

180° DÖNÜŞLÜ BİR SOĞUTMA KANALINDAKİ TÜRBÜLATÖR KONUMLARININ AKIŞ ALANINA ETKİSİ

Sefa YILMAZTÜRK*, İsa KAVAS†, Tolga YASA‡
TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş Eskişehir

D. Funda KURTULUŞ§
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Türbin giriş sıcaklığı, gaz türbinli motor performansını arttıran önemli bir parametredir. Türbin bölgesindeki malzemelerin yüksek sıcaklık şartlarına dayanabilmesi için soğutma teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada dönmeyen durağan haldeki kanal modelinin 180° dönüş bölgelerindeki akış yapısına ve dönüşten önceki ve sonraki türbülatorlerin bu akış alanına etkileri incelenmiştir. Kanal içindeki akış; türbülatorlerin olmadığı halde, sadece dönüş öncesi türbülatorlerin olması halinde, sadece dönüş sonrası bölgenin türbülatorlü olması ve her iki bölgede de türbülatorlerin olması hallerinde üç farklı Reynolds sayısı için incelenmiştir. Kanal içinde kare kesitli ve akış yönüne dik konumlandırılmış türbülatorler kullanılmıştır. Blokaj oranı %10 olarak seçilmiş, iki türbülator arası mesafe de türbülator yüksekliğinin 10 katı olarak belirlenmiştir. Akış alanı analizleri sayısal olarak yapılmış, girdap yapıları ve basınç kayıpları incelenmiştir.

GİRİŞ

Gaz türbinli motorların performansları yanma odası çıkış sıcaklıkları arttıkça artmaktadır. Lakin günümüz motorlarında ulaşılan sıcaklık değerleri malzeme dayanım sınırlarını aşmaktadır. Sıcak bölge parçalarının sıcaklıklarının malzeme dayanım limitlerinde tutulması ancak soğutma uygulamaları ile mümkün olmaktadır. Özellikle dönen parçaların (türbin kanatçıkları) soğutulması, maruz kaldıkları yüksek merkezkaç gerilimleri sebebiyle kritiktir. Rotor kanatçıklarında karmaşık çok kanallı iç soğutma sistemleri ve ihtiyaç halinde film soğutma ile metal sıcaklıklarının düşürülmesine çalışılmaktadır. Bu çok kanallı sistemlerde ayrıca türbülatorler kullanılarak soğutma kanallarındaki ısı transferi etkinliği ve ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı artırılabilir. Kanatçıklar içerisindeki kanallar 180° dönüşlü dirseklerle birbirine bağlanmaktadır. Bu dönüş bölgelerinde soğutucu akış, kısa mesafede yön değiştirmek zorunda olduğundan akış ayrılması çoğu zaman kaçınılmazdır. Bu akış ayrılmaları soğutma etkinliğini bölgesel olarak olumsuz etkilemekte ve kanatçıklarda hasara sebep olabilmektedir. Bu sebeple bu bölgelerdeki akışın fiziğinin incelenmesi önemlidir.

Soğutma kanallarındaki ısı transferi ve akış yapıları büyütülmüş modeller kullanılarak deneysel olarak araştırılmaktadır. Türbülator kesit geometrisi kanal yüzeyine yakın bölgedeki akış yapılarını etkilemektedir ve ısı transferi ve basınç düşümünde önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple kesit geometrisinin etkisi kapsamlı bir şekilde literatürde araştırılmıştır [Ahn, J., Choi, H. ve Lee, J.S. J., 2004; Bunker, R.S. ve Osgood, S.J., 2003; Ostanek, J., Prausa, J. ve Suetendael, A.V. ve Thole K., 2008; Alkhamis, N., Han, J.C. ve Rallabandi, A.P., 2009]. Türbülatorlerin akışa göre yerleştirilme açısı da kanal genelinde akış yapılarını etkilemekte ve soğutma performansını değiştirmektedir

* Rig tasarım müh., E-posta: sefa.yilmazturk@ tei.com.tr

† Aerodinamik müh., E-posta: isa.kavas@ tei.com.tr

‡ Türbin tasarım lideri, E-posta: tolga.yasa@tei.com.tr

§ Doç Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl. E-posta: dfunda@ae.metu.edu.tr

[Han, J., Lee, C. ve Zhang, Y., 1991]. Kare kesitli kanala yerleştirilen türbülatorlerin kanal içi akışına göre açısı farklı türbülator aralıklarında incelenmiş, soğutma performansının türbülator açısı 30° - 45° aralığında iken yüksek olduğu tespit edilmiştir [Chandra, P. R., Han, J.C. ve Niland, M.E., 1997]. Türbülatorlerin birden fazla duvar üzerine yerleştirilmesinin etkileri ayrıca incelenmiştir [Glicksman, L., Han, J. ve Rohsenow W., 1978]. Türbülatorler arasındaki mesafe yüzeydeki etkin ısı transferi bölgelerinin büyüklüğünü ve basınç düşümünü etkilemektedir [Spring, S.D. ve Taslim, M.E., 1994; Hwang, J.J. ve Liou, T.M., 1992]. Türbülatorlerin yüksekliği önemli bir diğer parametredir. Türbülator yüksekliği arttıkça genel olarak ısı transferi performansı ve basınç düşümü artmaktadır [Layek, A., Saini, J. ve Solanki, S., 2007; Han, J.C., Huan, Y., Ou, S. ve Park, J.S., 1992]. Kanal kesit alanı ikincil akışlar ve girdaplar üzerine etkili olmakta ve soğutma performansını etkilemektedir [Han, J.C. ve Park, J.S., 1988; Han, J.C., Lei, C.K., Ou, S. ve Park, J.S., 1989; Cardone, G., Carlomagno, G.M. ve Astarita, T., 1997].

Kanatçıklarda kullanılan soğutma kanalları çoğu zaman serpantin şeklindedir. Bu kanallardaki U dönüşlü dirsek bölgelerinde oluşan akış ayrılmaları sebebi ile bu tip kanallardaki soğutma performanslarının incelenmesi gerekmektedir. U-dönüşlü boş ve türbülatorlü kanal modellerinde yapılan ısı transferi performansı çalışmasında türbülatorlerin U dönüş bölgesindeki bölgesel ısı transferi dağılımını değiştirdiği belirtilmiştir [Cardone, G., Carlomagno, G.M. ve Astarita, T., 2000]. Dikdörtgen kesitli keskin U-dönüşlü kanalda dirsek iç duvarının dış duvara olan mesafesi değiştirilerek (kanal hidrolik çapının 0.9, 1.5 ve 2.1 katı) ısı transferine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır [Jenkins, S. C., Schnieder M., Shevchuk, I.V., Weigand, B., Wolfersdorf J.V. ve Zehnder, F., 2008]. Dirsek sonrası girdaba bağlı bölgesel ısı transferi dağılımına dirsek bölgesindeki akış alanının etkisi çalışılmıştır. Benzer şekilde farklı en/boy oranlarına sahip ve akışa 45° açıyla yerleştirilmiş türbülatorlü iki kanalın keskin dirsek ile bağlandığı kanal modelinde dirsek bölgesindeki akış alanının soğutmaya etkisi sıvı kristal yöntemi ile araştırılmıştır [Chen, C.C., Chen, M.Y. ve Liou, T.M., 2001]. Kısa mesafenin dirsek bölgesinde ısı transferini artırdığı fakat yüksek basınç düşümüne yol açtığı tespit edilmiştir. Son yıllarda iç kanal soğutma çalışmaları kanal dönüşünün ısı transferine ve akış yapılarına etkilerinin incelenmesine odaklanmaktadır. Uygun kanal modelleri döner tablalar üzerinde sıvı kristal ve lazer doppler anemometre yöntemleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dirsek sonrasında yer alan kanalda yüksek ısı transferi sağlanan bölgelerin yer değiştirdiği tespit edilmiştir [Chen, W., Jiang, H. ve Ren, J., 2011].

180° dönüşe sahip soğutma kanalları için yapılan sayısal çalışmalarda hidrodinamik ve termal olarak gelişmiş akış yönüne türbülatorler yerleştirilerek akış karakteristiğine ve ısı transferine olan etkiler incelenmiştir. LES ve DES çözücülerin ile de yapılan çalışmalar mevcuttur [Tafti, D.K. ve Viswanathan, A.K, 2006]. Benzer olarak LES modeli kullanılarak yapılan analizlerde deneysel sonuçlarla örtüşen değerler yakalanmıştır [Labbe, O., 2013].

Akışa 90° ve 45° 'de yerleştirilmiş türbülatorler RANS çözücü ile incelemiştir [Walker, D. ve Zausner J., 2007]. Sayısal analiz sonuçları türbülatorlerin akışa dik olduğu konumda yaklaşık %30 düşük ısı transferi verirken, türbülatorlerin 45° ile yerleştirildiği durumda ise yakın sonuçlar yakalanabilmiştir. Re sayıları 15000, 30000 ve 60000 için RANS modelleri kullanılarak yapılan benzer bir çalışmada türbülatorsüz, 90° ve 45° türbülatorlü 180° dönüşlü soğutma kanalında ısı transferi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır [Chen, W., Jiang, H. ve Ren, J., 2009]. Viskozite tabanlı türbülans modelleri ile türbülator olması ve olmaması durumu karşılaştırılmıştır [Behnia, M., Durbin, P.A., Iccarino, G. ve Ooi, A., 2002]. Türbülatorlü durum için deneysel değerlere yakın sonuçlar elde edilirken türbülatorsüz durumda sonuçlardaki hatanın yüksek olduğu tespit edilmiştir. Hem alt hem de üst duvarlara 45° türbülatorler yerleştirilmiş olan soğutma kanalı hem sabit hem de hareketli durumda incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda soğutma kanalı sabit durumda iken türbülatorlerin altta ve üstte ısı transferi aynı iken, hareketli durumda ise alt tarafa yerleştirilmiş olan türbülatorler üzerinde ısı transferi büyük ölçüde artmıştır. Sayısal sonuçlardaki sapma düşük Re (5000) sayısında %3 iken yüksek Re (40000) sayısında %10 olarak hesaplanmıştır [Dhanasekaran, T.S. ve Wang, T., 2013].

Bu çalışmada 180° dönüşlü bir soğutma kanalındaki akış sayısal olarak incelenmiştir. Özellikle dirsek bölgesinde akışın davranışı ve akışın maruz kaldığı etkiler anlaşılmasına çalışılmıştır.

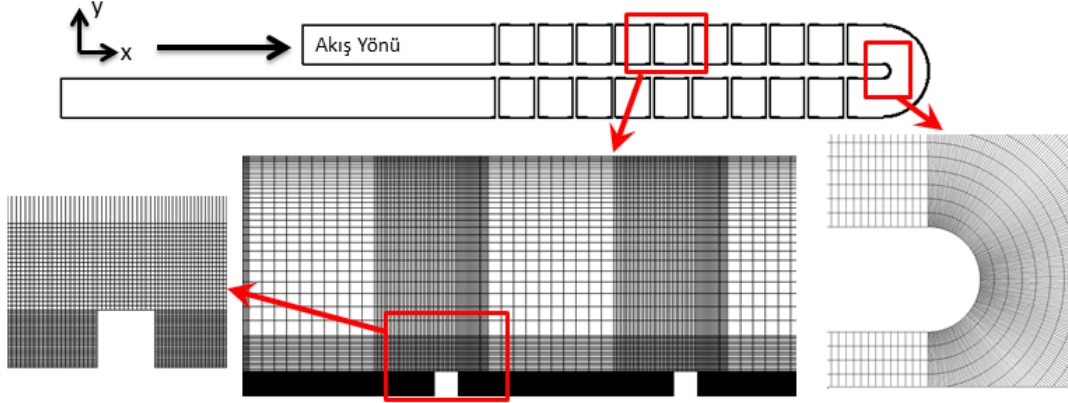
Çalışmada öncelikle her iki kanalın düz olduğu konfigürasyon incelenmiştir. Bu çalışma referans olarak alınmış ve her bir kanalda ayrı ayrı türbülator oluşu ve her iki kanalın türbülatorle olduğu hal

ayrıca incelenmiş ve referans durumla karşılaştırılmıştır. Akış parametreleri ve türbülator geometrileri motordaki durumları yansıtacak şekilde seçilmiştir.

SAYISAL SİMULASYON METODU

Sayısal Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları

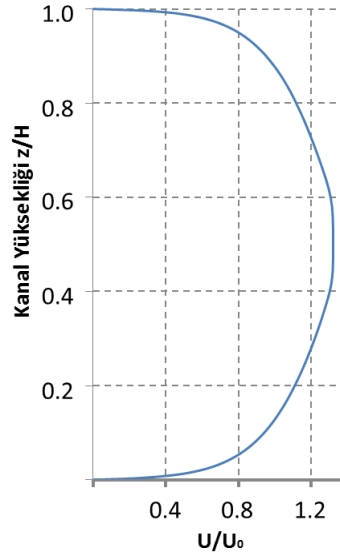
Çalışmada türbinli motorlarda kullanılan soğutma kanallarının bir benzeri modellenmiştir. Seçilen model Şekil 1’de gösterildiği gibi birbirine paralel iki kare kesitli kanal ve bu kanalları birbirine bağlayan 180° dönüşlü bir dirsek bölgesinden oluşmaktadır. Dirsek bölgesi dışında, kanallar üzerindeki tek yüzeye ısı transferi etkinliğini arttıracak türbülator elemanlar yerleştirilmiştir. Bu türbülatorler kanal yüksekliğinin sadece %10’u kadar yüksekliğe sahip kare kesitli elemanlardır. İki eleman arasındaki mesafe gaz türbinli motorlara uygun olarak seçilmiştir. Gerçeğe uygun sonuçlar elde etmek için her iki kanala toplam 20 kadar türbülator yerleştirilmiştir. Bu sayede hem giriş bölgesinde akışın tam gelişmesi hem de çıkış bölgesinde dirsek bölgesinin etkilerinin tam olarak görülmesi sağlanmıştır.



Şekil 1: Kanatçıklı Bölgede ve Dönüş Bölgesinde Ağ Yapısı

Oluşturulan model ticari bir sayısal analiz yazılımı ile incelenmiştir [ANSYS v13.0, 2013]. Oluşturulan sayısal çözüm ağının tamamı çoklu bloklara ayrılarak farklı bölgelerden oluşturulmuştur. Her bir türbülator bölgesi hem dikey ekseninde hem de yatay ekseninde düzlemlerle kesilerek eşit büyüklükte dikdörtgen bölgelere ayrılmıştır. Bu dikdörtgen bölgeler H haritalama methodu ile örülürken 180° dönüşlü dirsek bölgesi ise geometrik özelliğinden dolayı C haritalama methodu ile örülmüştür. Bloklar arası geçişte kesiklik olmaması ve düzgün geçişli dört yüzlü elemanların oluşması için eşit sayıda ağ noktaları kullanılmıştır. Ağ noktaları türbülator duvarlarında sıklaştırılarak sınır tabakanın iyi çözülmesi sağlanmıştır. Bu ağ stratejisi ile y^+ değerleri üst ve alt duvarlarda 5, dirsekte ise 30’dur. Toplam çözüm ağı 2500000 tam dörtgen hücrelerden oluşturulmuştur. (Şekil 1).

Sayısal analiz faaliyetleri türbinli motorlardaki soğutma kanallarına uygun olarak kanal hidrolik çapına göre (D_h) hesaplanmış üç farklı Reynolds sayısı için yapılmıştır (20000, 40000, 60000). Kontrol hacmi girişinde kanal yüksekliği boyunca Şekil 2’de verilen hız profili sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Kontrol hacmi çıkışında ise statik basınç tanımlanmıştır. Çözümler standart duvar koşulları altında $k-\epsilon$ realizabl türbülans modeli ile yapılmıştır [Dhanasekaran, T.S. ve Wang, T., 2013].

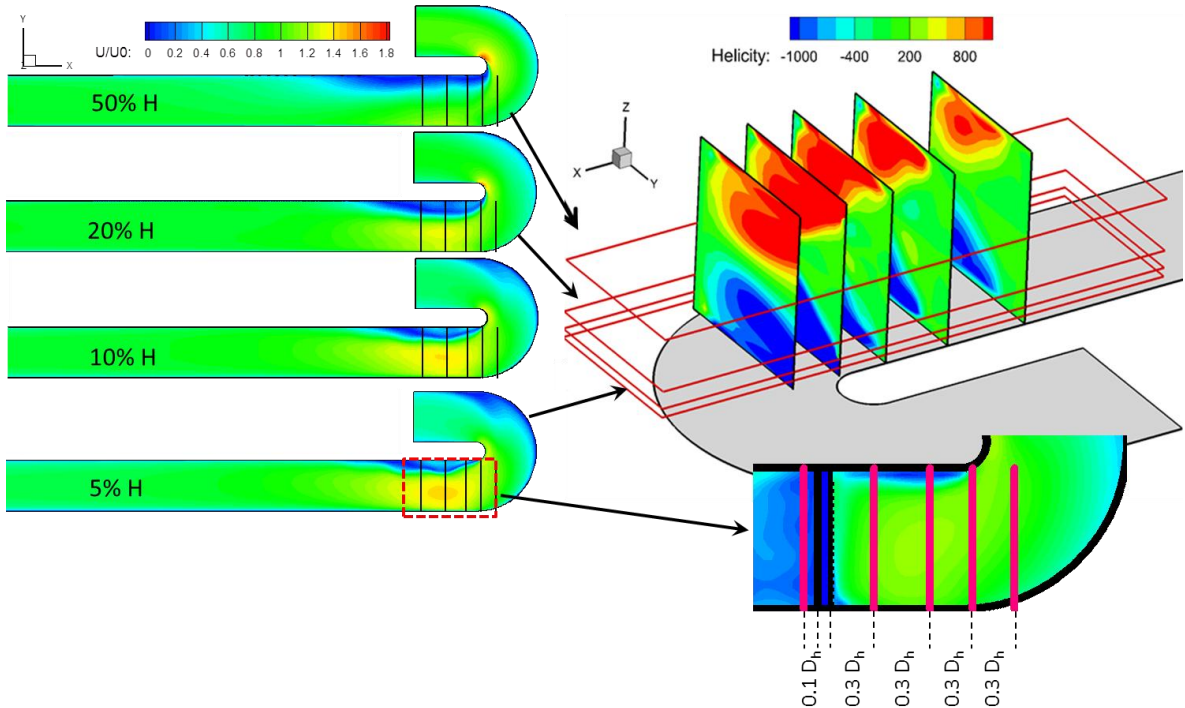


Şekil 2: Kontrol Hacmi Girişinde Kullanılan Sınır Koşulu

TÜRBÜLATOR KONUMUNUN AKIŞ YAPISINA ETKİSİ

Türbülatorsüz kanal

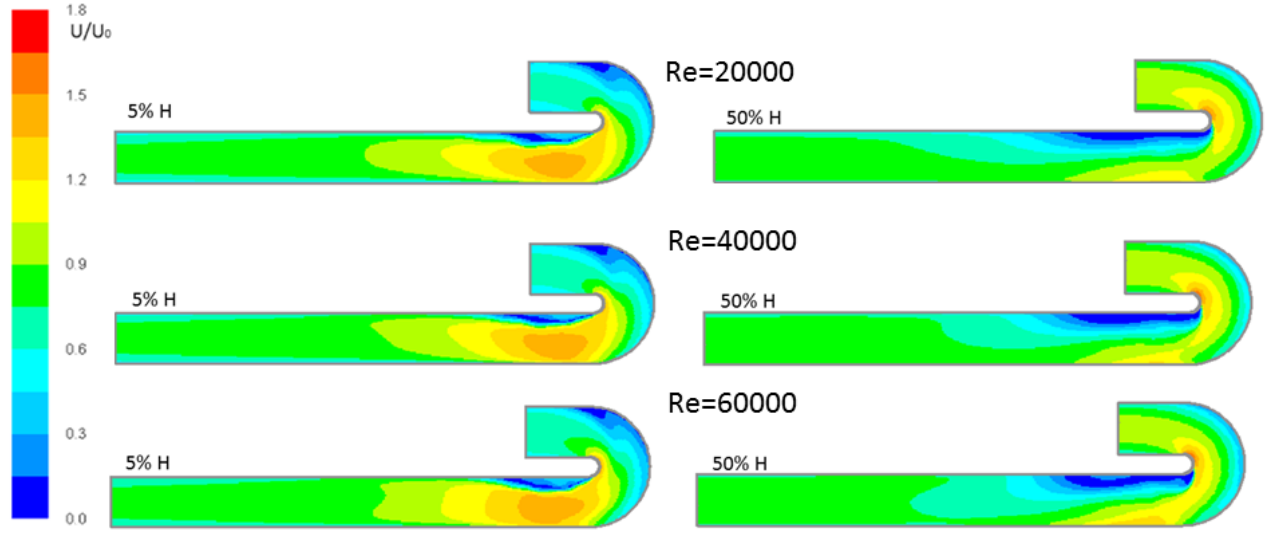
Türbülatorsüz kanal akışına ait hız dağılımları farklı yüksekliklerde kesit alınarak Şekil 'de gösterilmiştir. Dirsek bölgesi dönüşünden sonra akış ayrılmakta $1,25 D_h$ boyunca bir girdap bölgesi oluşturmaktadır. Bu girdap bölgesi etkin akış alanını azalttığından akışın hızlanmasına sebep olmaktadır. Girdap bölgesi dönüş bölgesinden hemen sonra iç duvara yakın olarak oluşmaktadır. Bu girdap bölgesi kanal içerisindeki y-yönündeki basınç farkı sebebi ile akış yönünde ilerledikçe kanalın iç duvarından dış duvarına açılmaktadır. Ayrıca dönmeye başladığı dirsek dış duvarında düşük hızların olduğu alt duvara yakın bölgelerde akış ayrılması gözlenmektedir.



Şekil 3: Dönüş sonrası boyutsuz hız dağılımları (solda), X-vorticity (sağda) (Re=20000)

Farklı Re için akış yapıları incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4'de verilmiştir. Reynolds sayısı ile beraber akış hızı arttığı için özellikle hızın en yüksek olduğu %50 H düzleminde ayrılma bölgesinde

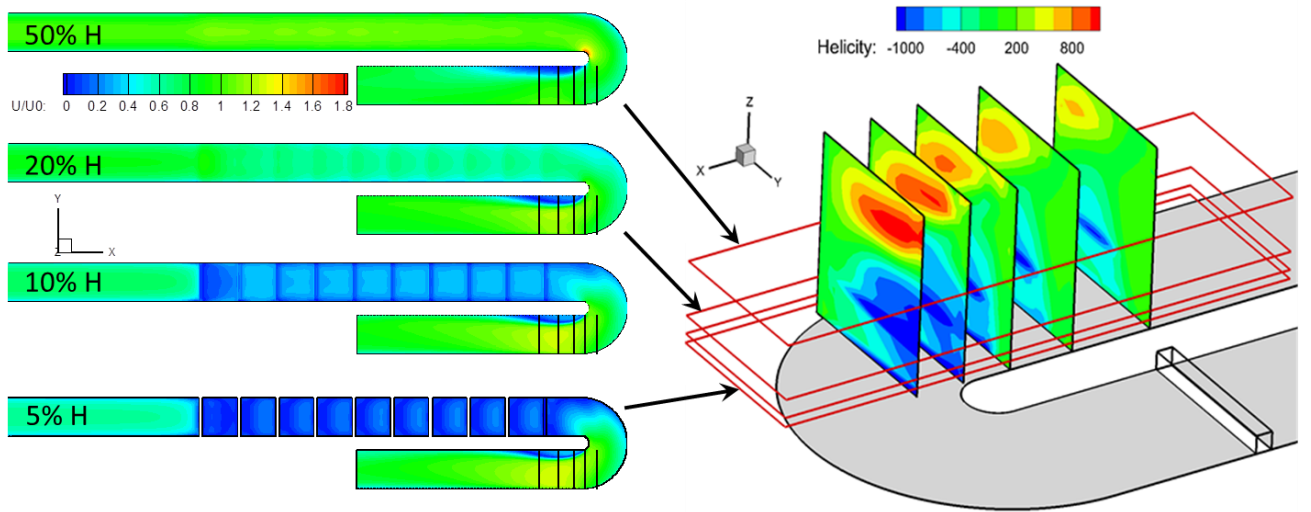
değişiklikler gözlenmektedir. Alt duvara yakın bölgeler düşük hız değerlerinden ötürü Re sayısı değişimlerinden etkilenmemektedir.



Şekil 4: Kanal Akışına Re Etkisi (%5 H ve % 50 H için)

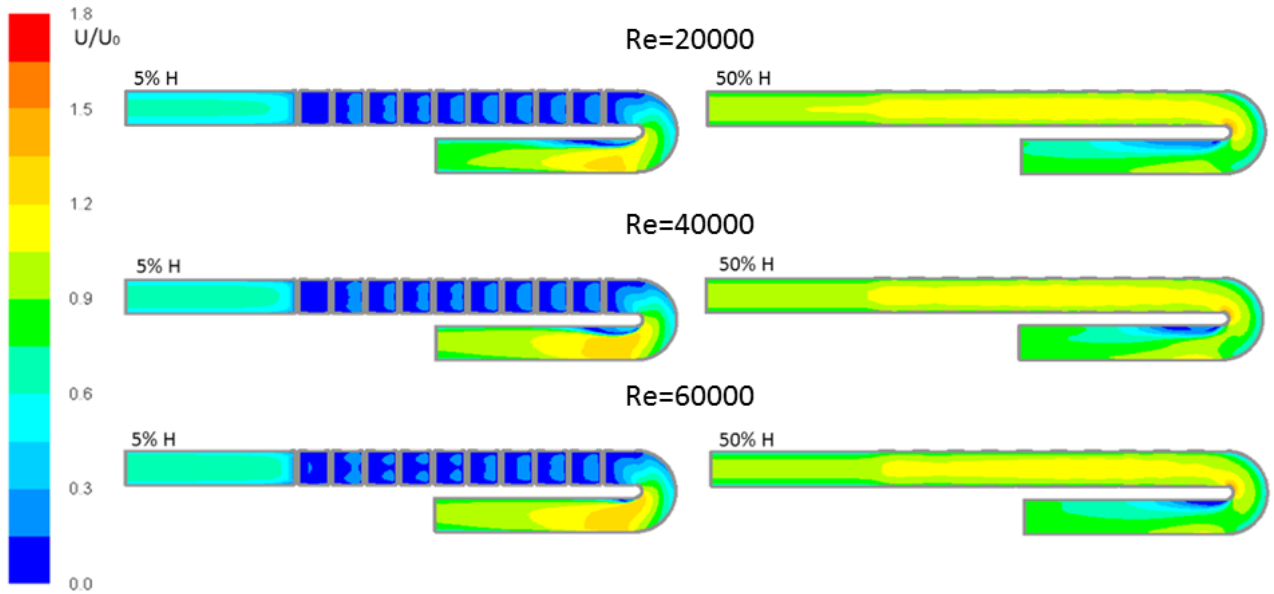
Giriş kanalında türbülantör olması hali

Giriş kanalının türbülantör olduğu hal için hız dağılımları Şekil 'de verilmiştir. Türbülantörlerin olduğu durumda dirsek sonrasındaki girdap bölgesi yine gözlemlenmiştir. Kanalın iç bölgesinde oluşan girdap bölgesinin şiddeti türbülantörsüz duruma göre daha düşüktür. Ayrıca bu girdap iç duvara daha yakın bir konumda yer almaktadır. Öte yandan dirsek bölgesi dış duvarında gözlemlenen ayrılma, türbülantörlerin yerleştirilmesi ile ortadan kalkmaktadır.



Şekil 5: Dönüş sonrası boyutsuz hız dağılımları (solda), X-vortisite (sağda) (Re=20000)

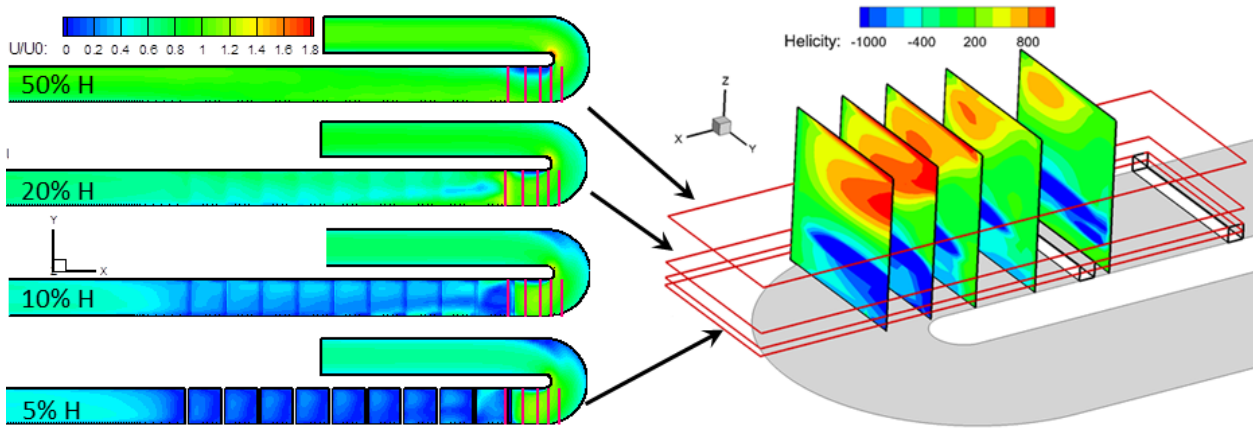
Şekil 6'da akışa Re'nin etkisi gösterilmiştir. Alt duvara yakın bölgelerde (5% H) Re sayısı arttıkça dirsekten sonraki girdap bölgesi küçülmektedir. Benzer davranış kanalın ortasındaki düzlemde de gözlemlenmektedir. Düşük Re değerleri için akış beş türbülantör sonrasında gelişmekte iken yüksek Re değerlerinde (60000) akışın gelişmesi için daha fazla türbülantör gerekmektedir. Akışın gelişimi ile ilgili sonuçlar Casarsa tarafından da deneysel olarak gözlemlenmiştir [Arts, T., Çakan, M. ve Casarsa, L., 2002].



Şekil 6: Kanal Akışına Re Etkisi (%50 H ve % 5 H için)

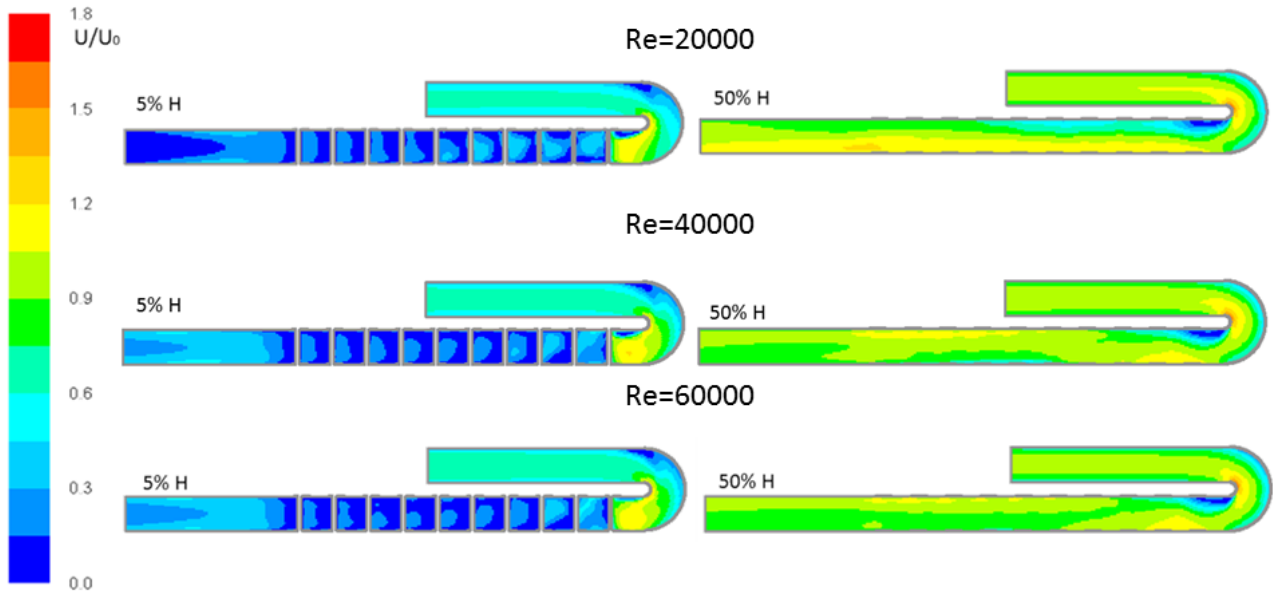
Çıkış kanalında türbülötör olması hali

Dirsek çıkışına türbülötörlerin yerleştirilmesi durumunda hız profili Şekil 7'de verilmiştir. Dirsek bölgesi sonrasındaki akış türbülötörlerden etkilenmekte ana girdap bölgesi kanal yüksekliğince daha az gelişmektedir. Ayrıca y-yönündeki basınç farkının etkisi de türbülötörlerin eklenmesi ile azalmaktadır. Bu sebeple ana girdap bölgesi dış duvara doğru daha az açılmakta ve tünelin orta bölgesinde varlığını sürdürmektedir. Fakat dirsek bölgesi çıkışındaki girdap bölgesi türbülötörsüz duruma göre küçülmektedir.



Şekil 7: Dönüş sonrası boyutsuz hız dağılımları (solda), X-vortisiteyi (sağda) (Re=20000)

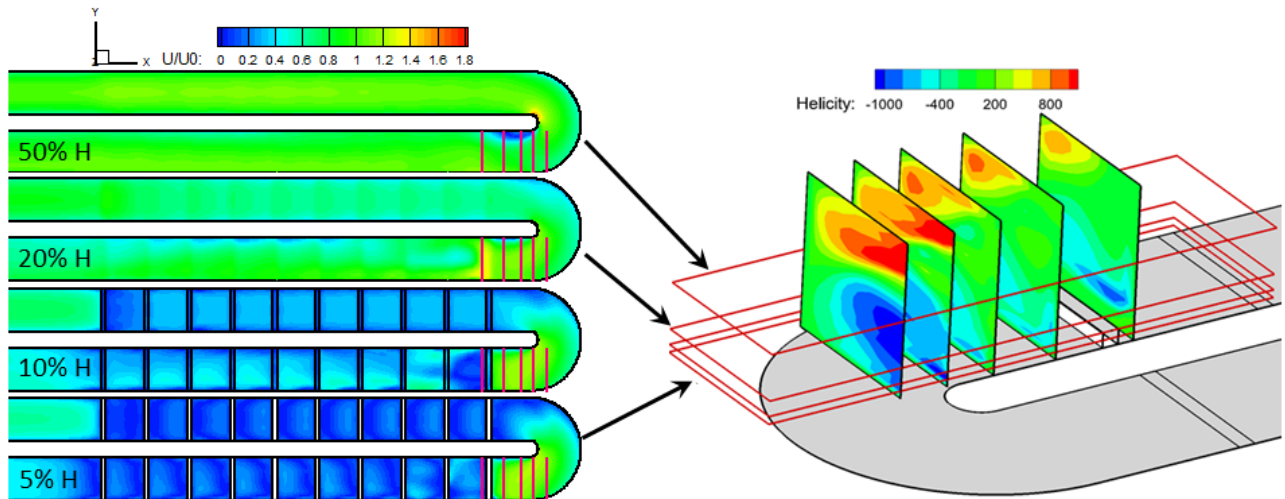
Akışa Re sayısının etkisi %5 ve %50 kanal yükseklikleri için Şekil 8'da incelenmiştir. Giriş kanalının türbülötörlü olmasına benzer şekilde akış Re'sı arttıkça dirsek sonrasındaki girdap bölgesi alt duvara yakın bölgelerde (5% H) küçülmektedir. Kanal ortasında ise Re'sının artmasının girdap bölgesine bir etkisi olmamaktadır. Fakat kanal akışı Re'sından etkilenmektedir. Ayrıca dirsek sonrasında akışın gelişmesi için gerekli türbülötör sayısı Re arttıkça azalmaktadır.



Şekil 8: Kanal Akışına Re Etkisi (%5 H ve % 50 H için)

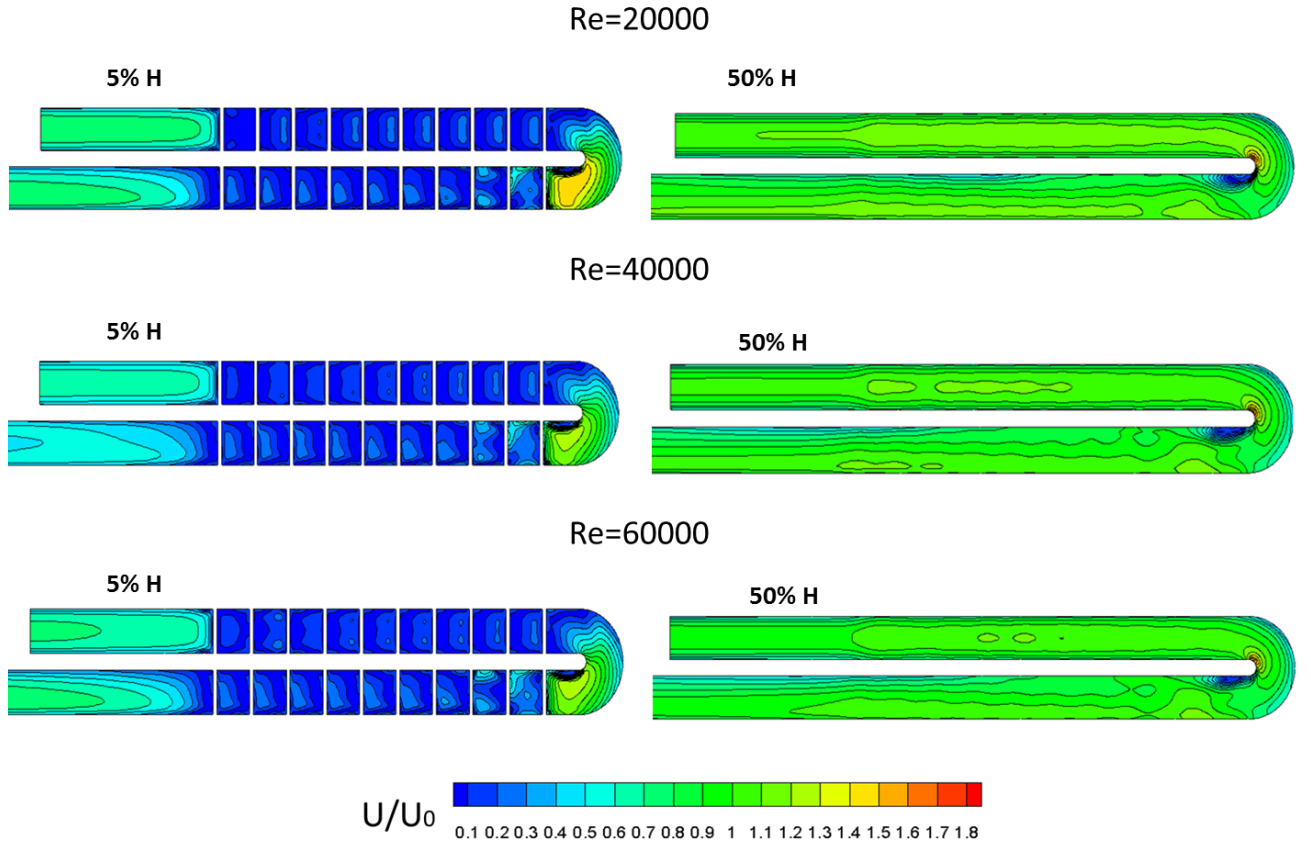
Hem giriş hem çıkış kanalında türbülator olması hali

Her iki kanalda da türbülator olması durumunda hız dağılımı Şekil 9'da verilmektedir. Ana girdap türbülatorsüz duruma benzer şekilde oluşmakta fakat sadece girişte türbülator olmasına benzer şekilde gelişmektedir. Fakat öncekinden farklı olarak girdap bölgesinin etkinliği hızlıca azalmaktadır.



Şekil 9: Dönüş sonrası boyutsuz hız dağılımları (solda), X-vorticiyi (sağda) (Re=20000)

Re sayısının tüm kanalın türbülatorlu olması durumundaki etkisi %5 ve %50 kanal yükseklikleri için Şekil 10'da incelenmiştir. %5 kanal yüksekliği için dirsek öncesinde akışın gelişmesi Re sayısı arttıkça yavaşlamaktadır. Dirsek sonrasında ise akışın gelişmesi için gerekli türbülator sayısı ise tüm Re sayılarında aynıdır. Re sayısı arttıkça dirsek sonrasındaki girdap bölgesi 50% kanal yüksekliğinde küçülmektedir.

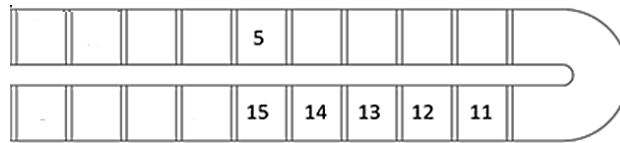


Şekil 10: Kanal Akışına Re Etkisi (%5 H ve % 50 H için)

ISI TRANSFERİNİN SOĞUTMA ETKİNLİĞİNE ETKİSİ

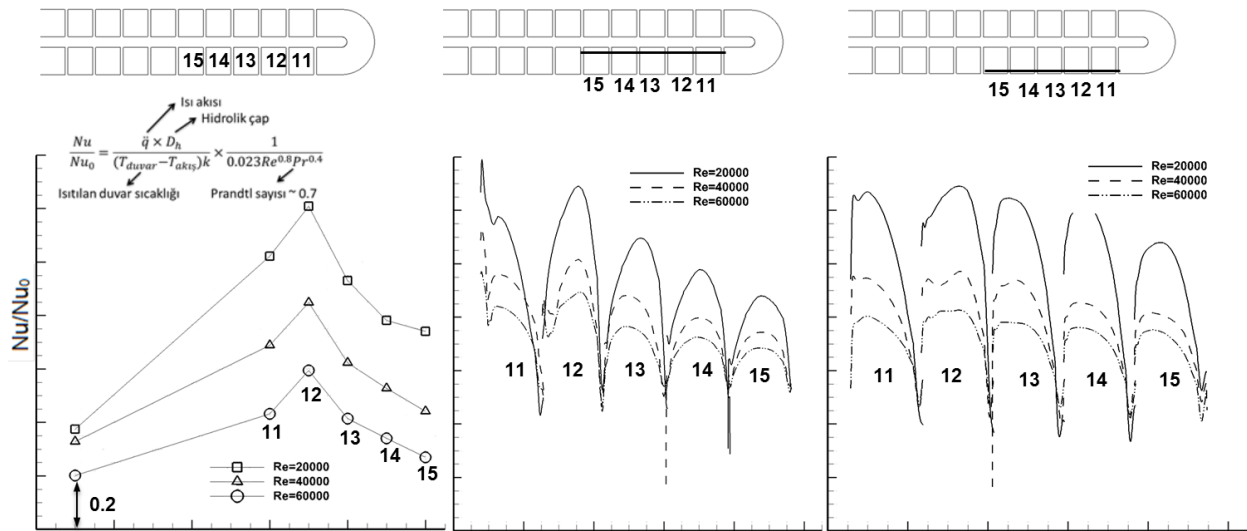
Re sayısının Isı Transferine Etkisi

Re sayısının ısı transferi üzerinde yerel etkilerini inceleyebilmek için hem giriş hem çıkış kanalında türbülantör olması durumu için analizler sabit ısı akışı koşulunda yapılmıştır. İki türbülantör arası bir bölge olacak şekilde tüm kanal Şekil 11’de gösterildiği gibi alanlara ayrılmıştır. Şekil 11’de koyu renk ile gösterilmiş alanlarda pürüzsüz ve sabit kanallarda tam gelişmiş türbülantör akış için kullanılan Dittus-Boelter [Su, G., Chen, H.C., Han, J.C., 2007] korelasyonu ($Nu_0=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$) ile Nu sayısı normalize edilmiştir.



Şekil 11: Nu/Nu₀’in İncelendiği Lokasyonlar

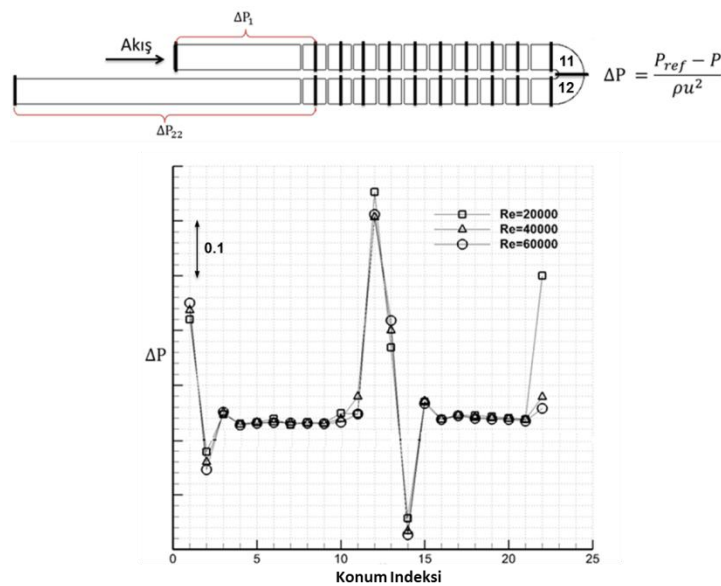
Şekil 11’de 5 numara ile gösterilen bölge dirsek öncesi akışın geliştiği bölgedir. Diğer alanlar ise dirsek sonrası akışın tekrar gelişmeye başlamadan önceki kısımlarını göstermektedir. Bu alanlardaki ortalama Nu/Nu₀ değerinin Re sayısına göre dağılımı Şekil 12’de gösterilmiştir. Nu/Nu₀ değerleri bölgelerde ortalama alınarak gösterilmiştir.

Şekil 12: Re Sayısına Göre Nu/Nu₀ Dağılımı

Akışın dirsek dönüşünden sonra yavaşlaması ve ayrılmanın meydana gelmesi ile birlikte kanalın dış duvarında ısı transfer katsayısı azalmaktadır. Bunun yanında sınır tabakadaki akışın ivmelenmesiyle iç duvarda ısı transferi artmaktadır. Dönüşten sonraki bu ısı transferinin artışı çok düzensiz bir şekilde olmaktadır. Özellikle ilk türbülötörün arkasındaki yeniden bağlanma alanı sonraki türbülötörün arkasındaki bağlanmadan daha büyük olduğu için türbülans seviyesini arttırmakta ve Şekil 12'de görülen 11. bölgede en yüksek ısı transferi artışı görülmektedir. Re sayısının artışıyla beraber iyileşmenin azaldığı görülmektedir.

Re sayısının Basınç Kaybına Etkisi

Türbülötörler ve 180° dönüşlü dirseğin oluşturduğu akış ayrılmaları, yeniden bağlanma ve ikincil akımlar sebebiyle soğutma kanalı içerisindeki akış türbülanslı ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu karmaşık yapıyla birlikte kanal içerisindeki basınç kayıplarının incelenmesi gerekmektedir. Şekil 13'de kanalın girişinden çıkışına kadar her bir türbülötör arasındaki basınç kayıpları hesaplanmış ve kanal boyunca dağılımı gösterilmiştir. Isı transfersiz durum ile karşılaştırıldığında değişiklik görülmemiştir.



Şekil 13: Basınç Kayıplarının Lokasyonları ve Kanal Boyunca Dağılımı

Kanalın girişinden ilk türbülötöre olan kısımda akış gelişmekte olduğu için bir miktar basınç kaybı oluşmaktadır. İlk türbülötörden sonra aniden değişen akış karakteristiği negatif basınç oluşturmaktadır ve sonraki bölgelerde periodik davranış izleyerek basınç toparlanmaktadır. En büyük basınç

kayıpları dirsek dönüşünde meydana gelmektedir. Dönüşten sonraki ilk türbülâtörden sonra girişteki gibi bir negatif bölge oluşmakta sonra basınç tekrar toparlanmaktadır.

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada dönmeyen durağan haldeki kanatçıklar içindeki 180° dönüş bölgelerindeki akış yapısına ve döngüden önceki ve sonraki türbülâtörlerin bu akış alanına etkileri incelenmiştir. Kanal içindeki akış; türbülâtörlerin olmadığı hal, sadece dönüş öncesi türbülâtörlerin olması hali, sadece dönüş sonrası bölgenin türbülâtörlü olması ve her iki bölgede de türbülâtörlerin olması hali için üç farklı Reynolds sayısı için incelenmiştir. Isı transferinin yerel etkilerini inceleyebilmek için hem giriş hem çıkış kanalında türbülâtör olması durumu için analizler sabit ısı akışı koşulunda tekrar yapılmıştır. Tüm analizleri sayısal olarak yapılmış, girdap yapıları ve basınç kayıpları incelenmiştir.

Dirsek bölgesi dönüşünden sonra akış ayrılmakta ve hem dirsek dış duvarında hem de iç duvarda bir girdap bölgesi oluşturmaktadır. Bu girdap bölgesi etkin akış alanını azalttığına akışın hızlanmasına sebep olmaktadır. Girdap bölgesi ayrıca yüksekliğe bağlı olarak da değişmektedir. Kanalın ortasında (50% H) ayrılma bölgesi daha büyükken alt yüzeye yaklaşıldıkça (5% H) etki alanı küçülmektedir. Dirsek dış duvarındaki girdap türbülâtörlerin kullanıldığı durumda etkisini kaybederken, dirsek iç duvarındaki girdap ise türbülâtörsüz duruma göre küçülmektedir. 20000 ve 40000 Re sayılarında akış davranışında değişiklik görülmezken 60000 Re sayısında akışın gelişmesi için daha fazla türbülâtör gerektiği gözlemlenmiştir.

Türbülâtörlerin etkisiyle beraber türbülâtörsüz duruma göre Nu/Nu_0 değerinde ortalama %50 artış görülmüştür. Sınır tabakadaki akışın ivmelenmesiyle ısı transferi özellikle dirsek dönüşünden sonra dirsek iç duvarlarda dış duvara oranla %20 artış göstermiştir. Dönüşten sonra akış ilerledikçe iç duvarda ısı transferi azalmıştır. Akışın dirsek dönüşünden sonra yavaşlaması ve ayrılmanın meydana gelmesi ile birlikte kanalın dış duvarında ısı transfer katsayısının azaldığı görülmüştür. Re sayısı 20000'den 60000'e çıktığında dirsek dönüşünde ısı transferi katsayısı en büyük olan yerde %50 oranında azalırken akış ilerledikçe bu fark %30'a kadar düşmüştür.

Akış tam geliştikten sonra dirsek bölgesine kadar her bir türbülâtör arasında aynı miktarda basınç kaybı olmuştur. En büyük basınç kaybı dirsek dönüşünde ayrılmanın olduğu bölgede oluşmuştur. Basınç kaybı Re sayısının artışıyla değişiklik göstermemiştir. Dönüşten sonra akışın tekrar toparlanmasıyla birlikte her bir türbülâtör arasında basınç kaybı değişmemiştir.

Kaynaklar

- Alkhamis, N., Han, J.C. ve Rallabandi, A.P., 2009. *Heat Transfer and Pressure Drop Measurements for a Square Channel with 45° Round Edged Ribs at High Reynolds Numbers*, Proceedings of ASME Turbo Expo Orlando.
- Ahn, J., Choi, H. ve Lee, J.S. J., 2004. *Large Eddy Simulation Of Flow And Heat Transfer In A Channel Roughened By Square Or Semicircle Ribs*, Proceedings of ASME Turbo Expo, Vienna.
- ANSYS v13.0, 2013. k-ε Realizable Turbulence Model Manual, ANSYS Inc.
- Araki, S., Fujita, H., Hirota, M., Syuhada, A. ve Yoshida, T., 1999. *Heat and Mass Transfer Characteristics in Two-Pass Smooth Channels with a Sharp 180° Turn*, International Journal of Heat and Mass Transfer, cilt 42, s. 3757-3770.
- Arts, T., Çakan, M. ve Casarsa, L., 2002. *Characterization of the Velocity and Heat Transfer Fields in an Internal Cooling Channel with High Blockage Ratio*, Proceedings of the ASME Turbo Expo, Amsterdam.
- Behnia, M., Durbin, P.A., Iccarino, G. ve Ooi, A., 2002. *Reynolds Averaged Simulation of Flow and Heat Transfer in Ribbed Ducts*, International Heat and Fluid Flow, cilt 23, s. 750-757
- Bunker, R.S. ve Osgood, S.J., 2003. *The Effect Of Turbulator Lean On Heat Transfer And Friction In A Square Channel*, Proceedings of ASME Turbo Expo, Atlanta.
- Cardone, G., Carlomagno, G.M. ve Astarita, T., 1997. *Heat Transfer in a 180° Turn Channel*, QIRT 96 - Euratherm Series 50 - Ediziani ETS, Pisa.
- Cardone, G., Carlomagno, G.M. ve Astarita, T., 2000. *Heat Transfer in a 180° Turn Ribbed Square Channel*, ICAS 2000 Congress.

- Chandra, P. R., Han, J.C. ve Niland, M.E., 1997. *Turbulent Flow Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel With Varying Numbers of Ribbed Walls*, Journal of Turbomachinery, cilt 119, s. 374-380, 1997.
- Chen, C.C., Chen, M.Y. ve Liou, T.M., 2001. *TLCT and LDV Measurements of Heat Transfer and Fluid Flow in a Rotating Sharp Turning Duct*, International Journal of Heat and Mass Transfer, cilt 44, s. 1777-1787.
- Chen, W., Jiang, H. ve Ren, J., 2009. *Verification of RANS for Analyzing Convective Cooling System With and Without Ribs*, Proceedings of ASME Turbo Expo, USA.
- Chen, W., Jiang, H. ve Ren, J., 2011. *Effect of Turning Vane Configurations on Heat Transfer and Pressure Drop in a Ribbed Internal Cooling System*, ASME Journal of Turbomachinery, cilt 133, s. 5-11, October.
- Dhanasekaran, T.S. ve Wang, T., 2013. *Computational Analysis of Mist/Air Cooling in a Two-Pass Rectangular Rotating Channel with 45° Angled Rib Turbulators*, International Journal of Heat and Mass Transfer, cilt 61, s. 554-564
- Ekkad, S., Dutta, S. ve Han, J.C., 2000. *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling*, New York: Taylor & Francis.
- Glicksman, L., Han, J. ve Rohsenow W., 1978. *An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened Surfaces*, International Journal of Heat and Mass Transfer, cilt 21, no. 8, s. 1143–1156.
- Han, J.C. ve Park, J.S., 1988, *Developing Heat Transfer in Rectangular Channels with Rib Tubulators*, International Journal of Heat Mass Transfer, cilt 31, no. 1, s. 183-195.
- Han, J.C., Lei, C.K., Ou, S. ve Park, J.S., 1989. *Augmented Heat Transfer in Rectangular Channels of Narrow Aspect Ratios with Rib Turbulators*, International Journal of Heat Mass Transfer, cilt 32, no. 9, s. 1619-1630.
- Han, J., Lee, C. ve Zhang, Y., 1991. *Augmented Heat Transfer in Square Channels with Parallel, Crossed, and V-shaped Angled Ribs*, Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, cilt 113, s. 590-596.
- Han, J.C., Huan, Y., Ou, S. ve Park, J.S., 1992. *Heat Transfer Performance Comparison of Five Different Rectangular Channels with Parallel Angled Ribs*, International Journal of Heat and Mass Transfer, cilt 35, no. 11, s. 2891-2903.
- Hwang, J.J. ve Liou, T.M., 1992. *Turbulent Heat Transfer Augmentation and Friction in Periodic Fully Developed Channel Flows*, J. Heat Transfer, cilt 114, no. 1, s. 56-64.
- Jeng, T.M., Tzeng, S.C. ve Xu, R., 2013. *Fluid Visualization and Heat Transfer Tests in a 180° Round Turned Channel with a Perforated Divider*, International Communications in Heat and Mass Transfer, cilt 44, s. 45-51.
- Jenkins, S. C., Schnieder M., Shevchuk, I.V., Weigand, B., Wolfersdorf J.V. ve Zehnder, F., 2008. *The Effect Of Ribs And Tip Wall Distance On Heat Transfer For A Varying Aspect Ratio Two-Pass Ribbed Internal Cooling Channel*, Proceedings of ASME Turbo Expo, Berlin.
- Labbe, O., 2013. *Large Eddy Simulation of Flow and Heat Transfer in a Ribbed Duct*, Computer & Fluids, cilt 76, s. 23-32.
- Layek, A., Saini, J. ve Solanki, S., 2007. *Heat Transfer and Friction Characteristics for Artificially Roughened Ducts with Compound Turbulators*, International Journal of Heat and Mass Transfer, cilt 50, s. 4845–4854.
- Ostaneck, J., Prausa, J. ve Suetendael, A.V. ve Thole K., 2008. *Establishing A Methodology For Resolving Convective Heat Transfer From Complex Geometries*, Proceedings of ASME Turbo Expo, Berlin.
- Spring, S.D. ve Taslim, M.E., 1994. *Effects of Turbulator Profile and Spacing on Heat Transfer and Friction in a Channel*, Journal Of Thermophysics And Heat Transfer, cilt. 8, no. 3, s. 555-562
- Su, G., Chen, H.C., Han, J.C., 2007. *Computation of Flow and Heat Transfer in Rotating Rectangular Channels (AR=4:1) with pin-fins by a Reynolds Stress Turbulence model²*, J. Heat Transf. 129, pp. 685-696.
- Tafti, D.K. ve Viswanathan, A.K., 2006. *Detached Eddy Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Two-Pass Internal Cooling Duct*, International Journal of Heat and Fluid Flow, cilt 27, s. 183-195.
- Walker, D. ve Zausner J., 2007. *RANS Evaluations of Internal Cooling Passage Geometries: Ribbed Passages and a 180° Bend*, Proceedings of ASME Turbo Expo, Canada.