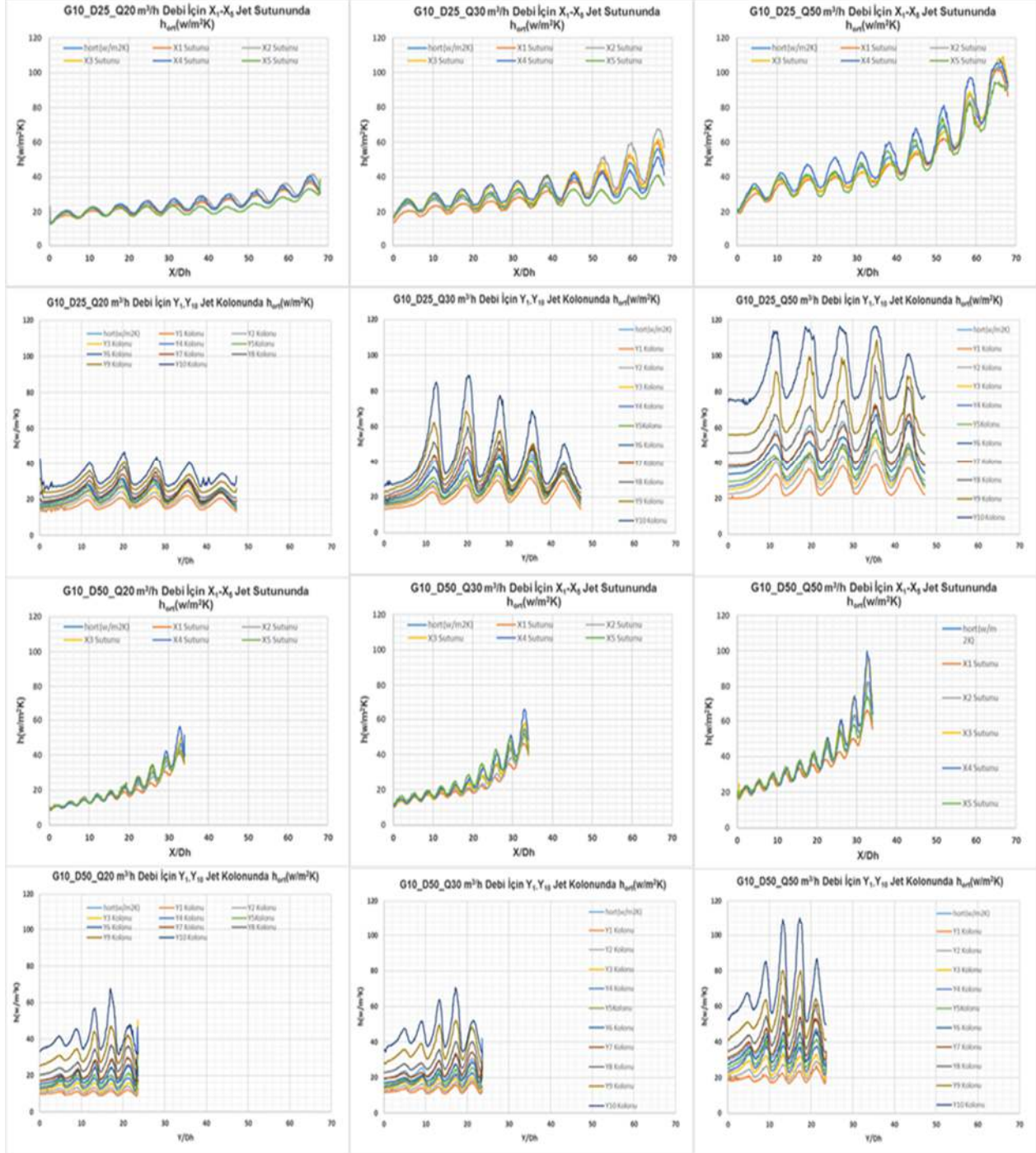
Şekil 8. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ile 15 mm ve jet çapı 2,5 mm olan dairelerde yapılan çalışmalar sonucunda yatay (X) ve dikey (Y) yönlerinde hedef plaka yüzeyinde meydana gelen dört farklı debideki ısı geçiş katsayısı ortalama değerleri



Şekil 9. Jet-hedef plaka aralığı 15 mm ile 20 mm ve jet çapı 7,5 mm olan dairelerde yapılan çalışmalar sonucunda yatay (X) ve dikey (Y) yönlerinde hedef plaka yüzeyinde meydana gelen dört farklı debideki ısı geçiş katsayısı ortalama değerleri

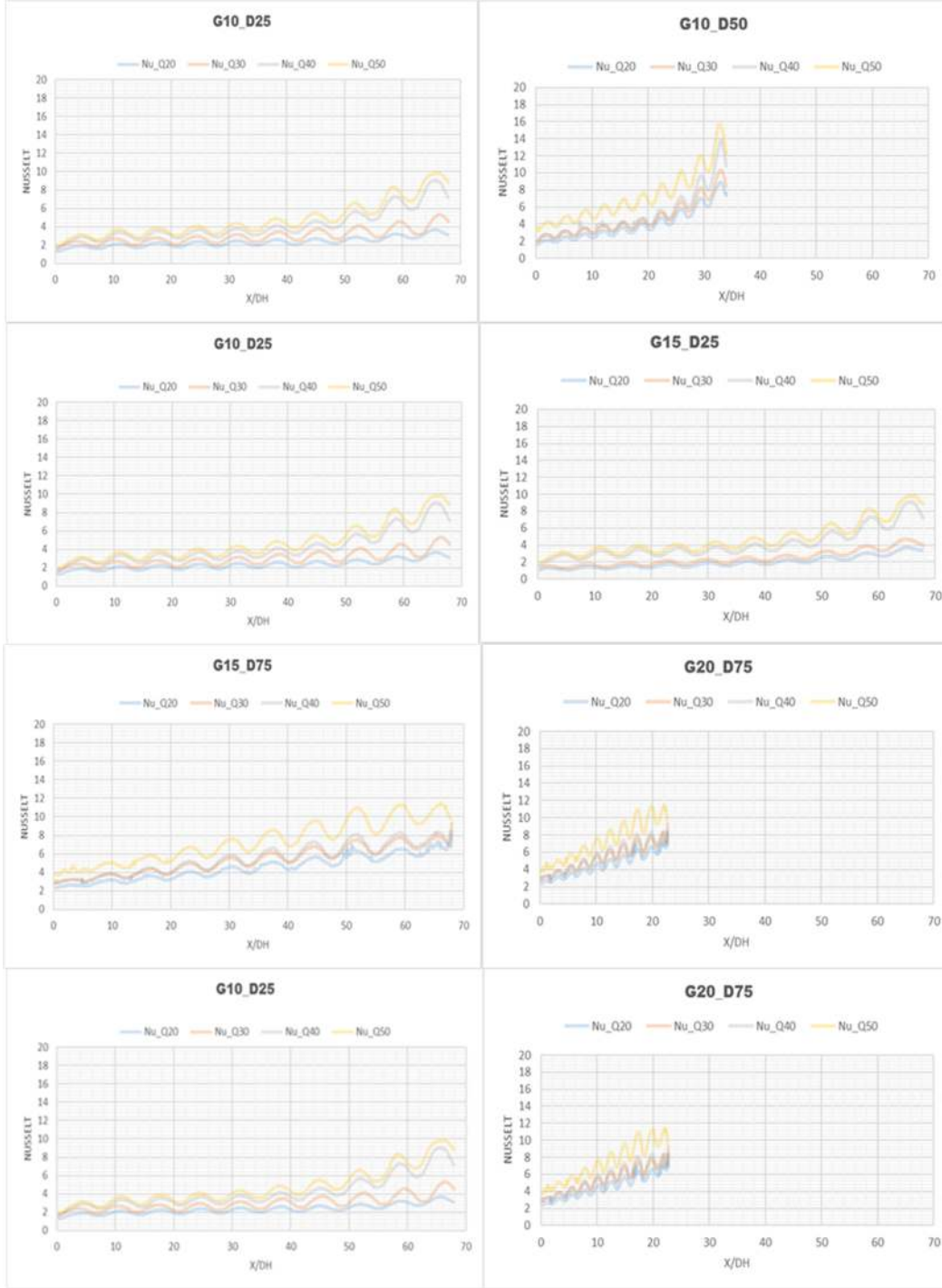
Şekil 10. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm; jet çapı 2,5 mm ile jet-hedef plaka aralığı 20 mm jet çapı 7,5 mm olan dairelerde yapılan çalışmalar sonucunda yatay (X) ve dikey (Y) yönlerinde hedef plaka yüzeyinde meydana gelen dört farklı debideki ısı geçiş katsayısı ortalama değerleri

Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ve jet çapı 2,5 mm ile 5,0 mm çaplı sıralı jet plakaları ile yapılan çalışmalar sonucunda farklı çalışma debilerinde her jetin X-Sutun ve Y-Kolon boyunca h_{ort} değişim grafikleri Şekil 3.10’da sunulmuştur.

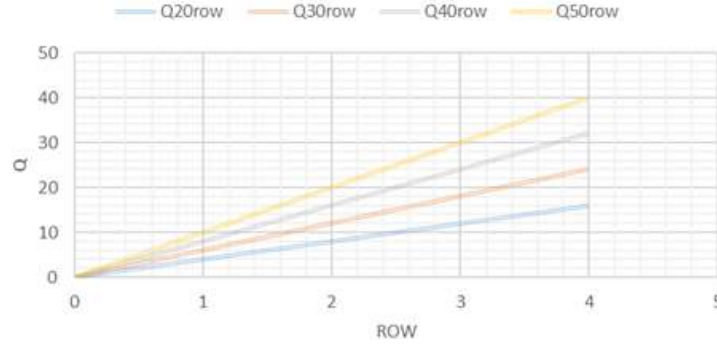


Şekil 11. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ve 2,5 mm ile 5,0 mm çaplı olan dairelerin farklı çalışma debilerinde her jetin X-Sutun ve Y-Kolon boyunca h_{ort} değişim grafikleri.

Jet-hedef plaka aralığı 10 mm, 15 mm ile 20 mm ve jet çapı 2,5 mm, 5,0 mm ile 7,5 mm çaplı sıralı jet plakaları ile yapılan çalışmalar sonucunda farklı çalışma debilerinde Nu sayısı değişim grafikleri Şekil 3.12.'de sunulmuştur.



Şekil 12. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm, 15 mm ile 20 mm ve jet çapı 2,5 mm, 5,0 mm ile 7,5 mm çaplı sıralı jet plakaları ile yapılan çalışmalar sonucunda farklı çalışma debilerinde Nu sayısı değişim grafikleri.



Şekil 13. Dört farklı debide yapılan çalışmalar sonucunda Çapraz Akış değişim grafikleri.

4. Sonuçların Analizi ve Değerlendirilmesi

Genel olarak deneysel çalışmalardan elde edilen görüntüler ve şekiller incelendiğinde;

Isı geçiş dağılımının Reynolds sayısının artmasıyla (hava debisinin) arttığı görülmektedir. Jet çapının küçük olduğu durumlarda Re sayısının debilere göre doğrusal arttığı gözlenmiştir. Çarpan jetlerin bulunduğu hedef plaka bölgelerinde daha yüksek ısı geçiş katsayısı meydana geldiği, akış doğrultusunda (kanal çıkışı) ısı geçiş katsayısında lineer bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Isı geçiş katsayısındaki azalmanın %20-25 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Jet çaplarının artması hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısının azalmasına ve jet-hedef plaka arasındaki mesafenin artmasında hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısının azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Jet çapının küçülmesinin ısı iletim katsayısını arttırdığı, jet-hedef plaka arasındaki aralığın azaltılmasının ise ısı geçiş katsayısını arttırdığı tespit edilmiştir. Akışkanın jet plakasının arkasındaki kanal üzerinden gönderilmesi ve jet-hedef plaka arasındaki kanal çıkışının 90°C olması nedeniyle kanal hava girişinin olduğu bölgede en yüksek ısı geçiş katsayısı meydana gelirken kanal çıkışına doğru ısı geçiş katsayısının azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3, 4, 5, 6).

Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ve jet çapı 2,5 mm ile 5,0 mm olan dairelerin farklı çalışma debilerinde y doğrultusunda ısı geçiş katsayısı ortalamalarının değişmediği ve sinüs dalgasına benzeyen bir karakteristik yapıda olduğu ancak debinin artmasıyla jet bölgelerindeki pik değerlerinin arttığı Şekil 7'den; jet-hedef plaka aralığı 10 mm ile 15 mm ve jet çapı 2,5 mm olan dairelerin hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısı ortalama değerleri dağılım grafiklerinin Şekil 7 ile hemen hemen aynı paralel yapıda olduğu Şekil 8'den; jet-hedef plaka arasındaki mesafe ile jet çaplarının artmasında hedef plaka yüzeyinde meydana gelen ısı geçiş katsayısının azalmasına neden olduğu Şekil 9 ve 10'dan tespit edilmiştir. Buna karşın x doğrultusundaki ortalama ısı geçişi değişimlerinin kanal akışı doğrultusunda kademeli bir şekilde azaldığı ve kanal çıkışında minimum değerlere ulaştığı ancak jet bölgelerinde en yüksek ısı geçişi değerlerine ulaştığı Şekil 3, 4, 5, 6, 7'de görülmektedir. Jet-hedef plaka aralığı 10 mm ve jet çapı 2,5 mm olan jete ait değerlerin; jet-hedef plaka aralığı 10 mm ve jet çapı 5,0 mm olan jet ile jet-hedef plaka aralığı 15 mm ve jet çapı 2,5 mm ait değerlerden daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Jet-hedef plaka arasındaki mesafenin 20 mm ve daha fazlası ile jet çaplarının 7,5 mm ve daha

fazlasının çalışmalara katkı sağlamayacağı ve zaman ve emek sarfına neden olacağı değerlendirilerek bu aralıklardaki çalışmalara ara verilmiştir.

Şekil 11’de kanal içinde 5 sıralı ve 10’arlı olarak dizilmiş jetlerin her birinin yatay ve dikey doğrultudaki ortalama ısı geçişleri gösterilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde X yönünde her bir jet sırasının ısı geçiş katsayı ortalama değişimlerinin birbirlerine çok benzediği ancak kanal çıkışına doğru genel bir düşme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Y yönündeki değişimlerde ise jet bölgelerinde en yüksek değere ulaştıkları ve genel olarak kanal eni boyunca sinüs dalgası formunu koruduğu ancak kanal boyu boyunca ısı geçiş katsayısının azaldığı tespit edilmiştir. Nu sayısı bakımından; G10_D50 grafiğinden anlaşılacağı gibi ısı taşınımının daha fazla olduğu Şekil 12’de tespit edilmiştir.

Çarpma jetlerin akış ve ısı transferi özellikleri, jet çıkış geometrisi, jet çıkışındaki hız profili, jet ile plaka arasındaki mesafe, jet içerisindeki türbülans, çarpma plakası geometrisi ve jet ile plaka arasındaki sıcaklık farkı gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Geometrik simetriye rağmen, sıralı konfigürasyonda ısı transferinde eliptik darbe kalıpları gözlenmiştir. Karşılıklı jet etkileşimleri nedeniyle jet distorsiyonunun bir sonucu olarak komşu jetlerin merkez jet için eliptik desen görülmüştür (Şekil 7-10). Jetler hedef plakadaki duvar jetleri haline dönüşür ve çarpışır, çarpışmanın ardından kenar kesici tabakalarda karşılıklı etkileşim ve türbülans yaratılır. Böylece güçlü olan merkezi jet komşu jeti dışarı doğru iterek bir yıkama çeşmesi ve bölgede jetler arasında devirdaimli harcanmış hava karışımı empoze eder. Bu etkileşimlerin sonucu olarak güçlü karışım oluşmakta, Nusselt sayısı da daha fazla göstermektedir. Burada tahmin edilebileceği gibi jet soğuk, çapraz akış ise sıcak gazlardan meydana gelmektedir. Çapraz akışın türbülans yoğunluğunun artmasıyla sıcak havanın akmakta olduğu kanala püskürtülen soğuk akışkan daha fazla yüzeyde etkili olmakta ve kanalın daha geniş bir yüzeyinde kendini göstermektedir (Şekil 13).

KAYNAKLAR

- [1] Uysal, U., Li, P.-W., Chyu, M.K., Cunha, F.J., (2006), “Heat Transfer on Internal Surfaces of A Duct Subjected To Impingement of A Jet Array with Varying Jet Hole-Size and Spacing”, *Journal of Turbomachinery*, 128,158-165.
- [2] Kercher, D.M., Tabakoff, W., “Heat transfer by a square array of round air jets impinging perpendicular to a flat surface including the effect of spent air”, *Journal of Engineering for Power*, 92: 73-82 (1970).
- [3] Katti, V., Prabhu, S.V., “Influence of streamwise pitch on the local heat transfer characteristics for in-line arrays of circular jets with crossflow of spent air in one direction” *Heat and Mass Transfer*, 45: 1167-1184 (2009).
- [4] Köseoglu, M.F., Baskaya, S., “The effect of flow field and turbulence on heat transfer characteristics of confined circular and elliptic impinging jets”, *International Journal of Thermal Sciences*, 47: 1332–1346 (2008).
- [5] Van Heinengen, A.R.P., Mujumdar, A.S., Douglas, W.J.M., “Numerical prediction of the flow field and impingement heat transfer caused by a laminar slot jet”, *Journal of Heat Transfer*, 98: 654-658 (1976).