



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ODA KLİMA SİSTEMLERİ
HIZ VE SICAKLIK
DAĞILIMLARININ SAYISAL
OLARAK ARAŞTIRILMASI

Murat KESEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ODA KLİMA SİSTEMLERİ
HIZ VE SICAKLIK
DAĞILIMLARININ SAYISAL
OLARAK ARAŞTIRILMASI

Murat KESEN

Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ODA KLİMA SİSTEMLERİ
HIZ VE SICAKLIK
DAĞILIMLARININ SAYISAL
OLARAK ARAŞTIRILMASI

Murat KESEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 27.07.2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT Prof. Dr. Muhiddin CAN Prof. Dr. Yusuf ULCAY
(Danışman)

.....

ÖZET

Bu çalışmada, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Annex 20 test odasındaki hız ve sıcaklık dağılımları ANSYS-FLOTTRAN bilgisayar programı kullanılarak elde edilmiştir. Hava sıkıştırılmaz kabul edilmiş ve iki boyutlu korunum denklemleri Galerkin sonlu elemanlar metoduyla ayrıklaştırılıp çözümler elde edilmiştir. Hem eşsıcaklıklı (Isothermal) hem de eşsıcaklıklı olmayan (Nonisothermal) durum göz önüne alınmıştır. Eşsıcaklıklı durum için sekiz farklı türbülans modeli, eşsıcaklıklı olmayan durum içinse tabana sabit ısı akısı verilerek altı farklı türbülans modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Ayrıca oda tabanı için yerel Nusselt sayısı değişimleri de elde edilmiştir. Oda hava dağılımı analizlerinde türbülans modellerinin uygunluğu deneysel veriler de dikkate alınarak her iki durum için karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD), IEA Annex 20 test odası, türbülans modelleri, hız dağılımı, sıcaklık dağılımı.

ABSTRACT

In this study, air flow and temperature distributions for IEA Annex 20 test room have been obtained by using ANSYS-FLOTRAN computer code. Air is assumed incompressible and two-dimensional conservation equations are solved by using Galerkin finite element method. Both isothermal and non-isothermal cases are considered. In isothermal case, analyses have been performed by using eight turbulence models and six turbulence models are used in the other case by considering constant heat flux in the floor. In addition, local Nusselt number variations in the floor are also obtained. Turbulence models used in room air distribution analyses for both two cases are compared by considering experimental data.

Keywords: CFD, IEA Annex 20 test room, turbulence models, velocity distribution, temperature distribution.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK SAYFASI.....	i
TEZ ONAY SAYFASI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ.....	xi
1 GİRİŞ.....	1
2 KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1 Isıl Konfor.....	5
3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1 Materyal.....	9
3.2 Yöntem.....	21
4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	29
4.1 Eşsıcaklıklı Test Modeli Sonuçları.....	29
4.2 Eşsıcaklıklı Olmayan Test Modeli Sonuçları.....	56
5 TARTIŞMA VE SONUÇ.....	65
5.1 Isıl Konfor.....	65
5.2 Akım Çizgileri.....	65
5.3 Hızların Karşılaştırılması.....	66
5.4 Ayrılma Noktaları.....	67
5.5 CPU Çözüm Süreleri.....	68
5.5 Nusselt ve Sıcaklık Karşılaştırması.....	68
5.6 Sonuç ve Öneriler.....	70
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	73
TEŞEKKÜR.....	74

KISALTMALAR DİZİNİ

RNG	-	Re-Normalized Group Turbulence Modeli.
GIR	-	Nonlinear Model of Girimaji.
SZL	-	Shih, Zhu, Lumley Model.
k- ω	-	k- ω Turbulence Model
SST	-	Shear-Stress Transport Turbulence Model
k- ϵ	-	Standard k- ϵ Model
IEA	-	International Energy Agency - Uluslararası Enerji Ajansı
Re	-	Reynolds sayısı
Ar	-	Arşimet sayısı
RANS	-	Reynolds Averaged Navier-Stokes – Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
Denklemleri		
HAD	-	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
CFD	-	Computed fluid Dynamics
CPU	-	Central Process Unit
FEM	-	Finite Element Method
CV	-	Control Volume Method

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 3.1 Çözümlerde karşılaştırılan türbülans modelleri.....	20
Tablo 4.1 Eşsıcaklıklı durumda çözüm için harcanan CPU zamanları.....	55
Tablo 4.2 Ayrılma noktaları karşılaştırması	55
Tablo 4.3 Eşsıcaklıklı olmayan test modeli çözüm CPU süreleri.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2-1 Voigt ve ark. (2003) 'de kullanılan Annex 20 test odası modeli	4
Şekil 2-2 Ayrılma noktaları ve türbülans merkezi, Voigt ve ark. (2003)	4
Şekil 2-3 Ortama hava sevki, besleme altta, emiş üstte (Pırasacı ve Sivrioğlu 2005).	6
Şekil 2-4 Ortama hava sevki, besleme üstte, menfez altta (Pırasacı ve Sivrioğlu 2005)..	7
Şekil 2-5 Ortama hava sevki, ideal durum (Pırasacı ve Sivrioğlu 2005).	7
Şekil 2-6 Ortama hava sevki, Aynı noktadan besleme ve emiş (Pırasacı ve Sivrioğlu 2005).	8
Şekil 3-1 2 Boyutlu Annex 20 test odası şematik gösterimi	9
Şekil 3-2 Sayısal çözüm için oluşturulan Annex 20 odası modeli.....	12
Şekil 3-3 $X=3$ m' de $K-\omega$ türbülans modeli için ağ sayısından bağımsız çözüm için hızın x bileşeninin karşılaştırılması.....	14
Şekil 3-4 $X=3$ m' de $K-\omega$ türbülans modeli için ağ sayısından bağımsız çözüm için hızın x bileşeninin karşılaştırılması.....	15
Şekil 3-5 Sol duvar y^+ karşılaştırması.....	16
Şekil 3-6 Sağ duvar y^+ karşılaştırma.....	17
Şekil 3-7 Tavan y^+ karşılaştırma.....	17
Şekil 3-8 Taban y^+ karşılaştırma.....	18
Şekil 3-9 2875 ağ sayılı model.....	18
Şekil 3-10 5800 ağ sayılı model.....	18
Şekil 3-11 Eşsıcaklıklı Test Odası	19
Şekil 3-12 Eşsıcaklıklı olmayan test odası.....	20
Şekil 3-13 Yinelemeden bağımsız çözüm için hızların karşılaştırılması.....	21
Şekil 3-14 Bilgisayar destekli analiz metodunun aşamaları (Pulat 1997).....	22
Şekil 4-1 Akış iplikleri gerçek görüntüsü Nielsen (1974) yılındaki deneysel çalışma ...	29
Şekil 4-2 Standart $K-\epsilon$ Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	30
Şekil 4-3 Standart $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Akım Çizgileri, (Rong ve Nielsen 2008).....	30
Şekil 4-4 Standart $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Lemaire 1991).....	30
Şekil 4-5 Standart $K-\epsilon$ ve $K-\omega$ Türbülans Modeli Akım Çizgileri Genel Görüntüsü (Voigt 2000).....	31
Şekil 4-6 Standart $K-\omega$ Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	31
Şekil 4-7 Standart $K-\omega$ (Wilcox) Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Rong ve Nielsen, 2008)	31
Şekil 4-8 $K-\omega$ BSL Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Rong ve Nielsen).....	32
Şekil 4-9 Girimaji Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)	32
Şekil 4-10 $K-\omega$ SST Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	32
Şekil 4-11 $K-\omega$ SST Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Rong ve Nielsen, 2008).....	33
Şekil 4-12 $K-\omega$ SST Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Voigt, 2000).....	33
Şekil 4-13 RNG Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)	33
Şekil 4-14 New $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)	34
Şekil 4-15 Zero Equation Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	34
Şekil 4-16 Standart $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Türbülans Şiddeti (Lemaire 1991).....	35
Şekil 4-17 Standart $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Türbülans Şiddeti (Vogl 1993).....	35
Şekil 4-18 Low-reynolds $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Türbülans Şiddeti (Skavgaard 1993). 35	
Şekil 4-19 Standart $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma) ...	36

Şekil 4-20 Girimaji Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma).....	36
Şekil 4-21 K- ω Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma)	36
Şekil 4-22 RNG Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışması)	37
Şekil 4-23 K- ω SST Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma)	37
Şekil 4-24 New K- ϵ Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma).....	37
Şekil 4-25 Hız dağılımlarının alındığı noktalar (Rong ve Nielsen 2008)	38
Şekil 4-26 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımlar X=3 ve X=6 'da (Voigt 2000)	39
Şekil 4-27 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Rong ve Nielsen 2008)	40
Şekil 4-28 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6' da (Bu çalışma)	41
Şekil 4-29 Standart K-e Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Voigt, 2000)	42
Şekil 4-30 Standart K-e Türbülans Modeli Hız Dağılımları Y=2,916 ve Y=0,084 'da (Rong ve Nielsen, 2008)	42
Şekil 4-31 Standart K-e Türbülans Modeli Hız Dağılımları Y=2,916 ve Y=0,084 'da (Bu çalışma)	43
Şekil 4-32 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar X=3 ve X=6 'da (Voigt 2000)	44
Şekil 4-33 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Rong ve Nielsen 2008)	45
Şekil 4-34 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Bu çalışma)	46
Şekil 4-35 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Voigt 2000)	47
Şekil 4-36 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Rong ve Nielsen 2008)	47
Şekil 4-37 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Bu çalışma)	48
Şekil 4-38 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Rong ve Nielsen 2008)	49
Şekil 4-39 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Bu çalışma)	50
Şekil 4-40 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Rong ve Nielsen 2008)	51
Şekil 4-41 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Bu çalışma)	52
Şekil 4-42 X=3 m ve X=6 metrede diğer türbülans modellerine ait hız dağılımları (Bu çalışma)	53
Şekil 4-43 Y=2,916 ve Y=0,084 diğer türbülans modellerine ait hız dağılımları (Bu çalışma)	54
Şekil 4-44 Akış iplikleri gerçek görüntüsü Nielsen (1974) yılındaki deneysel çalışma .	56
Şekil 4-45 Standart K- ϵ Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	57
Şekil 4-46 Std K- ω Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	57
Şekil 4-47 SST Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	57
Şekil 4-48 Girimaji Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)	58

Şekil 4-49 SZL Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma).....	58
Şekil 4-50 RNG Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)	58
Şekil 4-51 Eşsıcaklıklı olmayan durum $X=3$ m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması.....	59
Şekil 4-52 Eşsıcaklıklı olmayan durum $X=6$ m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması.....	60
Şekil 4-53 Eşsıcaklıklı olmayan durum $Y=0,084$ m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması.....	61
Şekil 4-54 Eşsıcaklıklı olmayan durum $Y=2,916$ m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması.....	61
Şekil 4-55 GİRİMAJİ Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma).....	62
Şekil 4-56 $K-\omega$ Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma).....	63
Şekil 4-57 RNG Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma).....	63
Şekil 4-58 SST Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma).....	63
Şekil 4-59 SZL Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)	64
Şekil 4-60 Std $K-\epsilon$ Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)	64
Şekil 4-61 Sıcaklık Dağılımı (Lemaire 1991).....	65
Şekil 5-1 $X=3$ ve $X=6$ metrede tüm türbülans modellerinin, literatür ile karşılaştırılması	66
Şekil 5-2 $Y=2,916$ ve $Y=0,084$ metrede tüm türbülans modellerinin, literatür ile karşılaştırılması	67
Şekil 0-1 Taban Yüzeyinde Sıcaklık Değerleri ile Türbülans Modelleri Karşılaştırılması	68
Şekil 0-2 Türbülans Modellerine göre Nu Karşılaştırılması	69
Şekil 0-3 Tabanda Nu dağılımı, (Tripathi ve Moulic 2007).....	69

SİMGELER DİZİNİ

L	-	Test Odası Uzunluğu (m)
h	-	Giriş Kanalı Yüksekliği (m)
t	-	Çıkış Kanalı Yüksekliği (m)
H	-	Test Odası Yüksekliği (m)
U	-	Hız (m/s)
ν	-	Kinematik Viskozite (m^2/s)
Re	-	Reynolds sayısı
ι	-	Türbülans Uzunluk Ölçeği (m)
Tu	-	Giriş Türbülans Şiddeti
k_0	-	Türbülans Kinetik Enerjisi (m^2/s^2)
ϵ_0	-	Türbülans Kinetik Enerjisi Yayılma Hızı (m^2/s^3)
Ar	-	Arşimet Sayısı
g	-	Yerçekimi İvmesi
θ	-	Giriş Ve Çıkış Hava Sıcaklık Farkı ($^{\circ}C$)
U_0	-	Giriş Hızı (m/s)
T	-	Sıcaklık (K)
q	-	Isı Akısı (W/m^2)
y^+	-	Cidara olan boyutsuz uzaklık
ρ	-	Yoğunluk (kg/m^3)
u_{τ}	-	Sürtünme hızı
Δy	-	Duvara olan uzaklık (m)
P	-	Basınç (N/m^2 , Pa)
v_x	-	x yönünde hız vektörü
v_y	-	y yönünde hız vektörü
v_z	-	z yönünde hız vektörü
t	-	zaman (s)
R	-	Gaz sabiti
Ω_m	-	Koordinat sistemindeki çevresel hız
Nu_x	-	Yerel Nusselt sayısı
μ_t	-	Türbülanslı eddy viskozitesi (Pa.s)
u	-	x yönündeki hız (m/s)
v	-	y yönündeki hız (m/s)
c_p	-	Özgül ısı (J/kgK)

1 GİRİŞ

Oda hava dağılımlarının göz önüne alınarak havalandırmada enerji tasarrufu ve konforlu bir ortam oluşturma hem bina tasarımcısının hem de klima mühendisinin ortak amacıdır. Konforlu bir ortamın daha az enerji harcanarak sağlandığı bu binalar ise kullanıcılar tarafından tercih sebebidir. Özellikle ofisler, endüstriyel tesisler, hastaneler ve evlerde yapıyı kullananların üretkenliğini sağlamak amacıyla oda hava dağılımlarının hesaplanması konusunda geniş çalışmalar yapılmıştır. Hem insanın konforu hem de yapıdaki enerji kullanımı, taze havanın sağlandığı yol ile yüksek oranda etkilenir. Taze havanın verilişi ve dağılışı, oda içi çevreyi belirlemede çok önemli bir rol oynadığından dolayı işgal edilen alandaki hava akışının doğru tahmini, etkili bir hava dağıtım sistemi tasarımı için dönüm noktasıdır. Oda içindeki kullanım alanlarında ise hızlar düşük; akış genellikle laminer ya da zayıf türbülanslı karakteristiktir. Oda içine hava bir kanaldan verilebilir. Bu kanaldaki akış ise genelde türbülanslı akıştır. Özellikle hava giriş-çıkış yerleri, pencereler, oda geometrisi ve iç dekorasyon hava dolaşımı üzerinde büyük rol oynamaktadır. Türbülanslı akış, ısı transferi açısından avantajlı olmasına karşılık basınç düşümlerinin arttığı bir akış şeklidir. Akışta meydana gelen dönme ve girdaplar sebebiyle, akış çok karmaşıktır. Bu yüzden akışı analitik olarak incelemek çok zordur. Gelişen bilgisayarlar yardımıyla, günümüzde, birçok türbülans modelleri ve çözüm teknikleri olmakla birlikte, en gelişmiş modeller dahi belirli oranda hatalar verebilmektedir. Bunun sebebi girdap ve dönmelerin büyüklüğünü ve sayısını tahmin etmekteki zorluktur. Sayısal akışkanlar dinamiği (SAD), yetmişli yıllardan beri oda hava hareketinin tahmini ve oda içi ısı konforunun değerlendirilmesi için güvenilir bir araç olarak kullanılmaktadır.

Bir mahale beslenen hava sıcaklığına göre değişik dağılım özellikleri gösterir. Eğer besleme hava sıcaklığı salonun hava sıcaklığına eşit ise eşsıcaklı hava kalıbı (isothermal case) olarak adlandırılır. Başlangıç sıcaklığı mahalın hava sıcaklığından farklı ise eşsıcaklılık olmayan (non-isothermal case) hava kalıbı denir. Besleme ve mahal havası arasındaki sıcaklık farkı, hava kalıbının yörüngesine, kalıbın tavan veya duvarda temas ettiği ve ayrıldığı yere, kalıbın hava atış mesafesine etki ederek, kalıpta

ıslıl kuvvetler oluştururlar. Bu etkiler, ıslıl kaldırma kuvvetlerinin, atalet kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan boyutsuz Archimeds (Ar) sayısına bağlıdır.

Bu çalışmada oda içi hava akış ve ıslıl analizi ANSYS-FLOTRAN sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. Analizde 2 boyutlu analizler için tasarlanmış IEA Annex 20 test odası kullanılmıştır. Çalışmada hem eşsıcaklıklı (isothermal) hem de eşsıcaklıklı olmayan (non-isothermal) durum göz önüne alınmıştır. Bu çalışmanın amacı çeşitli türbülans modellerinin oda içi hava hareketlerinin ve sıcaklık dağılımlarının elde edilmesindeki tahmin yeteneklerini inceleyerek karşılaştırmaktır.

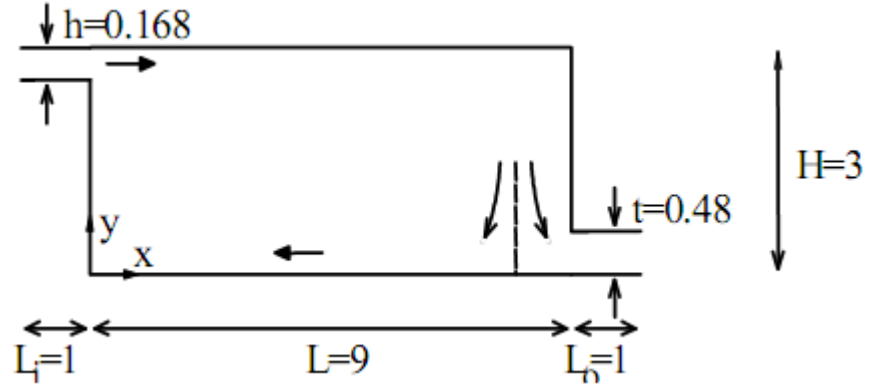
2 KAYNAK ÖZETLERİ

Havalandırılan boş mahallerde ki hava akış analizi hem deneysel hem de sayısal olarak daha önceleri çalışılmıştır. İlk deneysel çalışmalar Nielsen (1974) tarafından yapılmıştır. Nielsen bu çalışmasında elde ettiği veriler ve bir görüntü bu çalışmada karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Sayısal çözümler için, 1988 yılında içerisinde Nielsen, Lemaire ve Chen' in de bulunduğu birçok araştırmacı IEA çatısı altında 3,5 yıl sürecek ortak bir programa başlamışlardır. Programın amacı, binalardaki hava hareketi modellerini sayısal çözümlerle tahmin edebilmesinin geliştirilmesiydi. 1993 de yayımlanan çalışma sonucunda “Annex 20” test odası şartları oluşturulmuştur. Annex 20 test modeli sayesinde çokça bilinen Annex 20 geometrisi ve sınır şartları da ortaya konmuştur. Nielsen (1990), Annex 20 test odası şartlarını belirlemiş, Lemaire (1991) ve Chen (1991) modellemesini karşılaştırmalı olarak farklı sayısal modellerle çözüm çalışmasını yapmışlardır.

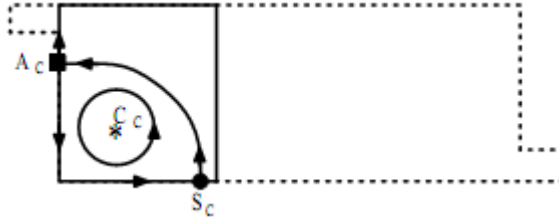
Havalandırılan boş mahallerde ki hava akış analizi karmaşıktır. Çünkü mahal içinde hem tam türbülanslı bölgeler hem de laminer akışın düzenli olduğu bölgeler barındırmaktadır. RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri tam türbülanslı akış analizi için geliştirildiğinden, RANS kullanılarak akış analizini kesin olarak tahmin etmek zordur. Oda içi hava hareketlerinin hesaplanmasında standart k-ε modeli en çok kullanılan modellerden biridir. k-ε modelinin kararlı oluşu ve Nielsen (1990) 'in yaptığı çalışmada çıkan sonuçların deneysel verilere yakın olması bunu doğrulamaktadır. Yine de bazı durumlarda, k-ω modeli daha uygun sonuçlar vermektedir. Voigt (2000) yılında 2 boyutlu eşsıcaklıklı Annex 20 test odasında, 5 farklı türbülans modelinin karşılaştırmasını yapmıştır. Bu çalışmada standart k-ε modeli, düşük Re sayılı k-ε modeli, Wilcox' a ait k-ω modeli ve Menter' in BSL (Baseline) k-ω modeli uygun sonuçlar verirken, SST (Shear-Stress Transport) k-ω türbülans modeli kötü performans göstermiştir.

Voigt ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada türbülans modellerini, Annex 20 odası sol alt bölgede oluşan türbülanslı alanın tespiti ile karşılaştırmışlardır. Şekil 2.1' de

Voigt 'in kullandığı test odası, şekil 2.2' de de türbülans ayrılma noktalarının ve türbülans merkezinin tespiti görülmektedir. Bu çalışmada da ayrılma noktaları çıkarılıp, deneysel sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Voigt (2003) çalışmasında daha önceki sonuçlara paralel olarak, $k-\omega$ modelinin kritik noktaların tespitinde daha iyi olduğu, $k-\epsilon$ modelinin ise türbülanslı bölgenin boyutlarını tespitinde yetersiz kaldığı bildirilmiştir. SST modeli ise bu çalışmada en büyük türbülans alanını vermiştir.



Şekil 2-1 Voigt ve ark. (2003) 'de kullanılan Annex 20 test odası modeli



Şekil 2-2 Ayrılma noktaları ve türbülans merkezi, Voigt ve ark. (2003)

Bu çalışmanın amacı, iki boyutlu IEA Annex 20 oda geometrisini ve akış şartlarını kullanarak oda içi hava ve sıcaklık dağılımlarının çeşitli türbülans modelleri için karşılaştırmasını yapmaktır. Bu amaçla hava dağılımları için Standard $k-\epsilon$ Modeli, RNG (Re-Normalized Group Turbulence Model) Modeli, GIR (Nonlinear Model of Girimaji), $k-\omega$ Modeli, SZL (Shi Zhum Lumley Turbulence Model) Modeli, Zero Equation Modeli, New $k-\epsilon$ Modeli, SST modeli türbülans modelleri; sıcaklık dağılımları ve ısı transferi için Standard $k-\epsilon$ Modeli, GIR Modeli, $k-\omega$ Modeli, RNG Modeli, SST Modeli, SZL Modeli türbülans modelleri kullanılmıştır. Analizler ANSYS-FLOTTRAN sonlu elemanlar kodu kullanılarak elde edilmiştir.

2.1 Isıl Konfor

Modern insan zamanının büyük bir bölümünü kapalı mekânlarda çalışarak, dinlenerek, eğlenerek ve uyuyarak geçirir. Bu nedenle kapalı mahallerde iyi bir havalandırma ve şartlandırma sistemine sahip olmak çok önemlidir. Bu sadece sağlık için değil, insanların çalışma performansları için de çok önemlidir.

Bir insanın sağlıklı ve üretken olabileceği ısı parametrelerin sağlanması ısı konfordur. ASHRAE standartlarında insanlar için gerekli ısı konfor şartları belirlenmiştir. Isıl konforu etkileyen faktörler kişisel faktörler ve iç ortama ait faktörler olarak ikiye ayrılabilir. Isıl konforu etkileyen iç ortama ait faktörler hava sıcaklığı, hava hızı, ışınım ve nem oranıdır.

Bir hava koşullandırma sisteminin amacı bir ortamdaki havayı istenilen nem ve sıcaklık sınırlarının içinde sabit tutmaktır. Isıtma, havalandırma ve soğutma (HVAC) endüstrisinde, kuru termometre sıcaklığı 20 - 27° C, bağıl nem %30 - %60, hava hızı 0,1 – 0,25 m/s ve mutlak hava nemi 11,5 g/kgkuru hava değerini aşmamalıdır. (Moulic ve Tripathi 2007). Bu yüzden ısı konforun sağlanması için hava koşullandırma sisteminin mahal içinde uygulanması ve oda hava dağılımlarının çıkartılması şarttır.

Mahal içinde bulunan bireylerin hissettiği rahatsızlık veya sıkıntı duygusunun başlıca nedenleri iç ortam havasının hızı ve mahal içindeki sıcaklık dağılımıdır.

Kapalı mahallerin insanlar tarafından kullanılan bölümlerinde hava hızı 0,25 m/s 'yi geçmemelidir. İnsan vücudu kendi çevresini saran ve dış ortamla olan ısı alışverişini sağlayan bir hava zırhına sahiptir. Bu ılık hava zırhı ancak çevre havası durgun olduğunda işlev görebilir. Hava hareketleri nedeniyle hava hızı yükseldiğinde bu yalıtım tabakası yırtılır ve insan vücudu çevre sıcaklığına karşı korumasız kalır. Bu durum özellikle soğutmada oldukça büyük rahatsızlık oluşturur.

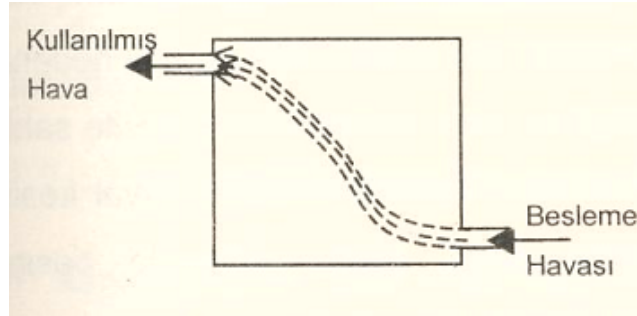
Bir mahallin insanlar tarafından kullanılan bölgesinin tüm noktalarında etkin sıcaklık her zaman izin verilen aralıklar içinde olmalıdır. Bunların yanı sıra mahaldeki

sıcaklık dağılımı da önemlidir. 3 °C' lik fark ISO 7730 tarafından oturarak yapılan aktiviteleri uygulayan bir insan için kabul edilebilir seviye olarak kabul edilmiştir.

2.1.1 Mahal içine hava besleme

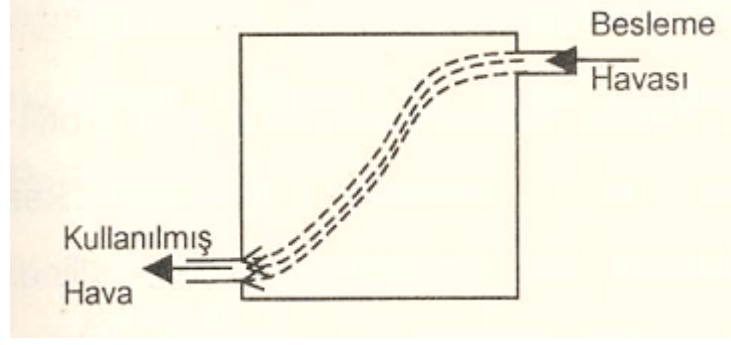
Bir havalandırma tesisinde uygun havalandırmanın sağlanabilmesi için (kullanılmış hava sıcaklığına göre) besleme havası ortam havasından daha soğuk olmalıdır. Tabii ki sıcak hava ile ısıtma hariçtir ve Faus kuralına göre besleme havası ortamdaki en fazla 3 – 4 °C soğuk olabilir. (Sivrioğlu ve Pırasacı, 2005).

Teorik olarak en uygun hava sevki, havanın yoğunluk farkı yüzünden hareket etmesi ile sağlanır. Şekil 2.3' te şematik olarak görülse de uygulamada kapılar ve mobilyalar giriş menfezlerinin önünü kapatarak, hava sirkülasyonuna izin vermezler. Mümkün olsa bile menfezlerden giren soğuk hava ortamdaki kişileri rahatsız eder.



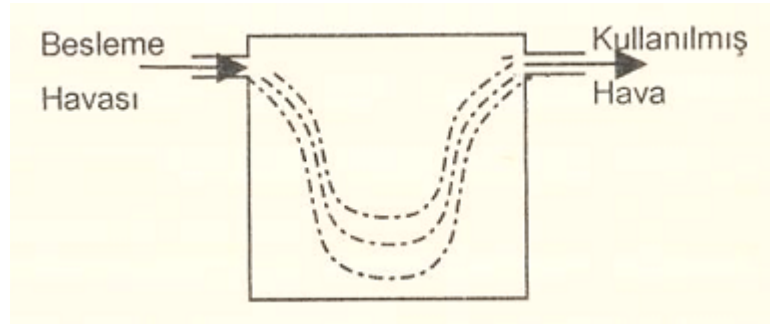
Şekil 2-3 Ortama hava sevki, besleme altta, emiş üstte (Pırasacı ve Sivrioğlu 2005).

Havanın yukarıdan verilip, alttan emilmesi halinde ise soğuk hava aşağıya çöker ve kullanılmış hava menfezlerden dışarı atılamaz. Bu durum Şekil 2.4' de görülebilir.



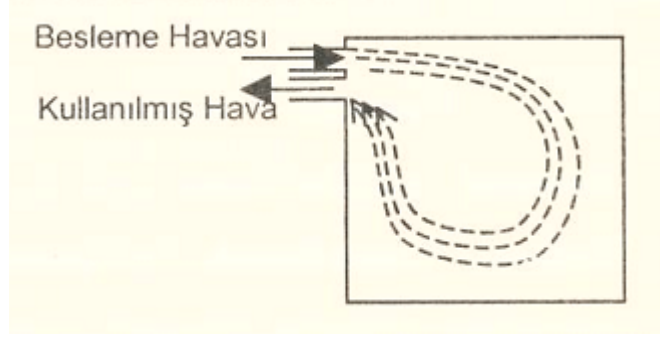
Şekil 2-4 Ortama hava sevki, besleme üstte, menfez altta (Pırasacı ve Sivrioğlu 2005).

En ideal hava besleme metodu Şekil 2.5’ de görüldüğü üzere soğuk havanın üstten üflenip, odanın diğer tarafından fakat üstten toplanmasıdır. Bu durumda soğuk besleme havası aşağı inerken ortam havası ile karışarak ısınır, ısınan kullanılmış hava ise odanın diğer tarafındaki menfezden atılır.



Şekil 2-5 Ortama hava sevki, ideal durum (Pırasacı ve Sivrioğlu 2005).

Yeterince uzun ve yüksek binalarda besleme havası yüksek hızla ortama verilmelidir. Sistem tasarlanırken menfez ve hava hızı seçimi mahalde yaşayan insanları rahatsız etmeyecek şekilde yapılmalıdır. Bu durumda aşağı çöken hava tekrar emme menfezlerinden çekilir. Şekil 2.6’ da görülebilecek uygulamalar bu metotlardır. Bu tip uygulamalar kanal boyları kısa olmasını da mümkün kılar.



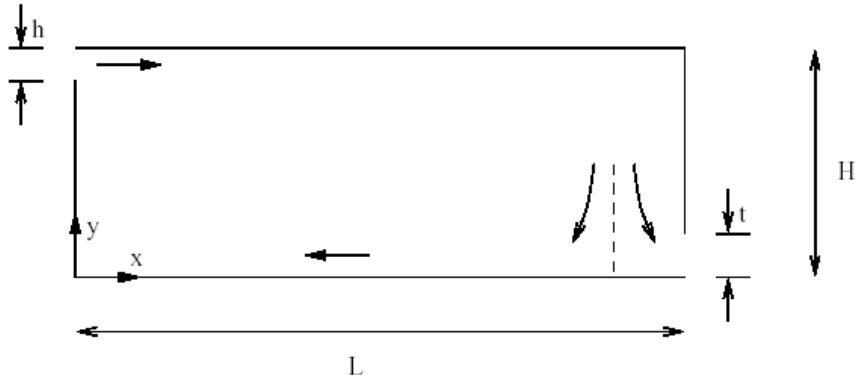
Şekil 2-6 Ortama hava sevki, Aynı noktadan besleme ve emiş (Pirasacı ve Sivrioğlu 2005).

3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Test odası şartları

Çalışmada 2 boyutlu Annex 20 test odası simüle edilmiştir sonuçlar mevcut deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Test odası hem eşsıcaklı akış, hem de eşsıcaklı olmayan akışın analizinde kullanılmıştır. Şekil 3.1’ de gösterildiği üzere hava sol üst köşeden odaya üflenmekte ve sağ alt köşeden çıkmaktadır.



Şekil 3-1 2 Boyutlu Annex 20 test odası şematik gösterimi

Test odası geometrisi literatürde boyutsuz oranlar ile verilmiştir. Bu oranlar; $L/H=3$, $h/H=0.056$, $t/H=0,16$ olarak belirlenmiştir. Burada “L” odanın uzunluğunu, “h” giriş kanalı yüksekliğini, “t” çıkış kanalı yüksekliğini, “H” oda yüksekliğini göstermektedir. Buna göre Şekil 3.1’ de verilen ölçülerin değerleri aşağıda belirtildiği gibidir (Voigt 2000);

$$H = 3,0 \text{ m} ; \quad L = 9,0 \text{ m} ; \quad h = 0,168 \text{ m} \text{ ve } t = 0,48 \text{ m} \quad (3.1)$$

Modellemede akışkan olarak hava kullanılmıştır. Girişte 20 °C ‘de akışkanın termofiziksel özellikleri aşağıdaki gibi alınmıştır (Kılıç ve Yiğit 2000) :

$$\begin{aligned} \text{Yoğunluk } (\rho) &= 1,205 \text{ kg/m}^3 \text{ (Air SI)} \\ \text{Kinematik viskozite } (\nu) &= 1,53 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s (Air SI)} \end{aligned}$$

Havanın giriş hızı

$$U_0 = 0,455 \text{ m/s} \quad (3.2)$$

alınmıştır. Ayrıca hızlardaki hesaplamalarda giriş ve çıkış etkilerini önlemek için giriş ve çıkışlara düz kanal geometrileri eklenmiştir. Kanal yükseklikleri, giriş ve çıkış yüksekliği ile eşit, uzunluklar ise 1 m alınmıştır.

3.1.1.1 Eşsıcaklıklı (isothermal) test odası şartları

Bu modelde giriş sıcaklığı 20 °C alınmış ve oda duvarları adyabatik kabul edilmiştir. Dolayısıyla mahal havası sıcaklığı 20 °C’ dir. Havanın giriş hızı

$$U_0 = 0,455 \text{ m/s}$$

ve kinematik viskozite $\nu = 15,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ alınırsa girişteki Reynolds sayısı:

$$\text{Re}_h = \frac{hU_0}{\nu} = 5000 \text{ bulunur.} \quad (3.3)$$

Modelleme için türbülans uzunluk ölçeği Nielsen (1990) ‘in yaptığı çalışmaya göre aşağıdaki gibi alıyoruz; (Turbulent length scale)

$$l_0 = \frac{h}{10} = 0,0168 \text{ m} \quad (3.4)$$

Giriş türbülans şiddeti (Inlet turbulence intensity)

$$Tu \equiv \frac{\sqrt{u_i'^2}}{u_0} = \%4 \quad (3.5)$$

alınmıştır. Bu değerlere göre türbülans kinetik enerjisi;

$$k_0 = \frac{3}{2} (0,04 * u_0)^2 \approx 4,97 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (3.6)$$

ve türbülans yayılım şiddeti aşağıdaki gibi alınmıştır;

$$\epsilon_0 = \frac{k_0^{1,5}}{l_0} \approx 6,60 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3 \quad (3.7)$$

Modelde hız dağılımları, dikey yönde $x_1 = 3,0 \text{ m}$ ve $x_2 = 6,0 \text{ m}$ 'de ve yatay yönde $y_1 = 0,084 \text{ m}$ ve $y_2 = 2,916 \text{ m}$ 'de, Nielsen (1979) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırma için elde edilmiştir.

3.1.1.2 Eşsıcaklıklı olmayan (non-isothermal) test odası şartları

Bu çalışmada eşsıcaklıklı test odası şartlarına ilave olarak, taban boyunca sabit ısı akışı eklenmiştir. Çalışmadaki amaç kaldırma kuvvetinin akışa olan etkisini görmektir. Çalışmadaki kritik faktör, Arşimet sayısının etkisidir. Arşimet sayısı Denklem 3.8 ile ifade edilir.

$$Ar = \frac{g \theta h}{T (u_o^2)} \quad (3.8)$$

Burada :

- g - Yerçekimi İvmesi (m/s^2)
- θ - Giriş Ve Çıkış Hava Sıcaklık Farkı ($^{\circ}\text{C}$)
- h - Giriş yüksekliği (m)

T	-	Sıcaklık (K)
U	-	Hız (m/s)

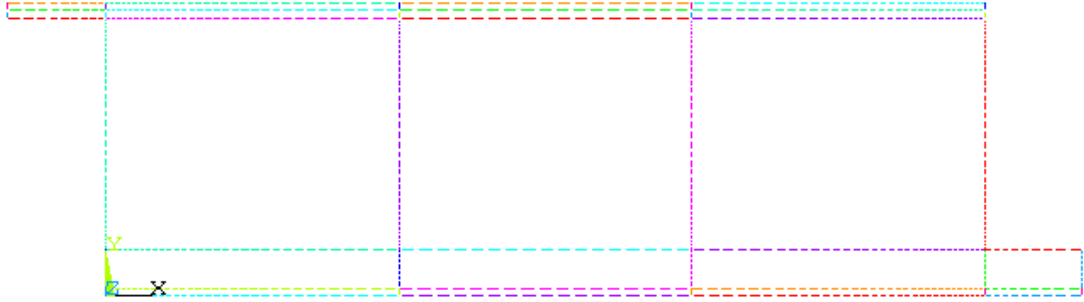
Eşsıcaklıklı olmayan test odasında, taban boyunca sabit ısı akısı Lemaire' (1991) in çalışmasıyla karşılaştırmak için

$$q = 72,90 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.9)$$

olarak alınmıştır.

3.1.2 Model geometrisi oluşturulması

Bölüm 3.1' de verilen geometrik şartlara uygun olarak Şekil 3.2 'de gösterilen model oluşturulmuştur. Giriş çıkış etkilerini önlemek için giriş ve çıkışlara düz kanal geometrileri eklenmiştir. Kanal yükseklikleri, giriş ve çıkış yüksekliği ile eşit, uzunluklar ise 1 m alınmıştır (Voigt 2003). Model oluşturulduktan sonra çözüm için modelin ağ yapısına bölünmesine başlanmıştır.



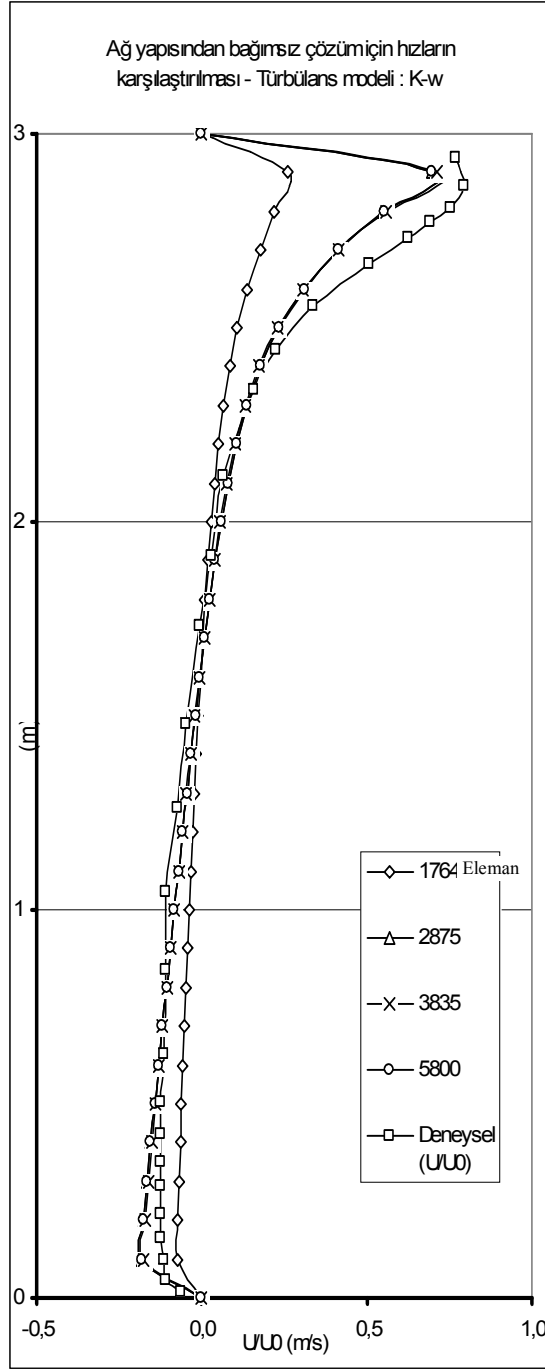
Şekil 3-2 Sayısal çözüm için oluşturulan Annex 20 odası modeli

3.1.3 Bağımsız ağ yapısına ulaşmak için hıza bağlı deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar

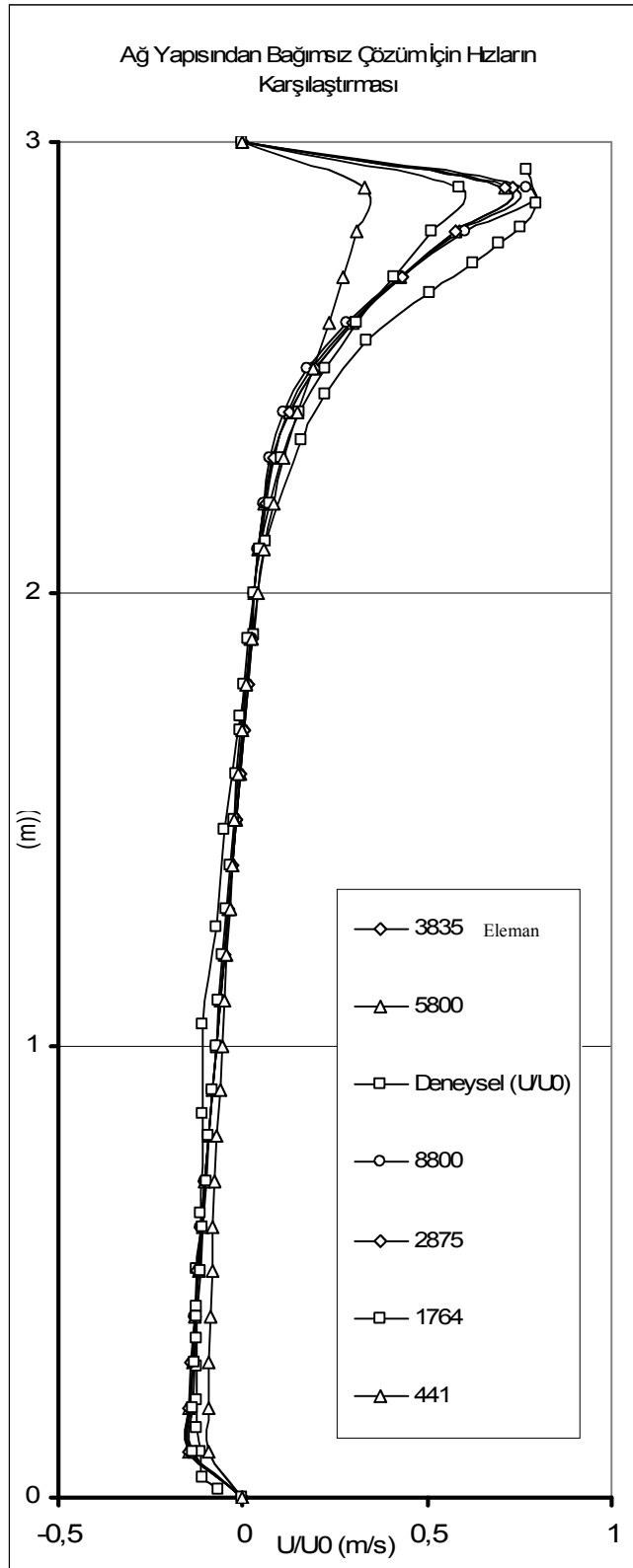
Modelde ağ yapısı oluşturulurken, literatürdeki çalışmalarda görülen problemlilerde daha sık yapı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunun için giriş, çıkış ve muhtemel türbülans bölgelerinde daha sık ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ sayısından

bağımsız çözüme ulaşmak için, Standart K- ϵ türbülans modeli ve K- ω türbülans modellerinde, hız ve y^+ karşılaştırmaları yapılmıştır. Şekil 3.3' te Standart K- ω türbülans modelinde hızın x bileşinin (u) deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 3.4' te Standart K- ϵ türbülans modelinde x yönünde hız değerlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 3.3 ve şekil 3.4' de görüldüğü üzere 2875, 3835, 5800 ve 8800 ağ yapılı çözümlerdeki hız değerleri değişmemekte ve dolayısıyla 2875 ağ sayısı hız'a göre bağımsız çözüme ulaştırmaktadır.

Ağ sayısından bağımsız çözüme ulaşmak için Şekil 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 'de y^+ 'a göre ağ yapılarının karşılaştırılması görülmektedir. Grafiklerde sadece hıza göre bağımsız çözümlere ulaştıran ağ yapıları ele alınmıştır. Bunlar 2875, 3835, 5800 ve 8800 ağ yapılı çözümlerdir. Grafikler yorumlandığında 2875 ağ sayısı ve 5800 ağ sayısının modelin çözümünde kullanılabileceği görülmektedir.



Şekil 3-3 X=3 m' de K- ω türbülans modeli için ağ sayısından bağımsız çözüm için hızın x bileşeninin karşılaştırılması.



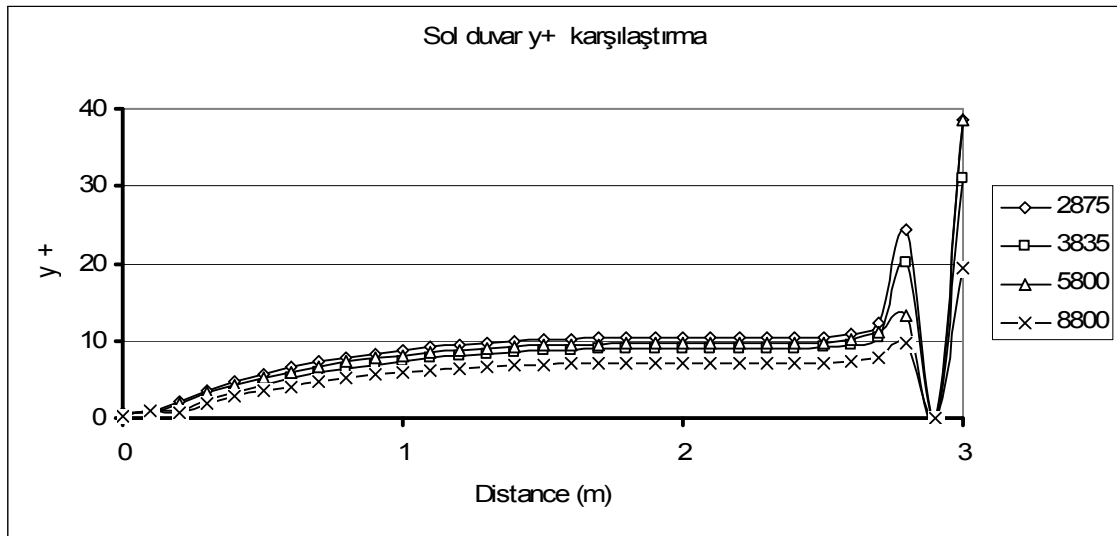
Şekil 3-4 $X=3$ m' de K- ω türbülans modeli için ağ sayısından bağımsız çözüm için hızın x bileşeninin karşılaştırılması.

3.1.4 Cidara olan boyutsuz uzaklık ile ağ yapısı belirlenmesi.

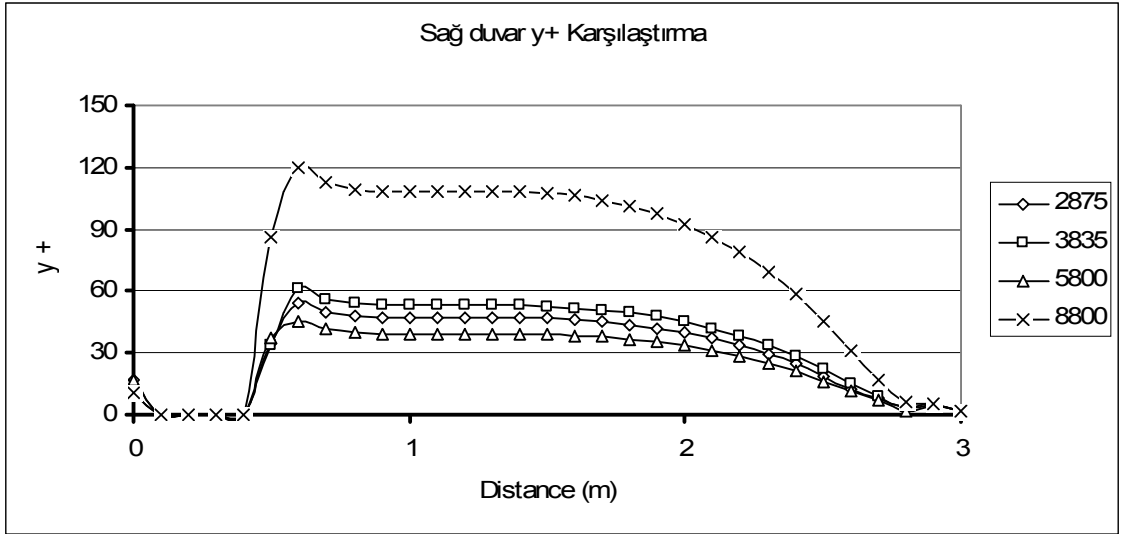
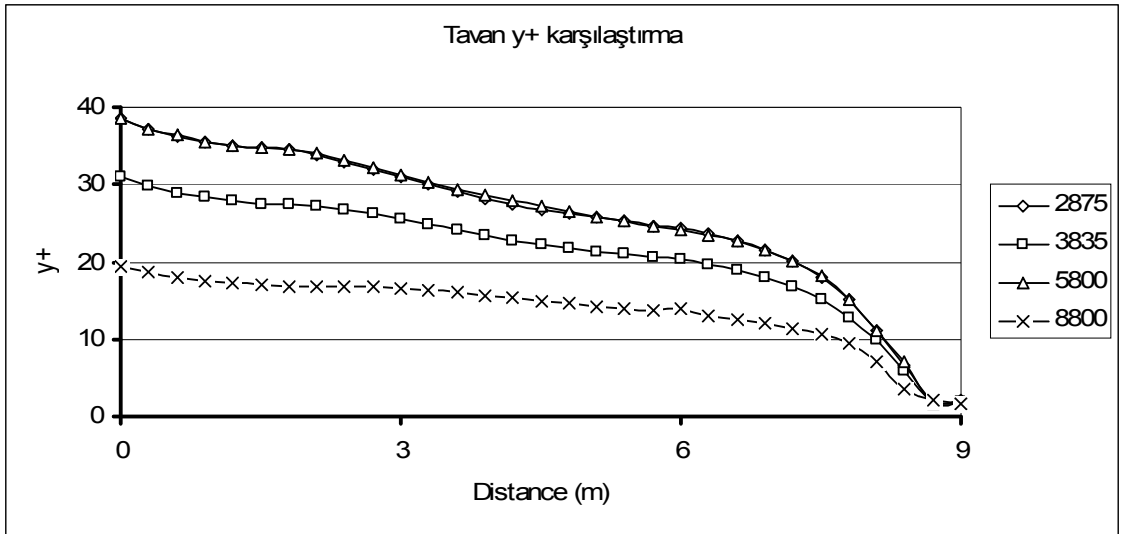
Cidara olan ölçsüz uzaklık y^+ , duvar kenarlarındaki ağ yapısının gelişimi için en önemli parametrelerden biridir. y^+ aşağıda verilen (Denklem 2.10) formül ile hesaplanır.

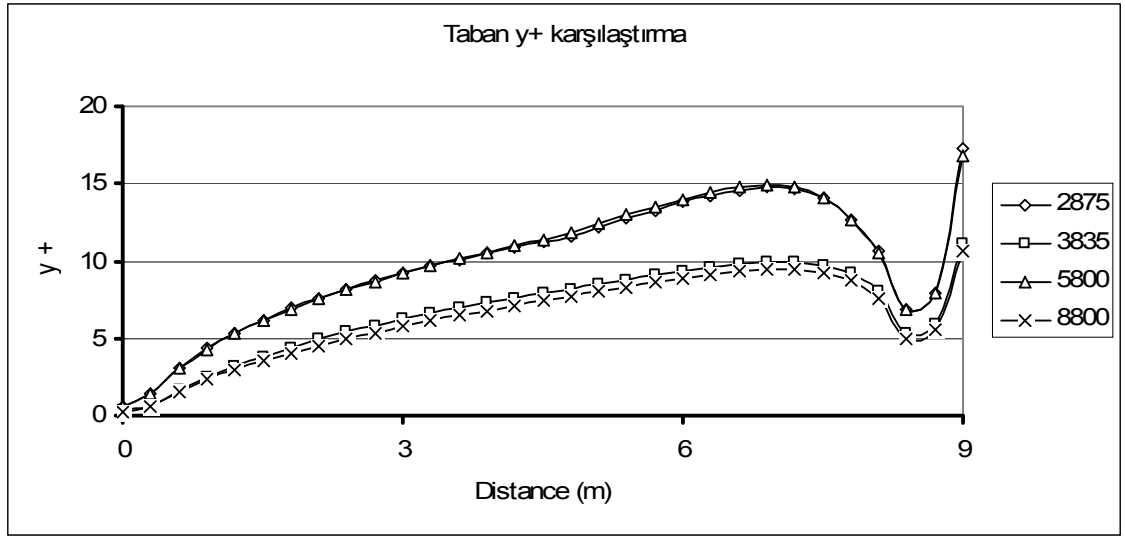
$$y^+ = \frac{u_T \Delta y}{\nu} \quad (3.10)$$

Düşük Reynolds sayılı türbülans modellerinde y^+ 1' den küçük tutulmalıdır. Bu çalışmadaki gibi yüksek-Reynolds sayılı türbülans modellerinde ise $30 < y^+ < 100$ arasında olmalıdır (Voigt 2000). Bu kurala göre tüm duvarlardaki y^+ lar grafik olarak çıkarılmıştır. Grafikler yorumlanırsa; Şekil 3.5' de, sol duvarda tüm modeller başarısız olmuştur. y^+ e göre seçilebilecek en iyi modeller ise 2875, 3835 v 5800 ağ sayısına sahip modellerdir. Şekil 3.6' ya göre, sağ duvarda 2875, 3835 ve 5800 ağ sayısına sahip modeller seçilebilir. 8800 ağ sayısına sahip modelde ise $y^+ > 100$ olduğundan kullanılmaması daha iyidir. Şekil 3.7, tavanda ve şekil 3.8 tabana göre 2875 ve 5800 ağ sayılı modellerin seçilmeli uygunudur. Sıralamada eleman sayısından ziyade cidara yakınlık önemlidir. y^+ karşılaştırmalarına göre 2875 ve 5800 ağ sayılı modellerin çözüm için kullanılmasında sakınca yoktur.



Şekil 3-5 Sol duvar y^+ karşılaştırması

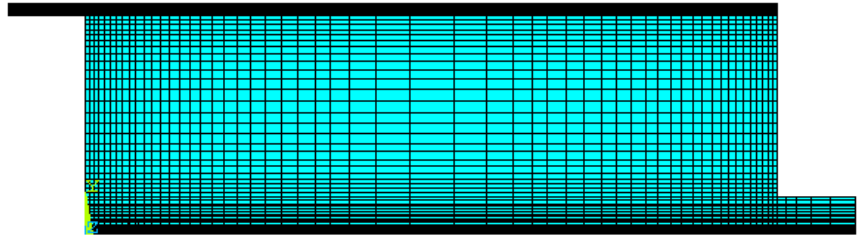
Şekil 3-6 Sağ duvar y^+ karşılaştırmaŞekil 3-7 Tavan y^+ karşılaştırma



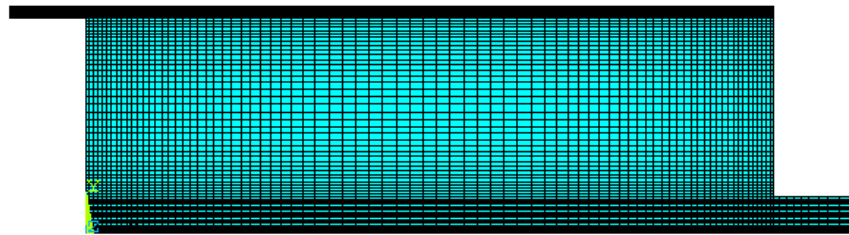
Şekil 3-8 Taban y+ karşılaştırma

3.1.5 Ağ yapılarının oluşturulması

Hız karşılaştırmaları ve y^+ hesaplamasından çıkan sonuçlara göre çalışmada eşsıcaklıklı test modellemesinde 2875 ağ yapılı model kullanılmıştır. Şekil 3.9 'da bu model görülebilir. Eşsıcaklıklı olmayan test modellemesinde 5800 ağ yapılı model kullanılmıştır. Şekil 3.10 'da bu model görülebilir.



Şekil 3-9 2875 ağ sayılı model



Şekil 3-10 5800 ağ sayılı model

3.1.6 Sınır şartların belirlenmesi

Geometri ve ağ yapısı oluşturulduktan sonra sınır şartları belirlenmiştir. Her iki modelde de tüm duvarlara 0 (sıfır) hız verilmiştir;

$$V_x=V_y=0 \quad (3.11)$$

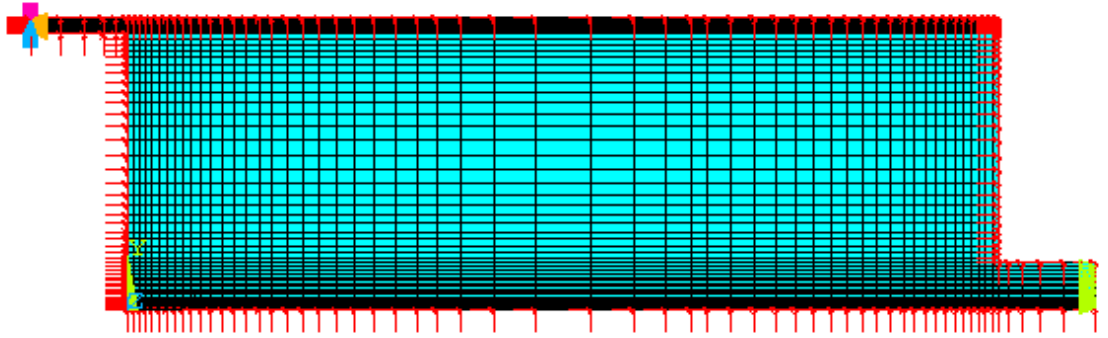
Sağ alt bölgedeki çıkışa basınç değeri 0 Pa girilmiştir.

$$P=0 \text{ Pa} \quad (3.12)$$

Tüm çözümlerde yerçekimi kuvveti (g) hesaba katılmıştır.

3.1.7 Eşsıcaklıklı test odasına ait sınır şartlarının belirlenmesi

Eşsıcaklıklı test odası modelinde duvarlara sıfır hız girilmiş ve adyabetik kabul edilmiştir. Çıkışa sıfır basınç verilmiştir. Girişe ise önceki bölümlerde değerleri verilen hız, sıcaklık ve türbülans değerleri verilerek çözüme gidilmiştir. Genel görünüm şekil 3.12' de görülmektedir.



Şekil 3-11 Eşsıcaklıklı Test Odası

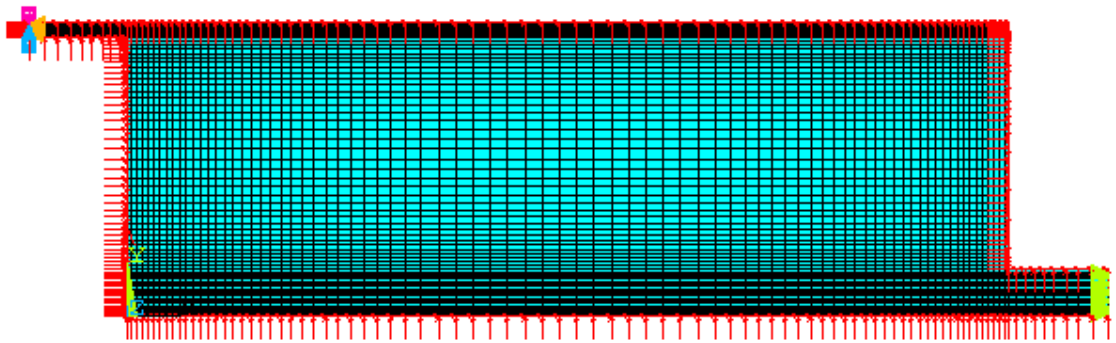
Çözüm yapılırken 8 tip türbülans modeli karşılaştırılmıştır. Bu modeller tablo 3.1' de görülebilir;

Tablo 3.1 Çözümlerde karşılaştırılan türbülans modelleri

No:	Türbülans modeli
1.	Standard k- ϵ Model
2.	Re-normalized Group Turbulence Model (RNG)
3.	Nonlinear Model of Girimaji (GIR).
4.	k- ω Turbulence Model
5.	Shi Zhum Lumley Turbulence Model
6.	Zero Equation Turbulence Model
7.	New k- ϵ Model
8.	Shear-Stress Transport Turbulence Model (SST)

3.1.8 Eşsıcaklıklı olmayan test odasına ait sınır şartlarının belirlenmesi

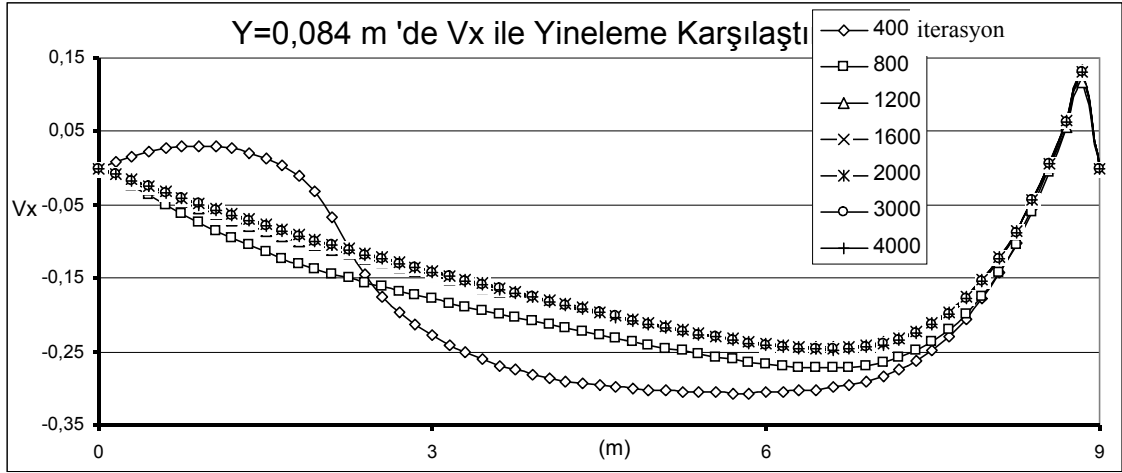
Eşsıcaklıklı olmayan test odası modelinde de duvarlara sıfır hız girilmiş ve adyabetik kabul edilmiştir. Çıkışa sıfır basınç verilmiştir. Girişe ise önceki bölümlerde değerleri verilen hız, sıcaklık ve türbülans değerleri verilerek çözüme gidilmiştir. Ek olarak bu çözümde taban boyunca ısı akısı verilmiştir. Genel görünüm şekil 3.13 'de görülmektedir. Çözüm yapılırken 6 tip türbülans modeli karşılaştırılmıştır. Bu modeller tablo 3-1 'de verilen modellerdir.



Şekil 3-12 Eşsıcaklıklı olmayan test odası

3.1.9 Yineleme (iterasyon) sayısının belirlenmesi

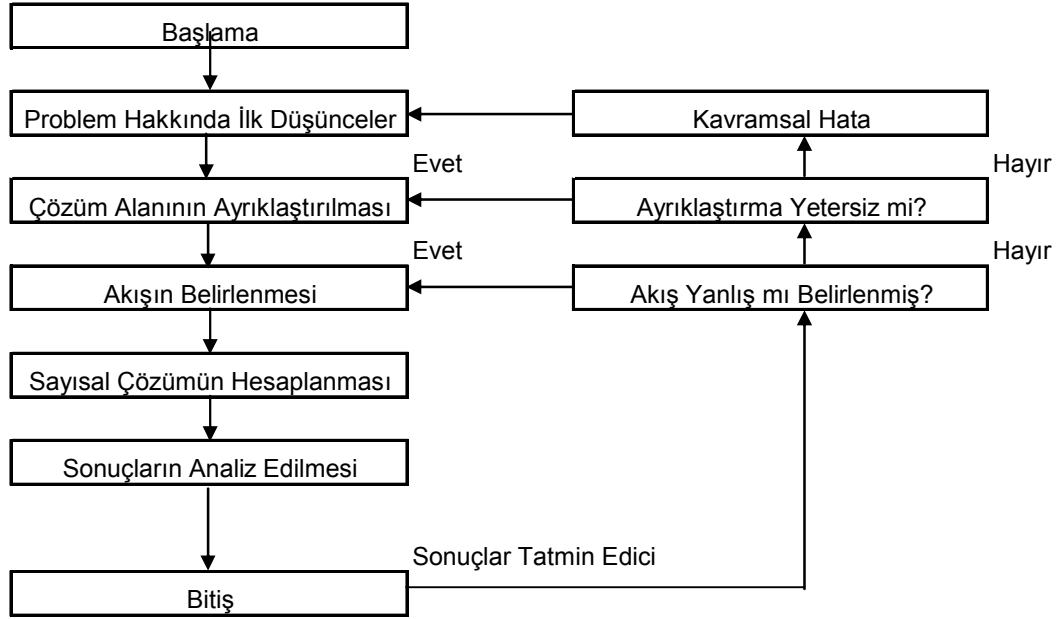
Çözüm için model geometrisi, ağ yapısı ve sınır şartları belirlendikten sonra yineleme sayısı belirlenmesi yapılmıştır. Yineleme sayısından bağımsız çözüme ulaşmak için, $y=0,084$ metredeki x yönündeki hızlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.11 'de görüleceği üzere 1600 yineleme ve sonrasında hız değerlerinde değişiklik görülmemiştir. Bu yüzden tüm çözümler 1600 yineleme ile yapılmıştır.



Şekil 3-13 Yinelemeden bağımsız çözüm için hızların karşılaştırılması

3.2 Yöntem

Bu çalışmada oda içi hava akış ve ısı analizini Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) teknolojisi (Computed Fluid Dynamics (CFD) Technology) kullanılarak analiz edilmiştir. Bilgisayar destekli analiz metodunun aşamaları Şekil 3.14' de gösterilmiştir.



Şekil 3-14 Bilgisayar destekli analiz metodunun aşamaları (Pulat 1997)

Bu çalışmada oda içi hava akış ve ısı analizini ANSYS-FLOTTRAN sonlu elemanlar kodu kullanılarak yapılmıştır. Bu kod da diğer bütün yazılım paketleri gibi Şekil 3.14' deki analiz işleminin ilk üç adımını kapsayan bir ön-işlemci, ayrıştırılmış denklemin çözüldüğü bir çözücü ve sonuçların değerlendirildiği bir son-işlemciden oluşmaktadır. Yazılım paketlerinin sanayide ve araştırma kurumlarında yaygınlaşmasının en önemli nedenlerinin başında da ayrıştırma işleminin ve geri beslemeli olarak modifiye edilmesinin çok kolay olması ve son-işlemcinin sonucu görsel hale getirilmesindeki gücü ve böylece sonuçların daha kolay değerlendirilmesidir.

3.2.1 Korunum Denklemleri ve Türbülans Modelleri

Bu çalışmada akışın türbülanslı, iki boyutlu, sıkıştırılmaz ve sürekli rejimde olduğu kabul edilmiştir. ANSYS-FLOTTRAN kodu türbülans modellemesinde Eddy viskozitesi yaklaşımıyla, değişkenlerin ortalama değeriyle salınım değerlerinin toplamı olarak göz önüne alındığı Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemlerini kullanmaktadır. Bu yaklaşımda hız bileşenleri aşağıdaki gibi ortalama değerleriyle salınım değerlerinin (çalkantı) toplamı şeklinde ifade edilirler.

$$u = \bar{u} + u' , \quad v = \bar{v} + v' \quad (3.13)$$

Tanımlanan hız ifadelerinin Navier-Stokes denklemlerine uygulanması sonunda ilave olarak ortaya Reynolds gerilme terimlerini veren eşitlikler çıkmaktadır.

$$\sigma_x^R = -\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\rho u' u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{\rho u' v'}) \quad (3.14)$$

$$\sigma_y^R = -\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\rho v' u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{\rho v' v'}) \quad (3.15)$$

Bu Reynolds gerilmeleri türbülans viskozitesi adı verilen bilinmeyen bir katsayıyla ifade edilebilir (Boussinesq hipotezi, Launder ve Spalding 1972).

$$-\overline{\rho u' v'} = \mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.16)$$

Reynolds gerilmeleri daha karmaşık formda da ifade edilebilirler. Türbülanslı, iki boyutlu, sıkıştırılamaz ve sürekli rejimdeki akışı ifade eden süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibidir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial(\overline{\rho u})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v})}{\partial y} = 0 \quad (3.17)$$

x-Momentum:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial(\overline{\rho u u})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v u})}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

y-Momentum:

$$\left(\frac{\partial(\overline{\rho uv})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v v})}{\partial y} \right) = \rho \cdot g - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \quad (3.19)$$

Enerji:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{\rho u} C_p \bar{T} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{\rho v} C_p \bar{T} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left((k_i + k_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((k_i + k_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) \quad (3.20)$$

Belirtilen denklemlerde k_t ve μ_t ; türbülanslı Eddy iletkenliği ve türbülanslı Eddy viskozitesidir.

Bu çalışmada korunum denklemleri farklı türbülans modelleri kullanılarak sonlu elemanlar esasına dayalı olan ANSYS-FLOTTRAN kodu yardımıyla incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aşağıda kullanılan türbülans modelleri kısaca açıklanmıştır.

3.2.2 Standart k-ε Modeli

Standart k - ε modelinde türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun yayılma hızı (ε) olmak üzere türbülans viskozitesi şu şekilde ifade edilir.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.21)$$

Mühendislik uygulamalarında en yaygın model olan standart k - ε türbülans modelinde iki boyutlu daimi akış için türbülans kinetik enerjisi ve onun yayılma hızı denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Launder ve diğ., 1974).

$$\frac{\partial \bar{\rho u} k}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho v} k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_t} \left(g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho u} \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho v} \varepsilon}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ & + \frac{C_\mu (1 - C_3) \beta \rho k}{\sigma_t} \left(g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Burada türbülans kinetik enerji üretimi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \quad (3.24)$$

Diğer türbülans model sabitleri ise $C_\mu=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_3=1.0$, $C_4=0.0$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.30$ ve $\sigma_t=0.90$ şeklindedir.

Yukarıdaki eşitlikler standart k-ε ve diğer türbülans modellerinin temel denklemleridir. Fakat modeller ya C_μ terimi ya da yayılma hızı denkleminde bulunan terimlerindeki farklılıklar nedeni ile birbirlerinden ayrılırlar. Diğer türbülans modellerinde kullanılan simetrik deformasyon tensörü S_{ij} ve simetrik olmayan rotasyon tensörü W_{ij} hız bileşeni V_k cinsinden aşağıda ifade edilmiştir.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (V_{ij} + V_{ji}) \quad (3.25)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} (V_{ij} - V_{ji}) + C_r \Omega_m \varepsilon_{mij} \quad (3.26)$$

Bu terimlerin kullanıldığı iki yeni değişken şöyledir.

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.27)$$

$$\zeta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2W_{ij}W_{ij}} \quad (3.28)$$

3.2.3 RNG k-ε Türbülans Modeli

Re-Normalized Group Turbulence Model olarak bilinen bu modelde $C_{1\varepsilon}$ katsayısı, standart k - ε modelindeki (C_1) aksine sabit değildir.

$$C_{1\varepsilon} = 1.42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_\infty}\right)}{1 + \beta\eta^3} \quad (3.29)$$

RNG k - ε türbülans model sabitleri $C_\mu=0.085$, $C_2=1.68$, $C_3=0.0$, $C_4=0.0$, $\sigma_k=0.72$, $\sigma_\varepsilon=0.72$, $\sigma_t=0.90$, $\beta = 0.012$ ve $\eta_\infty=4.38$ şeklindedir. Bu model hakkında daha fazla detaylar Yakhot ve Orszag (1986) da bulunabilir.

3.2.4 k - ω ve SST Türbülans Modelleri

Bu modellerde türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun özgül yayılma hızı (ω) tanımlanmaktadır. Bu modellere göre türbülans viskozitesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (3.30)$$

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.31)$$

k - ω türbülans modelinde iki boyutlu daimi akış için türbülans kinetik enerjisi denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} u k}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu_t \Phi - C_\mu \rho k \omega \\ + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_k} \left(g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.32)$$

ve türbülans kinetik enerji özgül yayılma hızı denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} u \omega}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v \omega}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \gamma \rho \Phi - \beta' \rho \omega^2 \\ + \frac{(1-C_3) \beta \rho}{\sigma_t} \left(g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Wilcox ve diğ., 1988). Cidara yakın bölgelerde $k-\omega$ türbülans modelinin diğer modellere göre avantajları söz konusudur. $\sigma_k=2.0$, $\sigma_\omega=2.0$, $\gamma=0.555$ ve $\beta'=0.075$ $k-\omega$ model sabitleridir.

SST türbülans modeli $k-\omega$ ve $k-\varepsilon$ modellerinin avantajlarını birleştirmiştir. SST türbülans modelinde (2.33 denkleminde) yer alan $P_t = \mu_t \Phi$ terimi yerine $P_t = \min(\mu_t \Phi, C_{lim} \varepsilon)$ terimi kullanılmaktadır. Ayrıca bu modelde türbülans kinetik enerji özgül yayılma hızı denkleminde fazladan $\frac{(1-F_1)2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega} \left[\frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right]$ terimi bulunmaktadır. Burada F_1 karışım fonksiyonu olup bu değer duvara yakın bölgelerde 1, uzak bölgelerde 0 olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyon sayesinde SST türbülans modeli duvara yakın bölgelerde $k-\omega$ ve duvardan uzak bölgelerde $k-\varepsilon$ modeli gibi davranmakta, model katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2 \quad (3.34)$$

Burada ϕ_1 ve ϕ_2 terimleri sırasıyla $k-\omega$ ve $k-\varepsilon$ model katsayılarıdır ve bunlar sırasıyla $C_{\text{limt}}=10^{15}$, $k-\omega$ için $\sigma_k=1.176$, $\sigma_\omega=2.0$, $\gamma=0.5532$ ve $\beta'=0.075$, $k-\varepsilon$ için $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\omega=1.168$, $\gamma=0.4403$ ve $\beta'=0.0828$ şeklindedir. Bu model hakkında daha ayrıntılı bilgi için Menter (1994)'e başvurulmalıdır.

Yakın-cidarda HAD uygulamalarında popüler olan ve ANSYS-FLOTRAN' da da kullanılan duvar fonksiyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Üç farklı duvar fonksiyonu yaklaşımı vardır ve bunlar sırasıyla Spalding, Van Driest ve Equilibrium yaklaşımlarıdır. Bu çalışmada eşsıcaklıklı türbülans modellerinde Van Driest, eşsıcaklıklı olmayan türbülans modellerinde Equilibrium yaklaşımı kullanılmıştır.

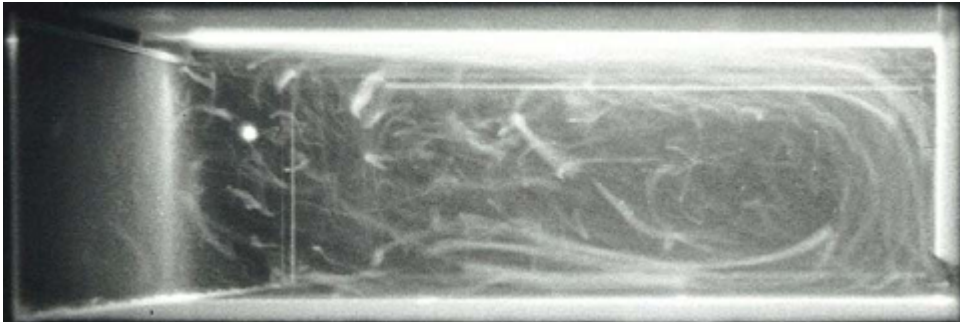
4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1 Eşsıcaklıklı Test Modeli Sonuçları

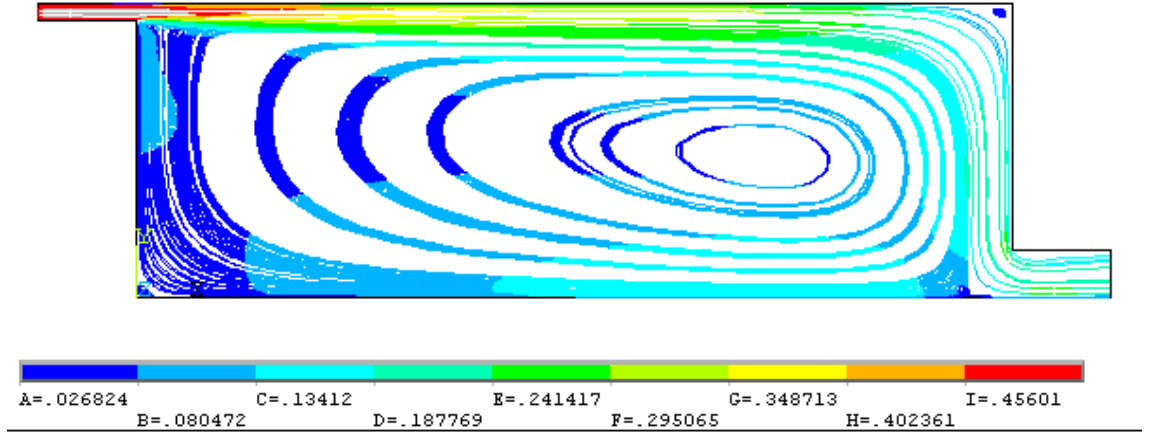
Bölüm 3.1 'de Eşsıcaklıklı Annex 20 test odasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tüm türbülans modeli karşılaştırmalarında yer çekimi ivmesi hesaba katılmış, akışkanın termodinamik özellikleri değişebilir verilmiş ve çözümler bu şekilde elde edilmiştir. Tüm çözümler 1600 yineleme ile elde edilmiştir. Ağ yapısı Standart K- ϵ , Girimaji, K- ω , New K- ϵ , SST, Zero Equation ve RNG türbülans modellerinde 2875 ağ yapısı ile çözüm elde edilmiştir.

4.1.1 Akım çizgileri ile türbülans modelleri karşılaştırılması

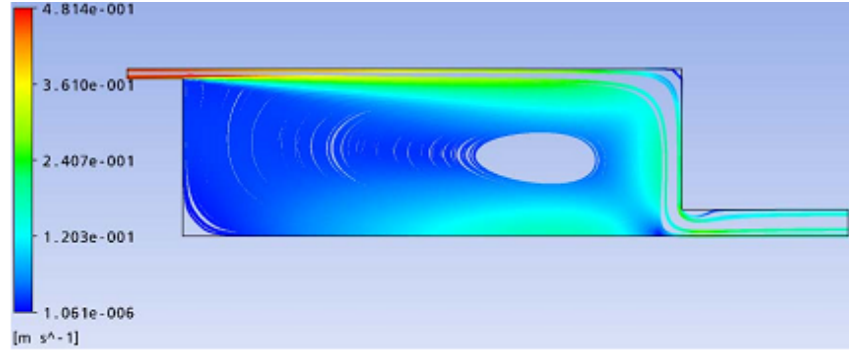
Bu bölümde literatürdeki ve bu çalışmadan elde edilen farklı türbülans modellerine ait akım çizgileri verilmekte ve karşılaştırılmaktadır. Şekil 4.1 – Şekil 4.15 'de literatürdeki ve bu çalışmadaki akım çizgileri verilmiştir.



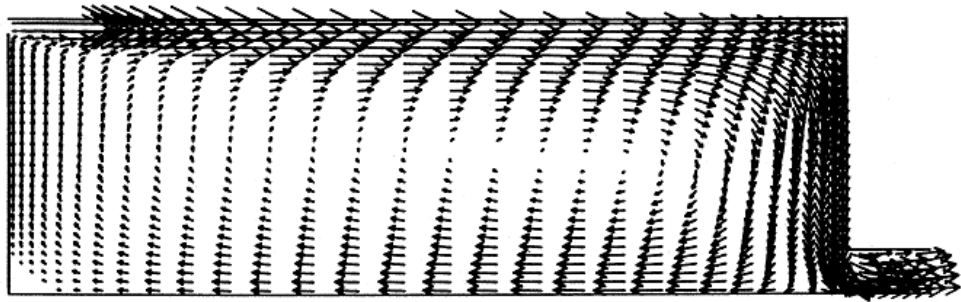
Şekil 4-1 Akış iplikleri gerçek görüntüsü Nielsen (1974) yılındaki deneysel çalışma



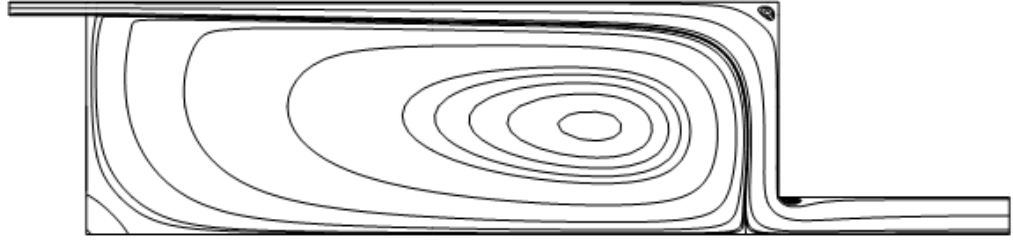
Şekil 4-2 Standart K- ϵ Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)



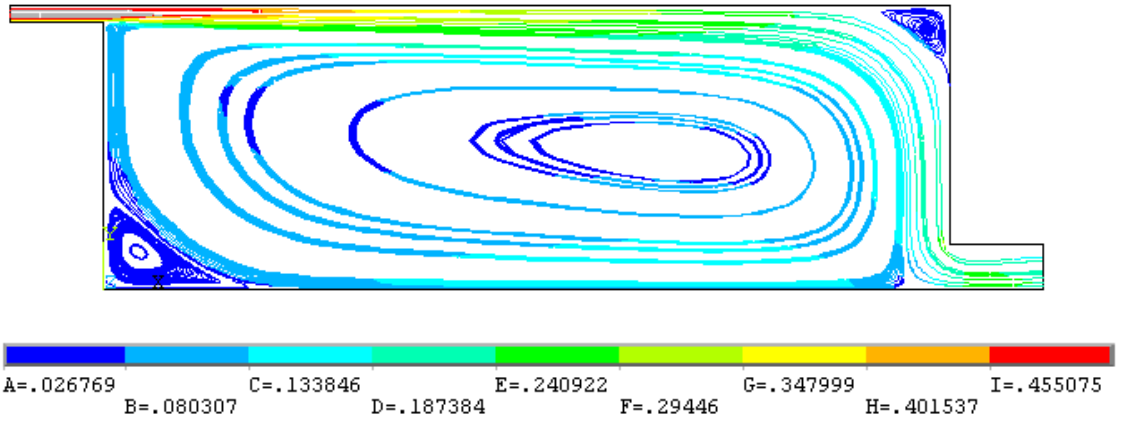
Şekil 4-3 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Akım Çizgileri, (Rong ve Nielsen 2008)



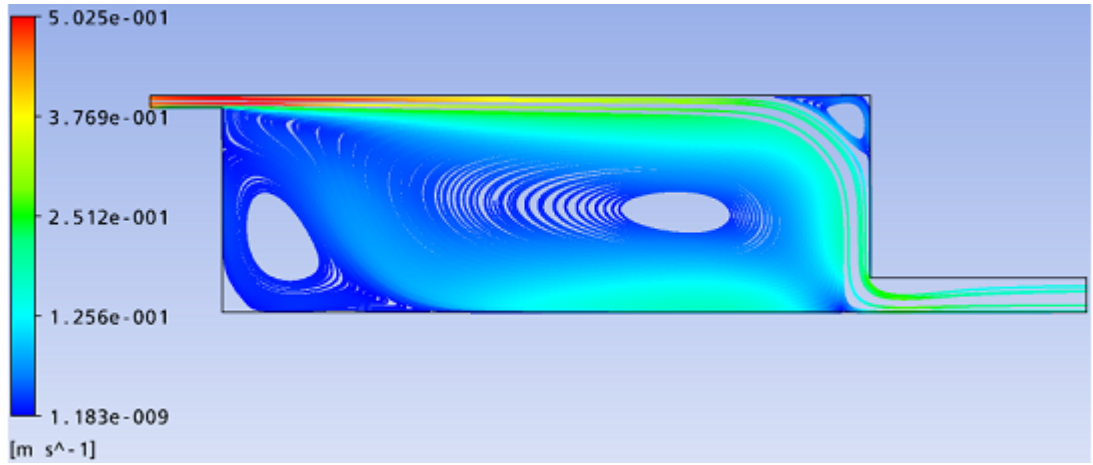
Şekil 4-4 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Lemaire 1991)



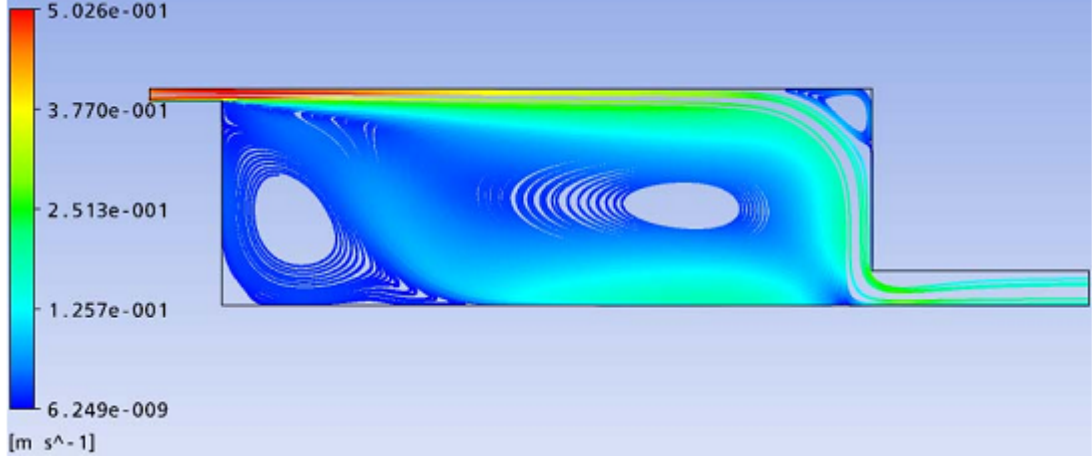
Şekil 4-5 Standart K- ϵ ve K- ω Türbülans Modeli Akım Çizgileri Genel Görüntüsü (Voigt 2000)



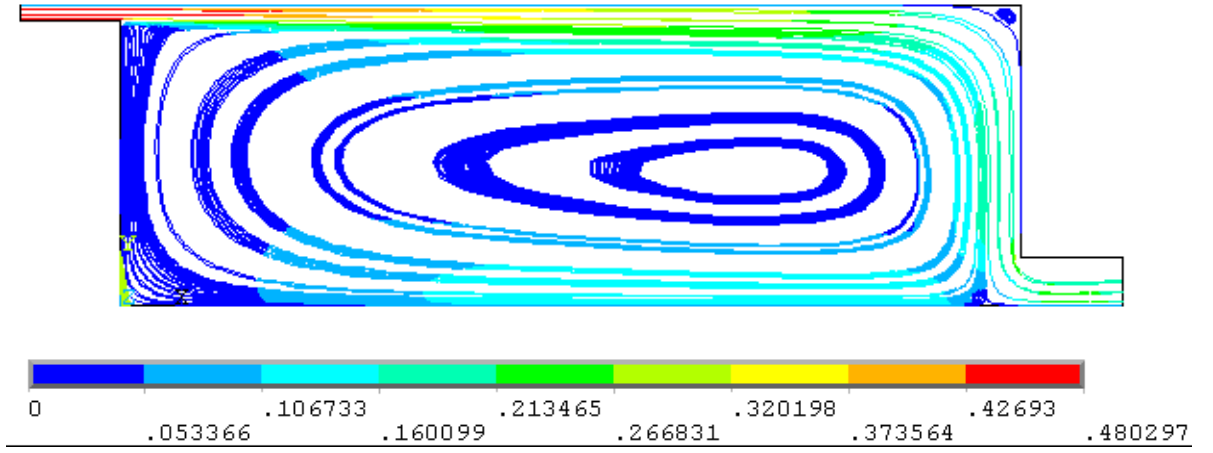
Şekil 4-6 Standart K- ω Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)



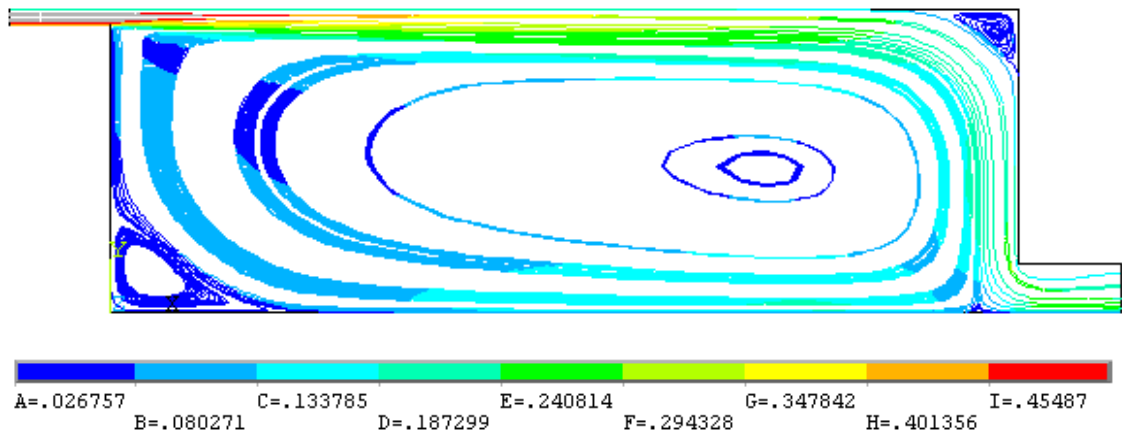
Şekil 4-7 Standart K- ω (Wilcox) Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Rong ve Nielsen, 2008)



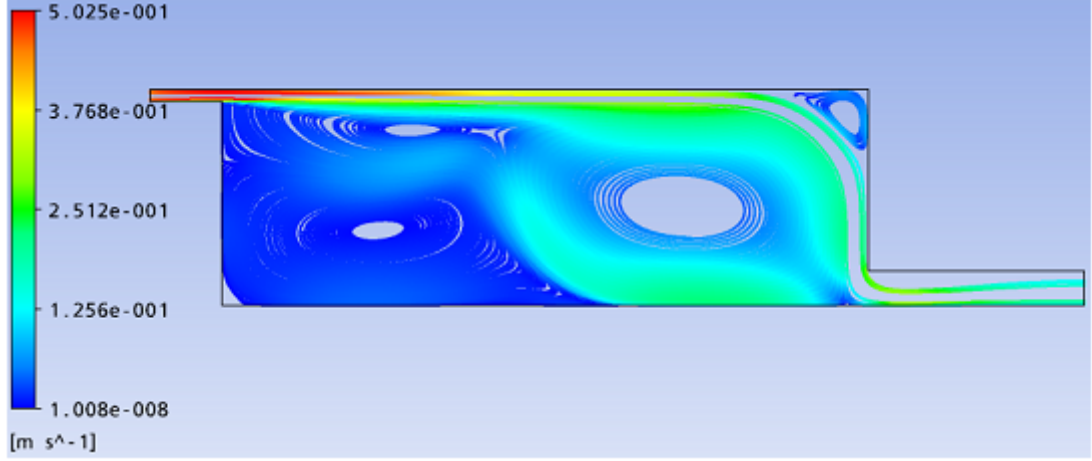
Şekil 4-8 K- ω BSL Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Rong ve Nielsen)



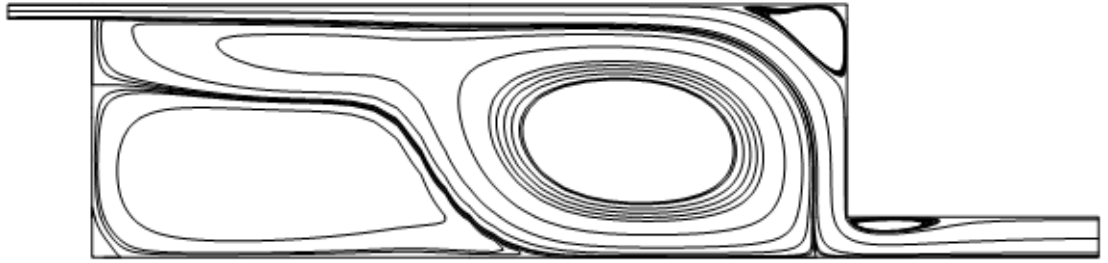
Şekil 4-9 Girimaji Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)



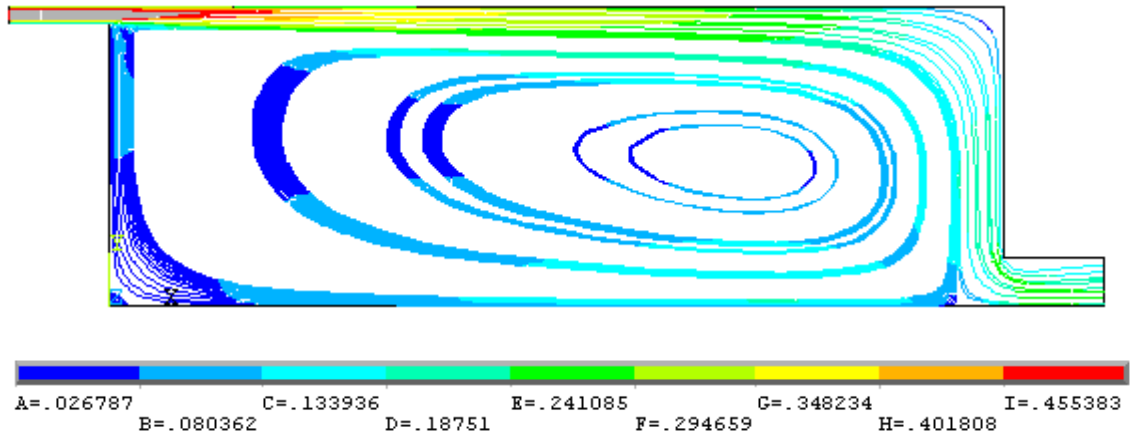
Şekil 4-10 K- ω SST Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)



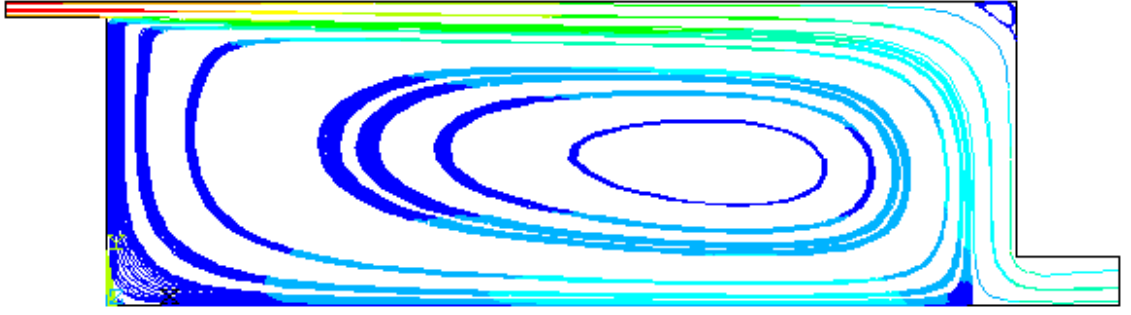
Şekil 4-11 K- ω SST Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Rong ve Nielsen, 2008)



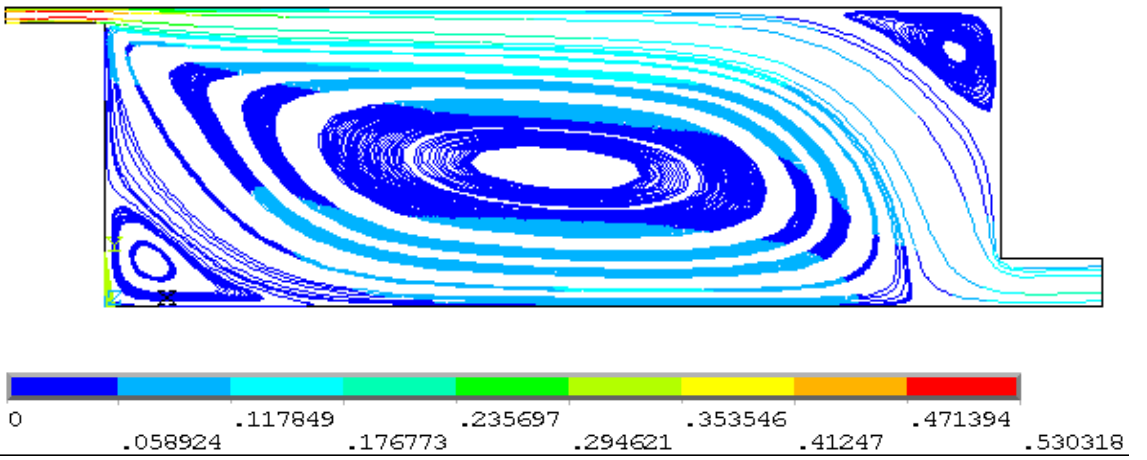
Şekil 4-12 K- ω SST Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Voigt, 2000)



Şekil 4-13 RNG Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)



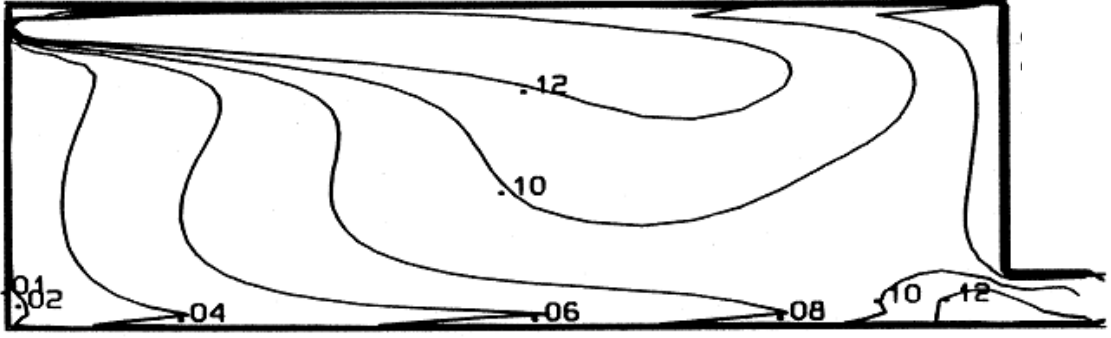
Şekil 4-14 New K-ε Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)



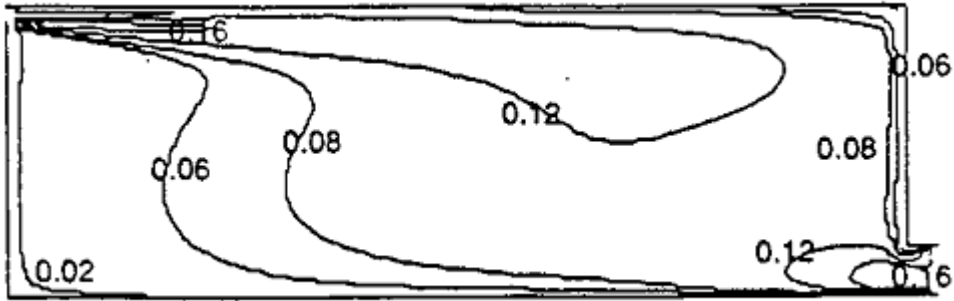
Şekil 4-15 Zero Equation Türbülans Modeli Akım Çizgileri (Bu çalışma)

4.1.2 Türbülans kinetik enerjisi ile türbülans modelleri karşılaştırması

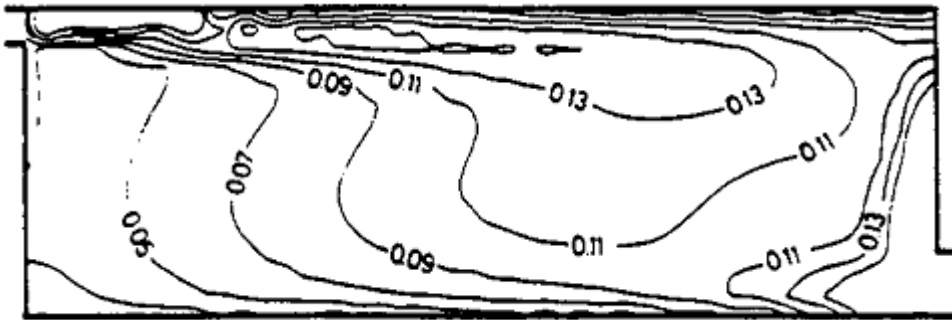
Bu bölümde, bu çalışma sonucunda elde edilen tüm türbülans modellerine ait türbülans kinetik enerjisi sonuçları verilmiştir. Literatüre ait karşılaştırma ise türbülans şiddeti ile yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda sonuçlar direk türbülans şiddeti ile verilmiştir. Şekil 4.16 – şekil 4.25 ‘de sonuçlar verilmiştir.



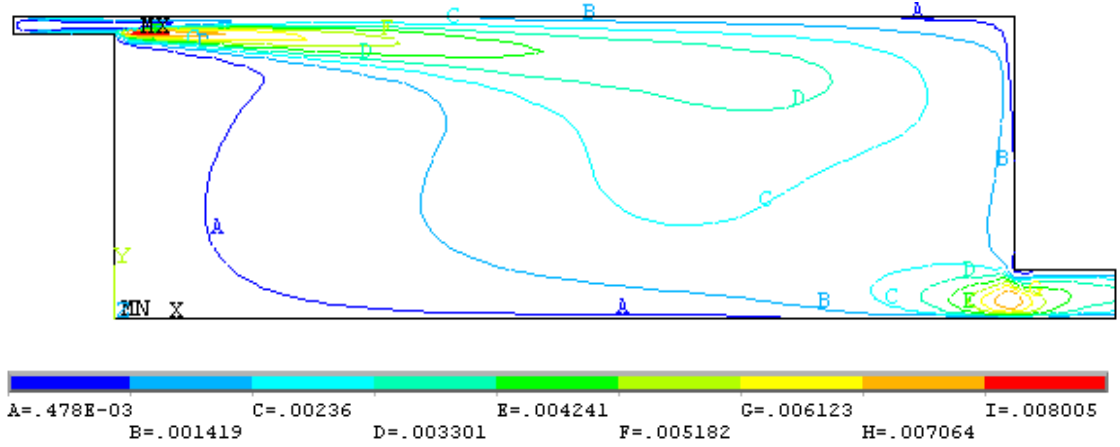
Şekil 4-16 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Türbülans Şiddeti (Lemaire 1991)



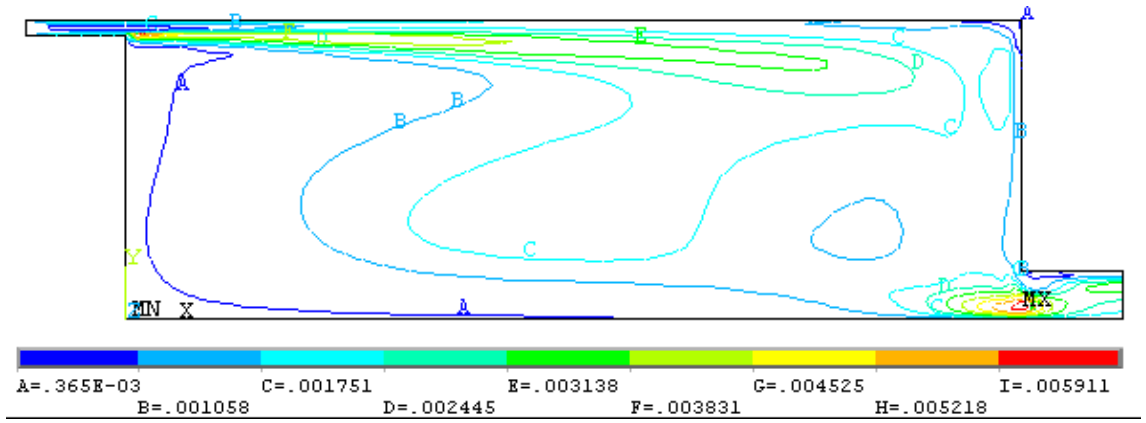
Şekil 4-17 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Türbülans Şiddeti (Vogl 1993)



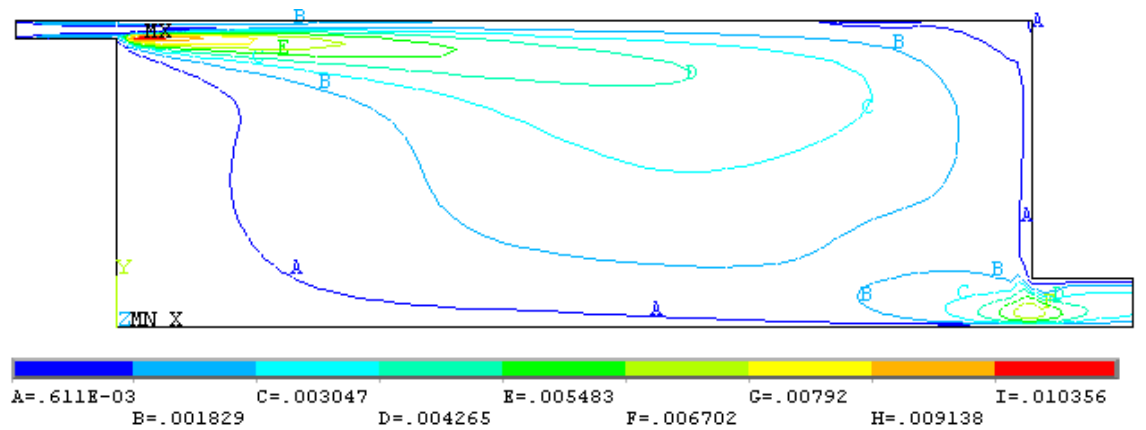
Şekil 4-18 Low-reynolds K- ϵ Türbülans Modeli Türbülans Şiddeti (Skavgaard 1993)



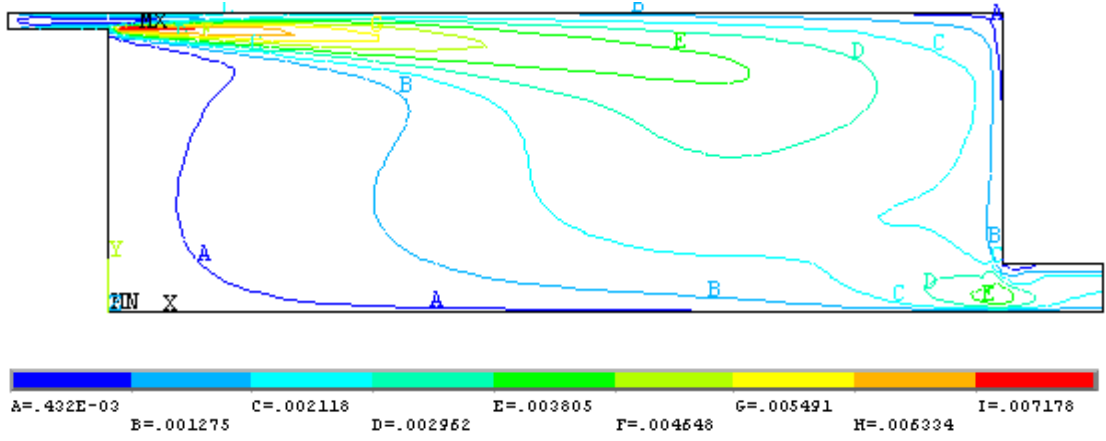
Şekil 4-19 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma)



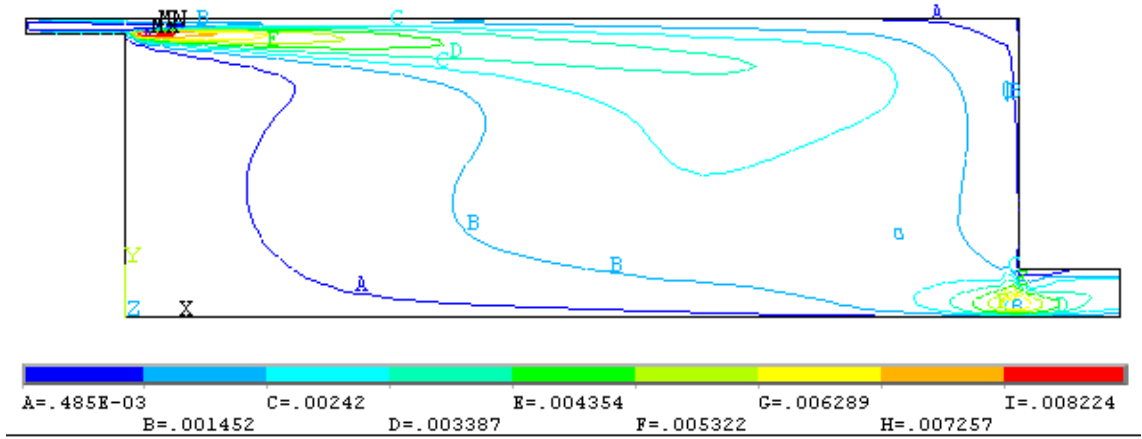
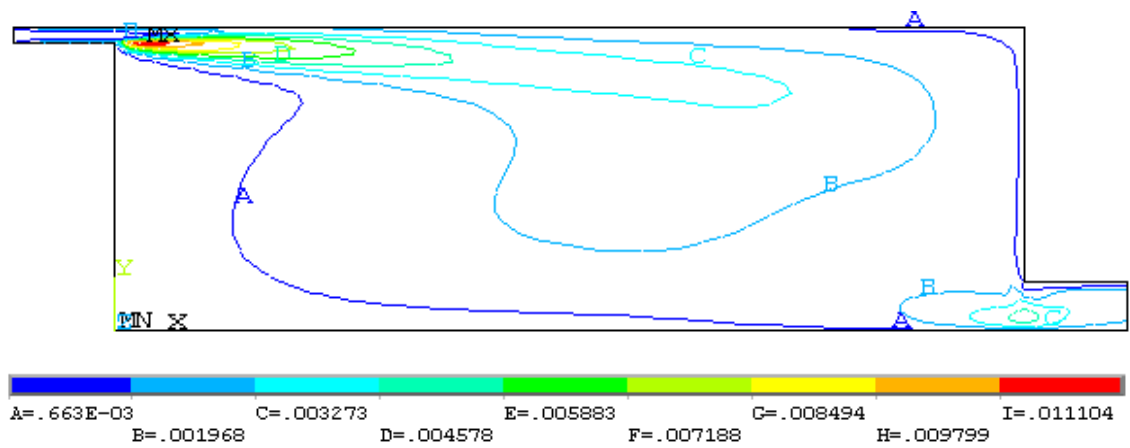
Şekil 4-20 Girmaji Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma)



Şekil 4-21 K- ω Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma)

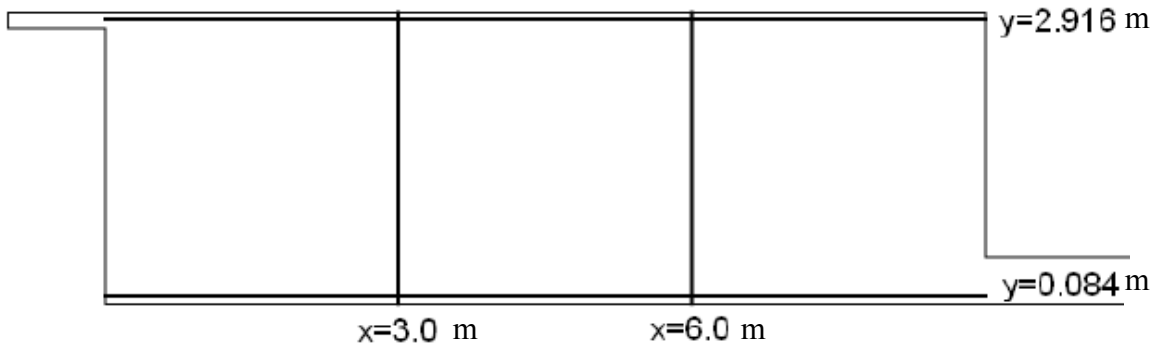


Şekil 4-22 RNG Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışması)

Şekil 4-23 K- ω SST Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma)Şekil 4-24 New K- ϵ Türbülans Modeli Türbülans Kinetik Enerjisi (Bu çalışma)

4.1.3 Hız dağılımları ile türbülans modelleri karşılaştırılması

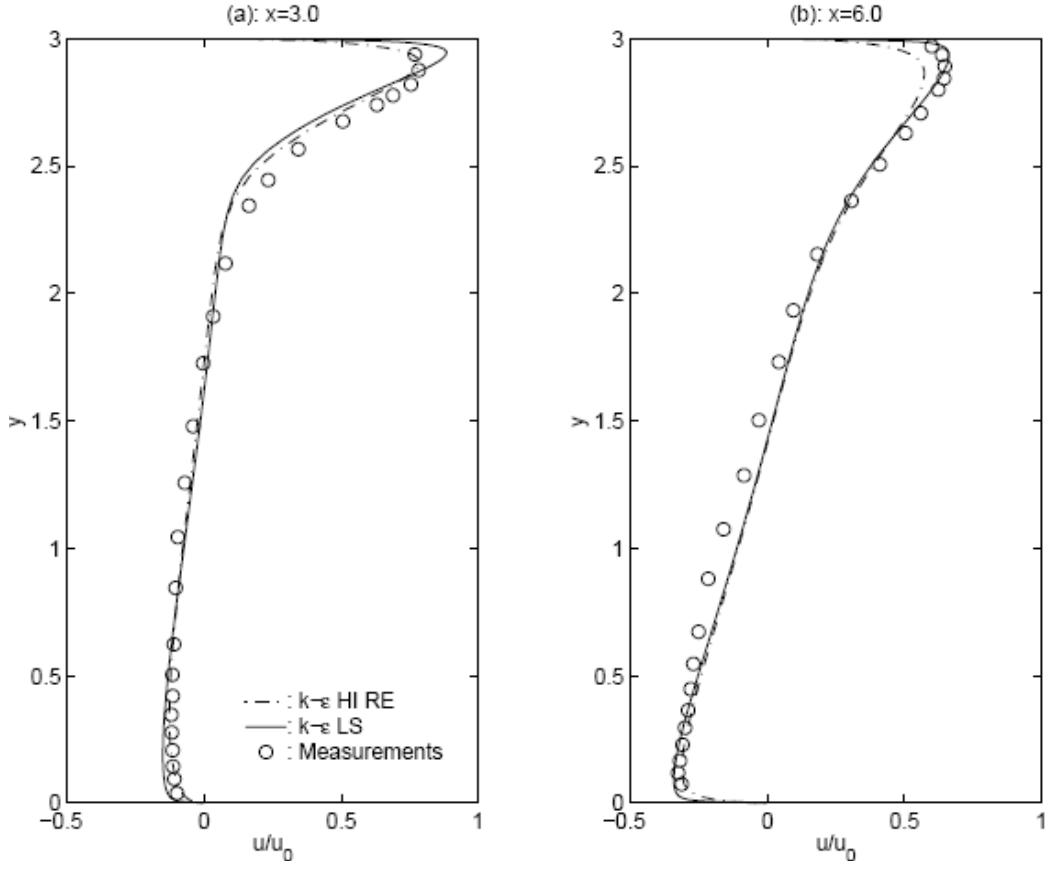
Bu bölümde hız dağılımları ile türbülans modellerinin karşılaştırılması çalışması yapılmıştır. Hız dağılımları $X=3$, $X=6$, $Y=0,084$ ve $Y=2,916$ metrelerdeki x yönündeki hız değerleri alınarak çıkarılmıştır. Şekil 4.25 'de bu dağılımların alındığı bölgeler görülmektedir. Literatürden Voigt (2000) ve Rong ve Nielsen (2008) 'in çalışmaları karşılaştırma amaçlı olarak eklenmiştir.



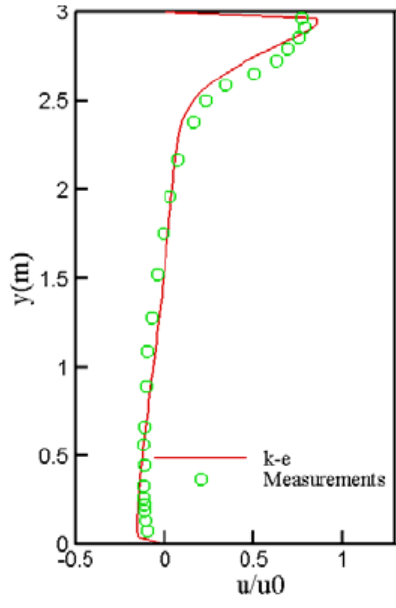
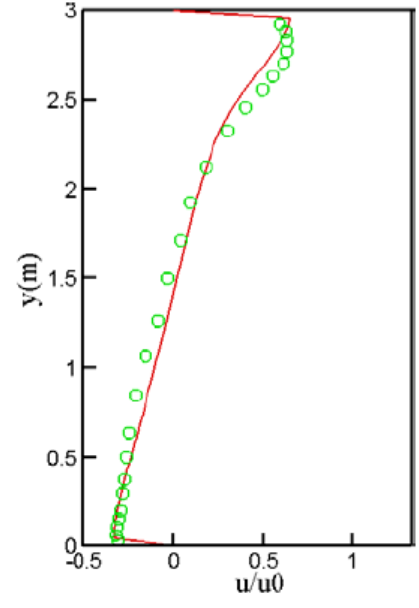
Şekil 4-25 Hız dağılımlarının alındığı noktalar (Rong ve Nielsen 2008)

4.1.3.1 Standart K- ϵ türbülans modeline ait hız dağılım sonuçları

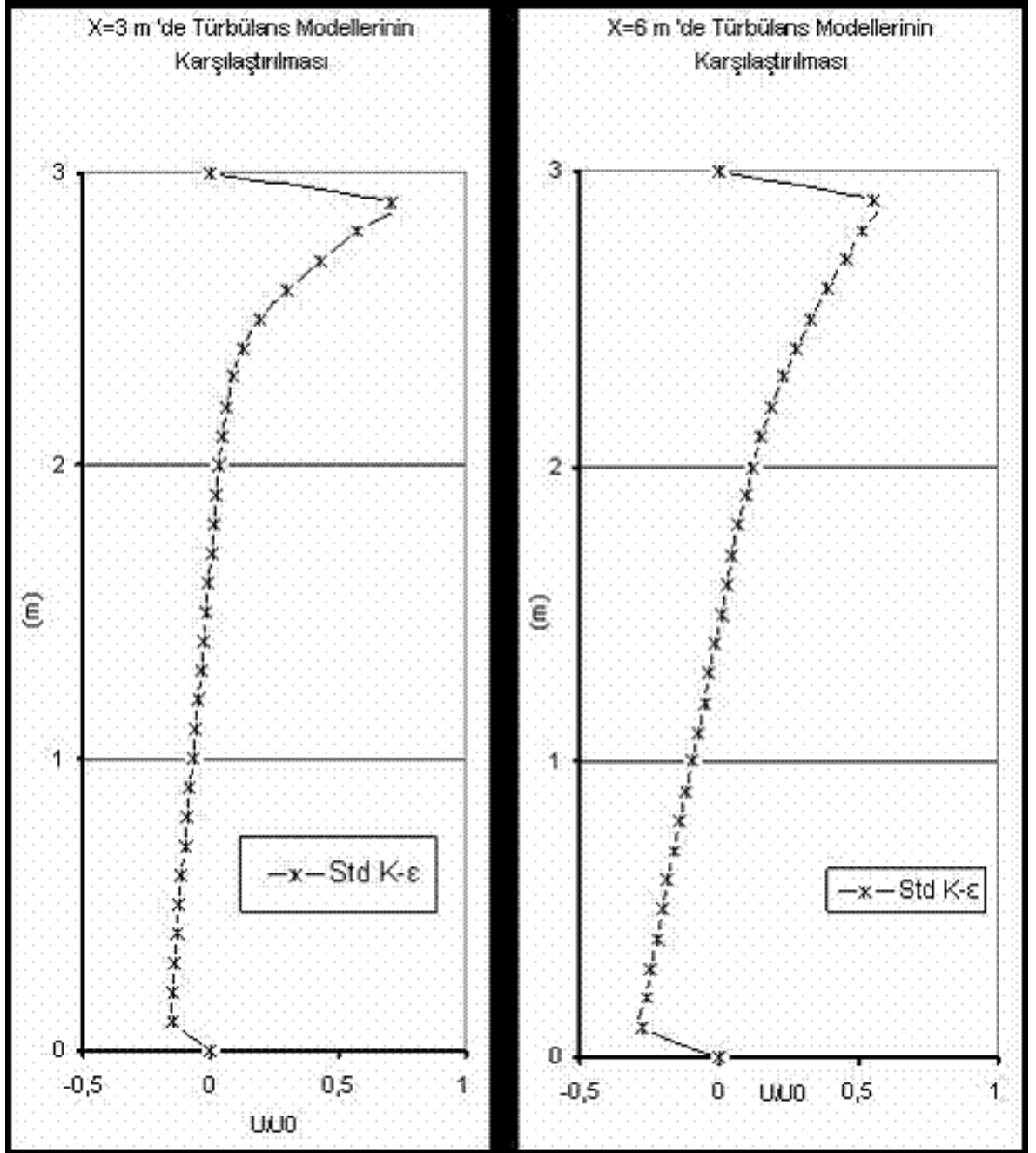
Şekil 4.26 'da Voigt (2000)' in, şekil 4.27' de Rong ve Nielsen (2008)' in, şekil 4.28' de bu çalışmaya ait $X=3$ ve $X=6$ metredeki boyutsuz hız dağılımları görülmektedir.



Şekil 4-26 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımlar X=3 ve X=6 'da (Voigt 2000)

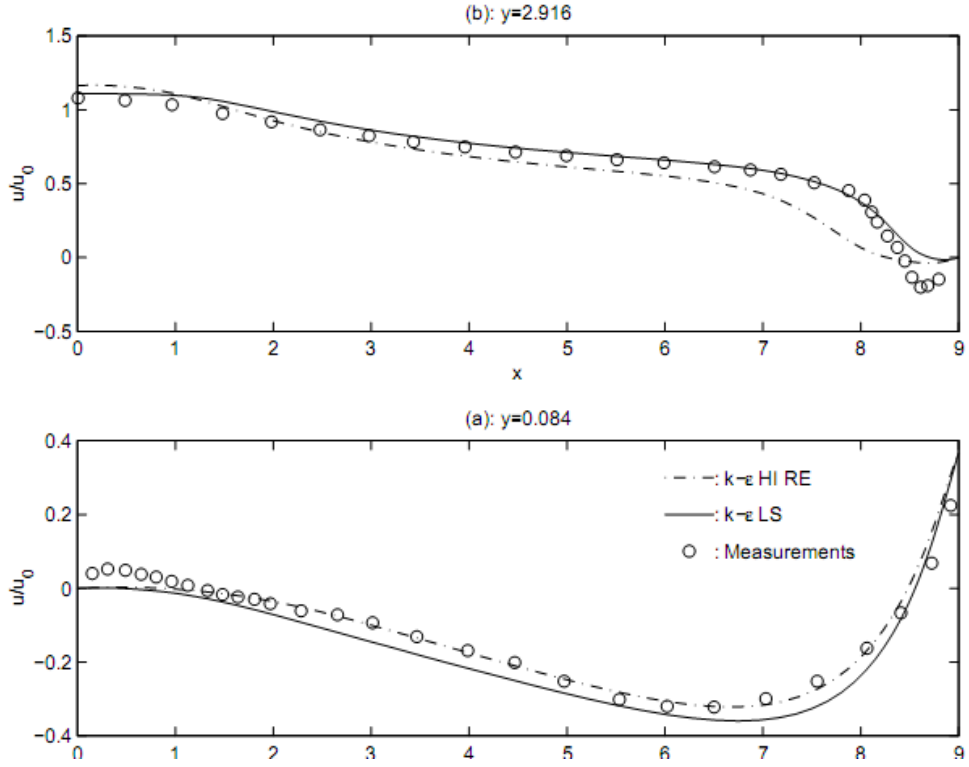
(a) $x=3.0$ (b) $x=6.0$

Şekil 4-27 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Rong ve Nielsen 2008)

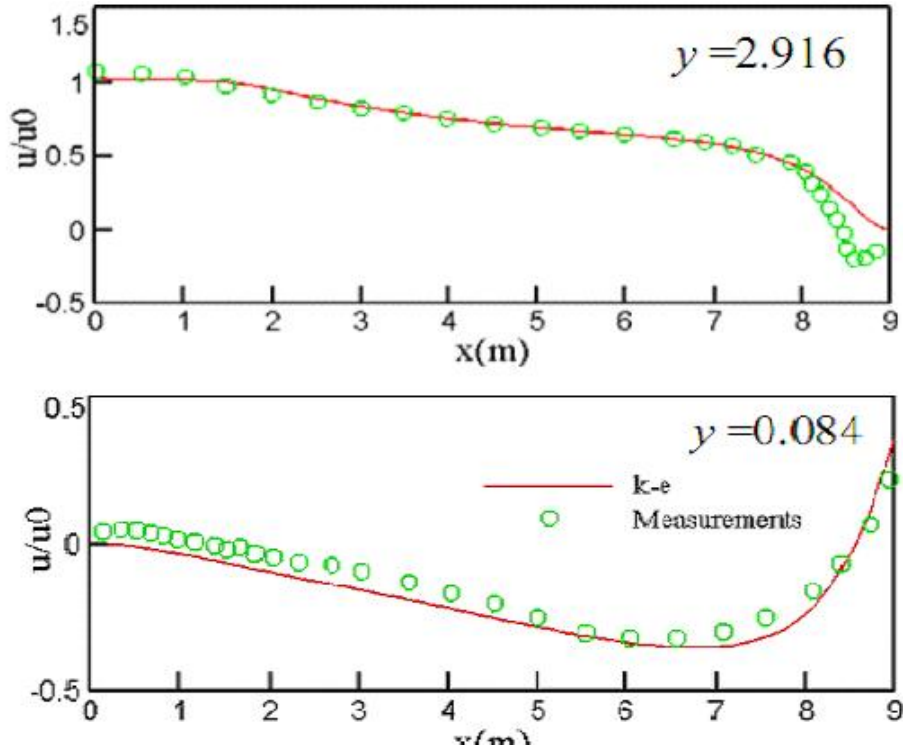


Şekil 4-28 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6' da (Bu çalışma)

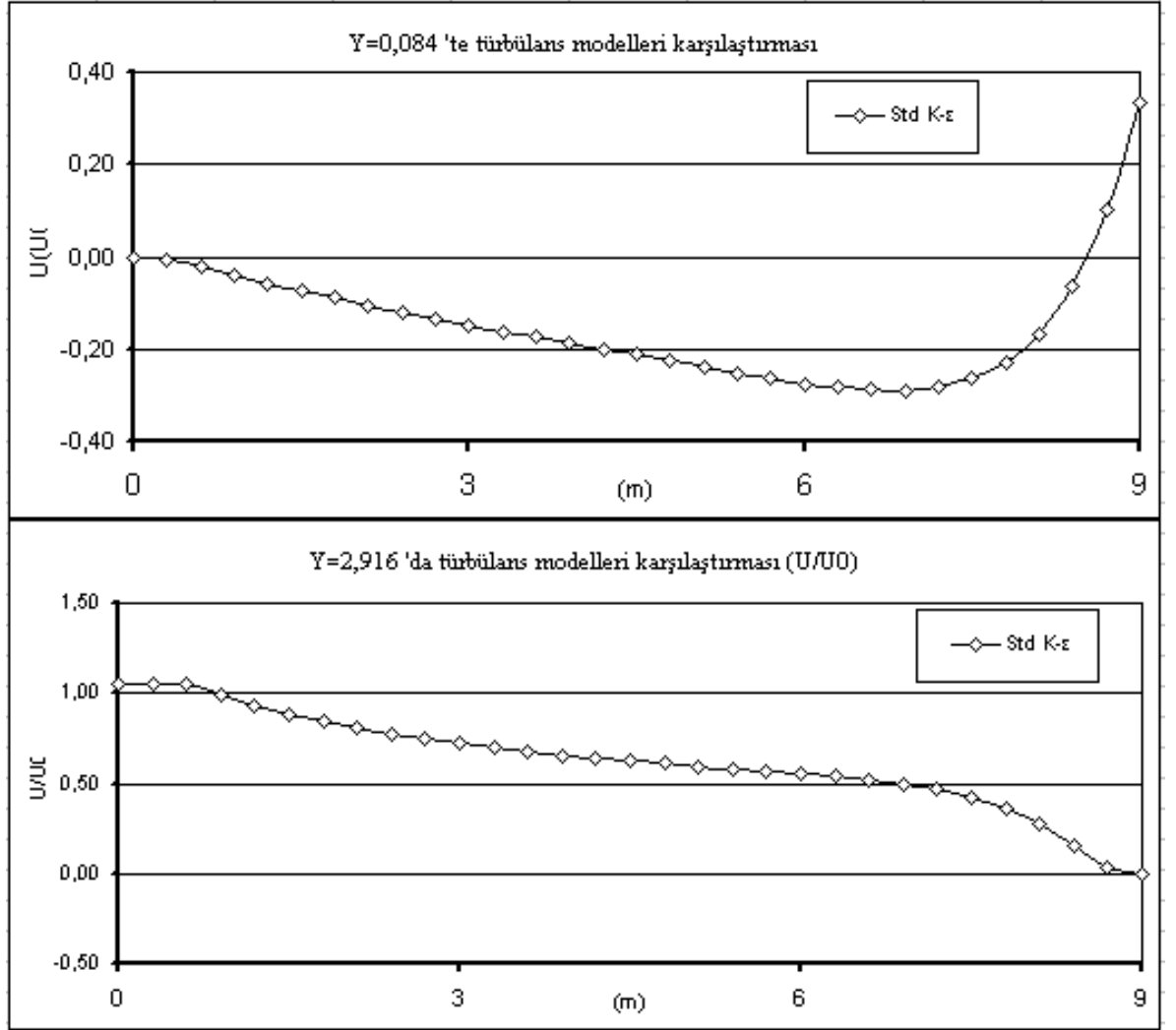
Şekil 4.29' da Voigt (2000)' in, şekil 4.30' da Rong ve Nielsen (2008)' in, şekil 4.31' de bu çalışmaya ait $Y=0,084$ ve $Y=2,916$ metredeki boyutsuz hız dağılımları görülmektedir.



Şekil 4-29 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımlar $Y=2,916$ ve $Y=0,084$ 'de (Voigt, 2000)



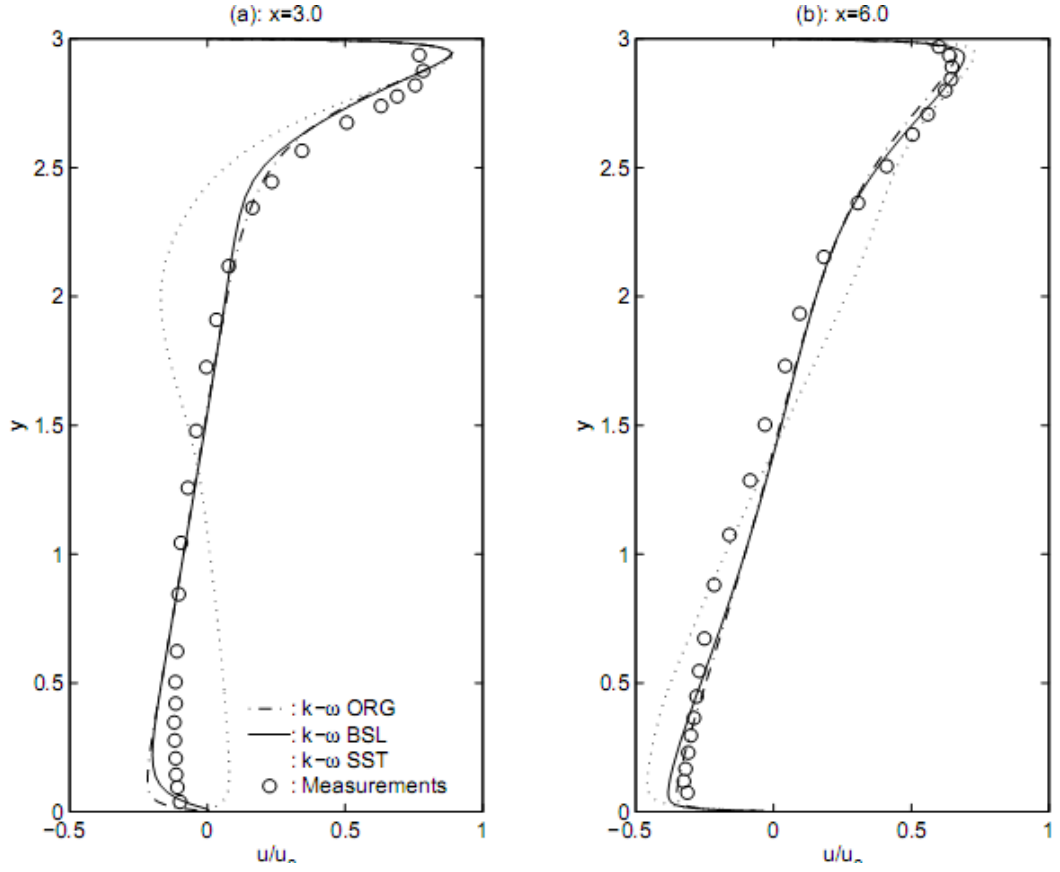
Şekil 4-30 Standart K- ϵ Türbülans Modeli Hız Dağılımları $Y=2,916$ ve $Y=0,084$ 'da (Rong ve Nielsen, 2008)



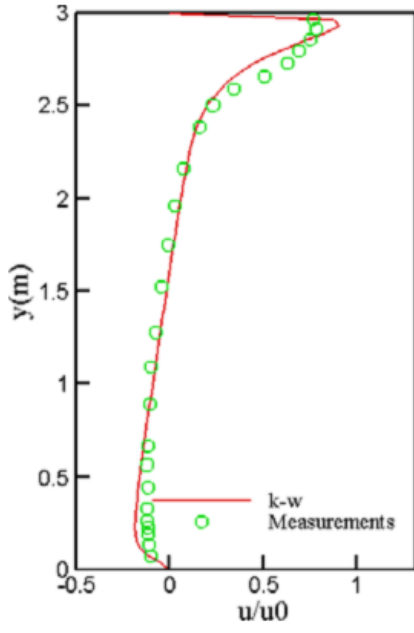
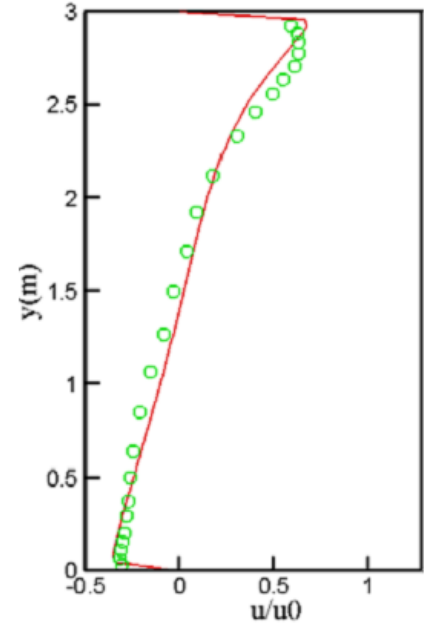
Şekil 4-31 Standart K-ε Türbülans Modeli Hız Dağılımları Y=2,916 ve Y=0,084 'da (Bu çalışma)

4.1.3.2 K- ω Türbülans modeline ait hız dağılım sonuçları

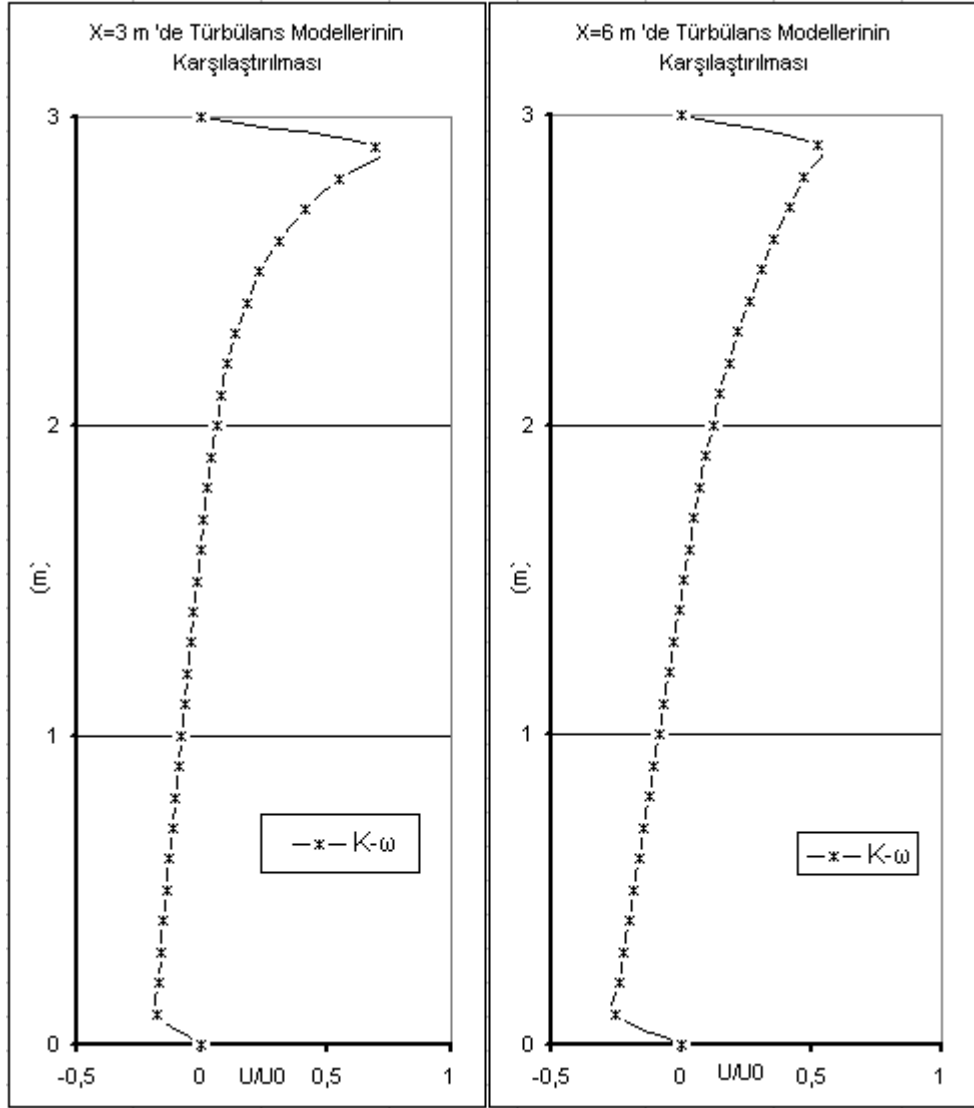
Şekil 3.32 'de Voigt (2000) 'in, şekil 3.33 'de Rong ve Nielsen (2008) 'in, şekil 3.34 'de bu çalışmaya ait X=3 ve X=6 metredeki boyutsuz hız dağılımları görülmektedir.



Şekil 4-32 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar X=3 ve X=6 'da (Voigt 2000)

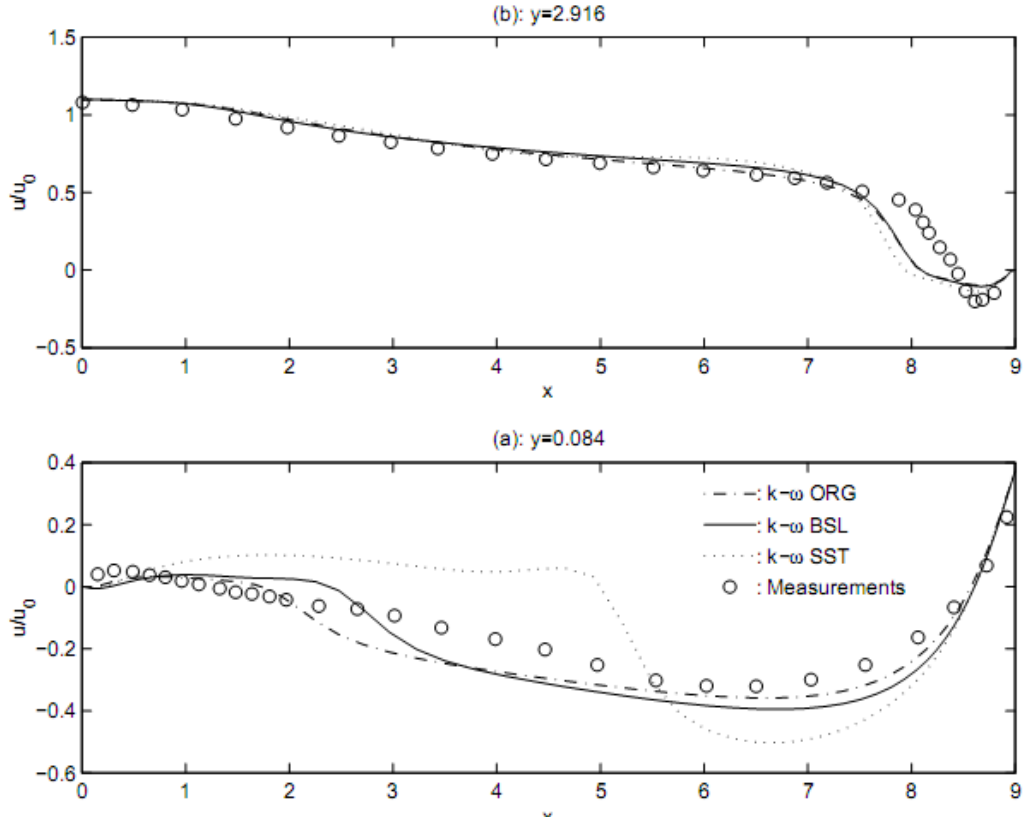
(a) $x=3.0$ (b) $x=6.0$

Şekil 4-33 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Rong ve Nielsen 2008)

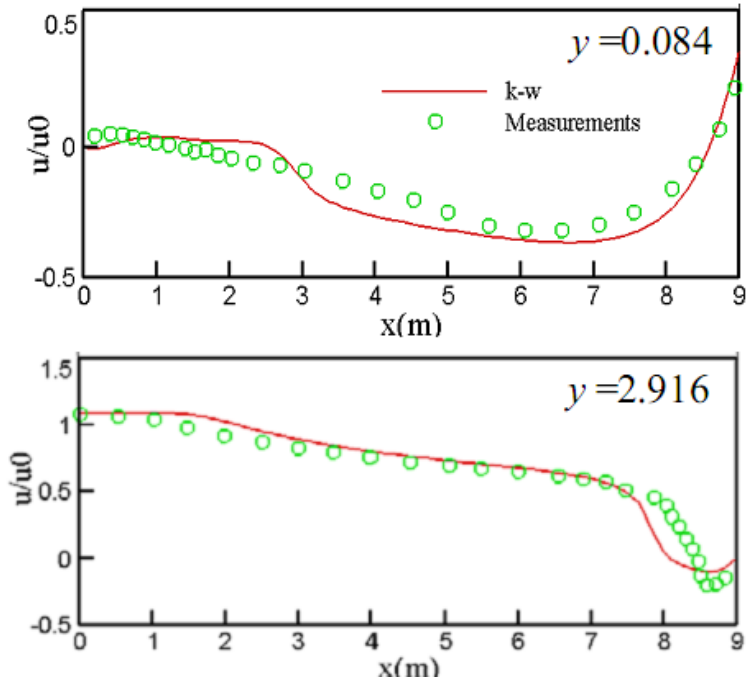


Şekil 4-34 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Bu çalışma)

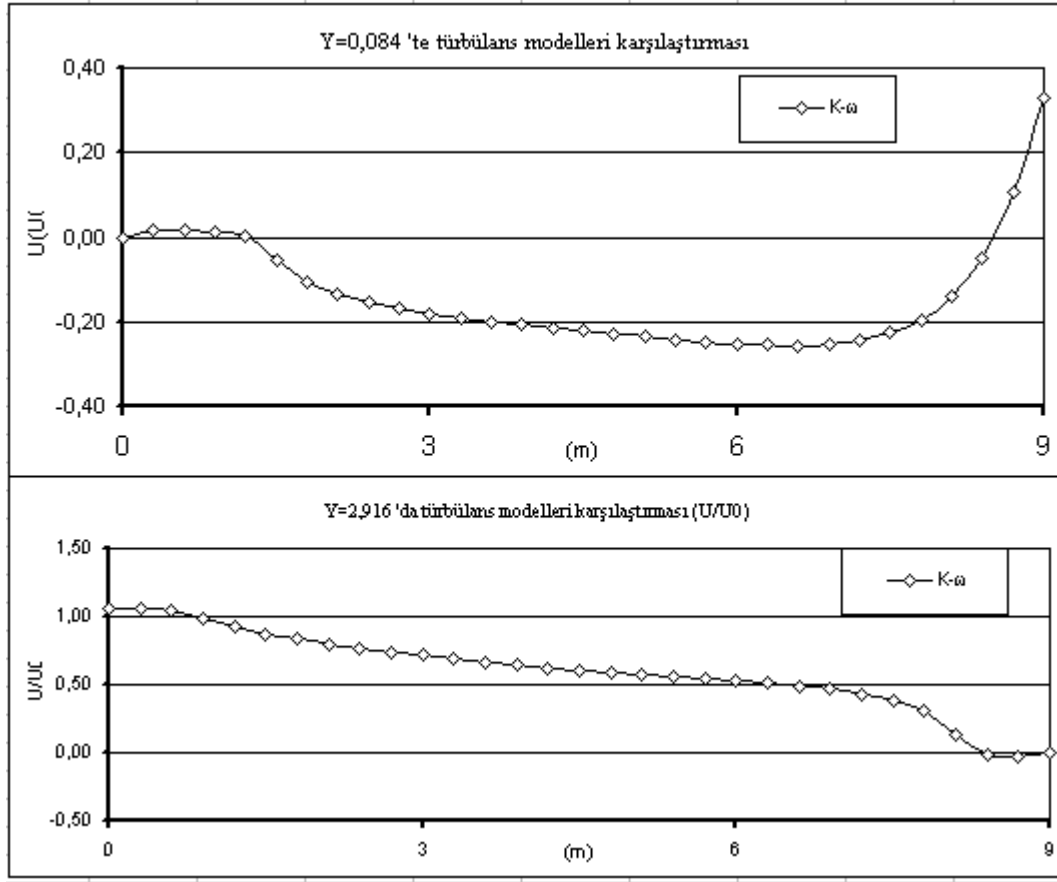
Şekil 4.35' de Voigt (2000) 'in, şekil 4.36' de Rong ve Nielsen (2008) 'in, şekil 4.37' da bu çalışmaya ait $Y=0,084$ ve $Y=2,916$ metredeki boyutsuz hız dağılımları görülmektedir.



Şekil 4-35 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar $Y=2,916$ ve $Y=0,084$ 'de (Voigt 2000)



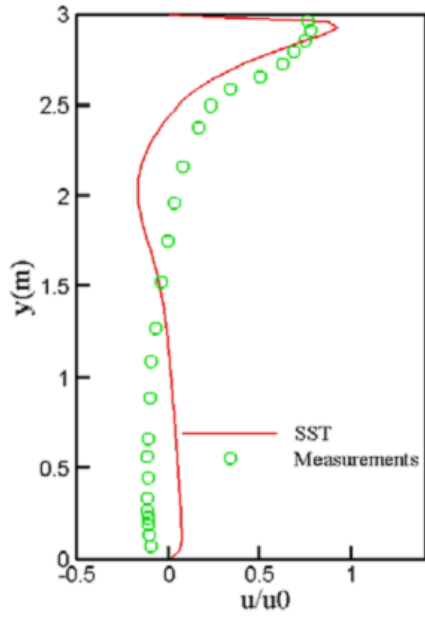
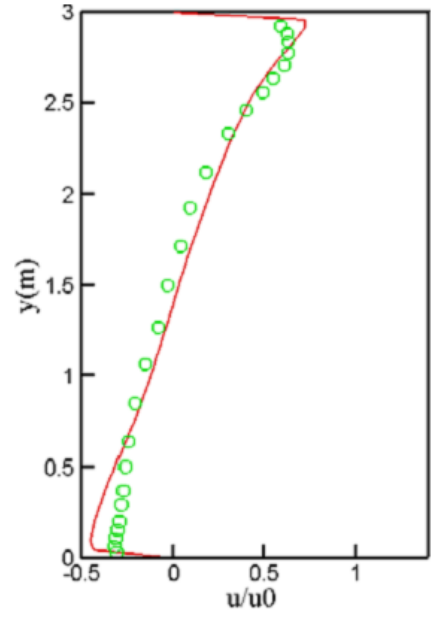
Şekil 4-36 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar $Y=2,916$ ve $Y=0,084$ 'de (Rong ve Nielsen 2008)



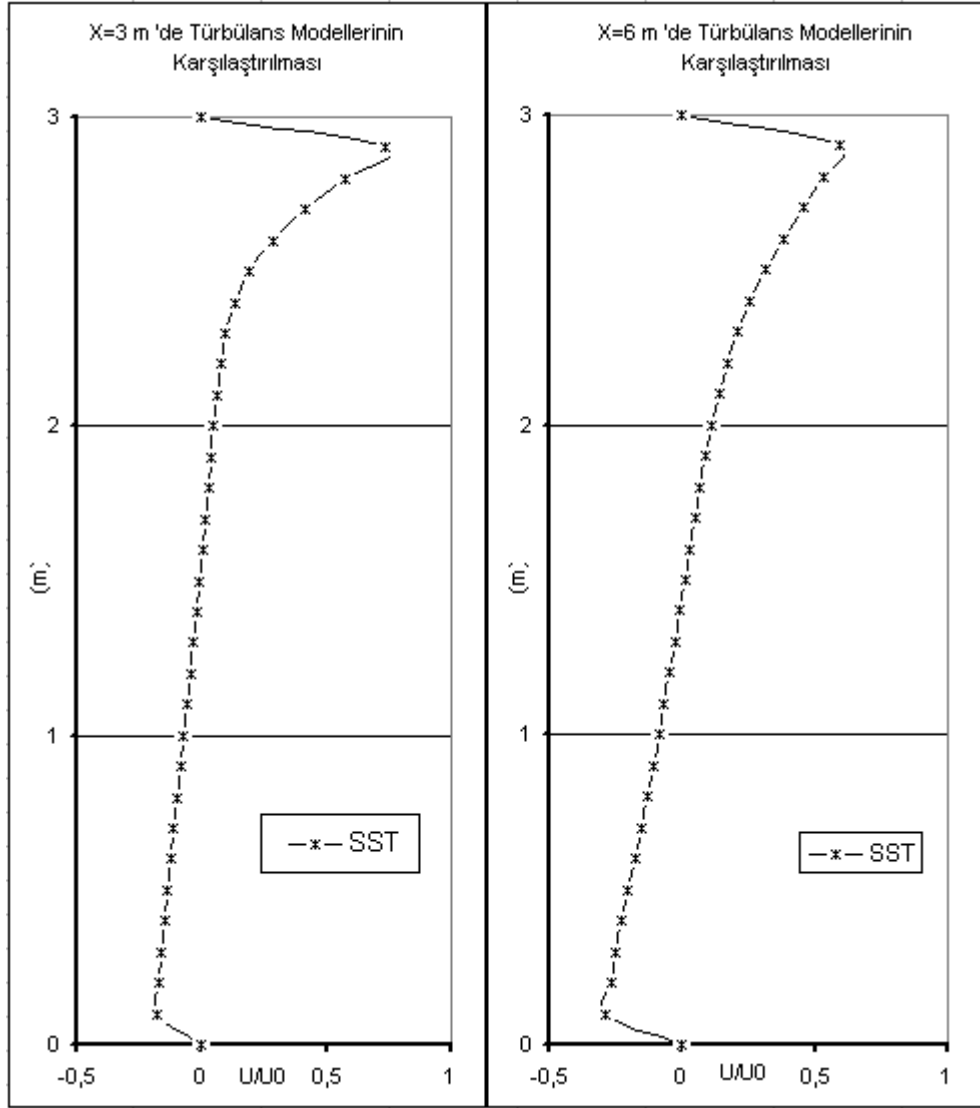
Şekil 4-37 Standart K- ω Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Bu çalışma)

4.1.3.3 SST Türbülans modeline ait hız dağılım sonuçları

Şekil 4.38' de Rong ve Nielsen (2008)' in, şekil 4.39 'de bu çalışmaya ait X=3 ve X=6 metredeki boyutsuz hız dağılımları görülmektedir.

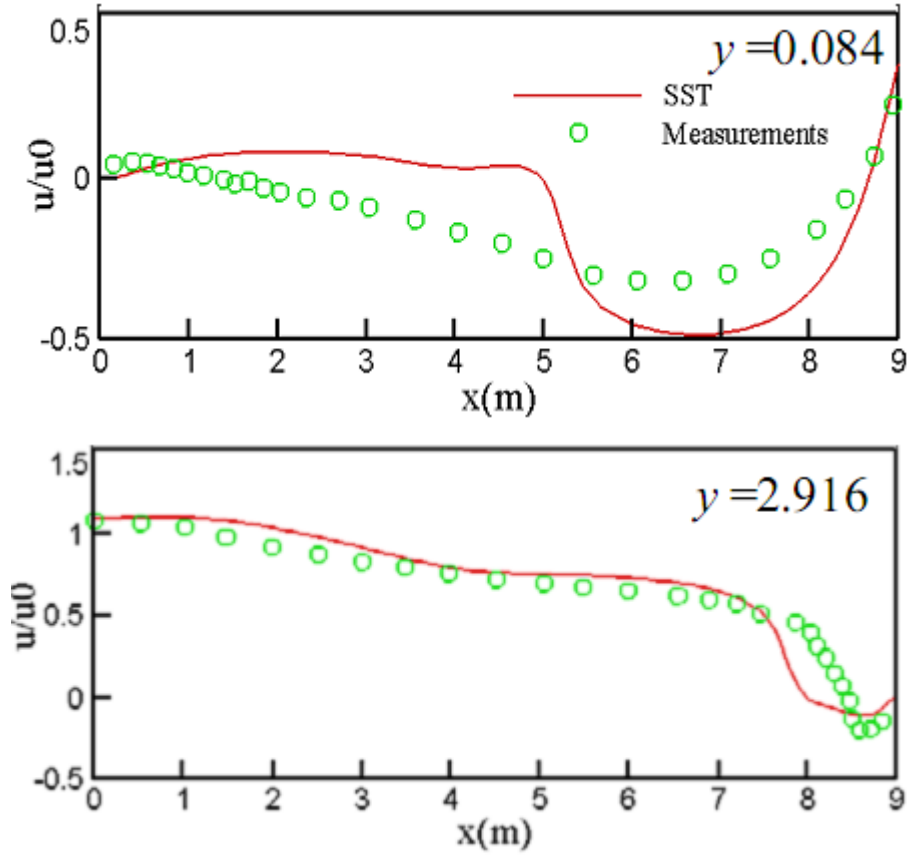
(a) $x=3.0$ (b) $x=6.0$

Şekil 4-38 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımları $X=3$ ve $X=6$ 'da (Rong ve Nielsen 2008)

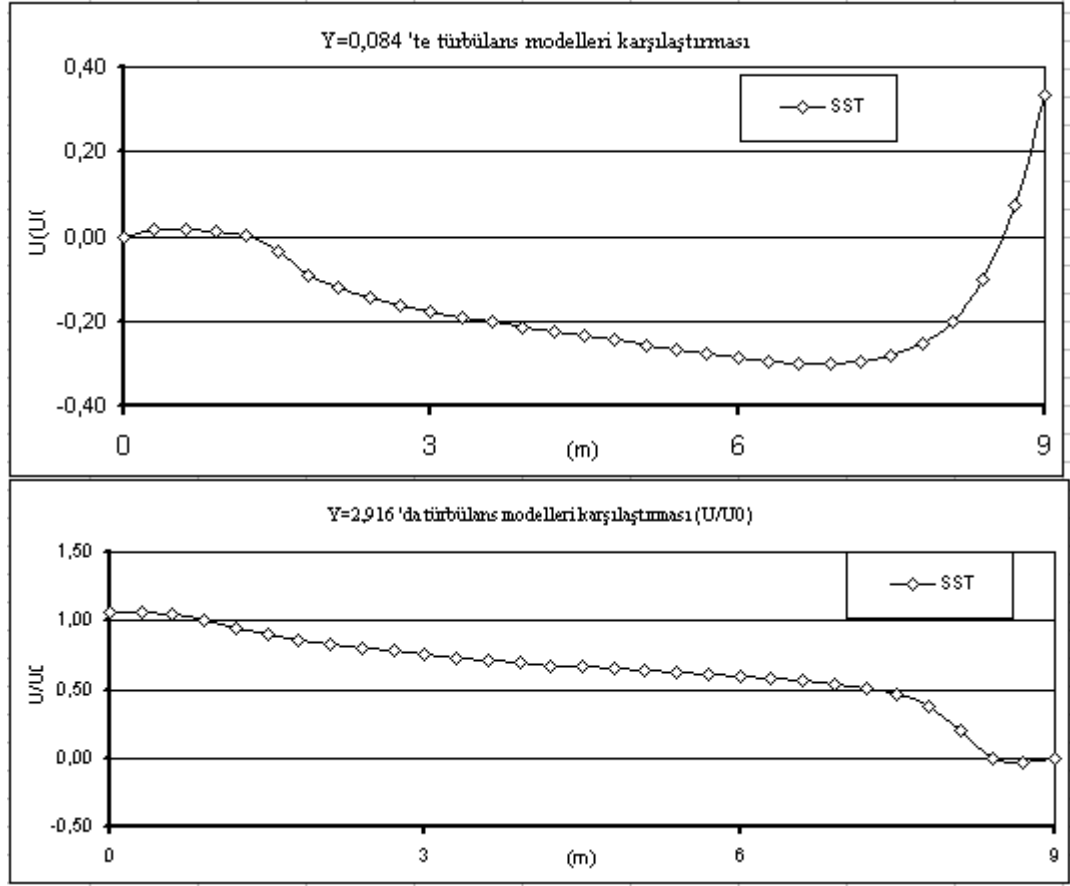


Şekil 4-39 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımları X=3 ve X=6 'da (Bu çalışma)

Şekil 4.40 'da Rong ve Nielsen (2008) 'in, şekil 4.41 'de bu çalışmaya ait $Y=0,084$ ve $Y=2,916$ metredeki boyutsuz hız dağılımları görülmektedir.



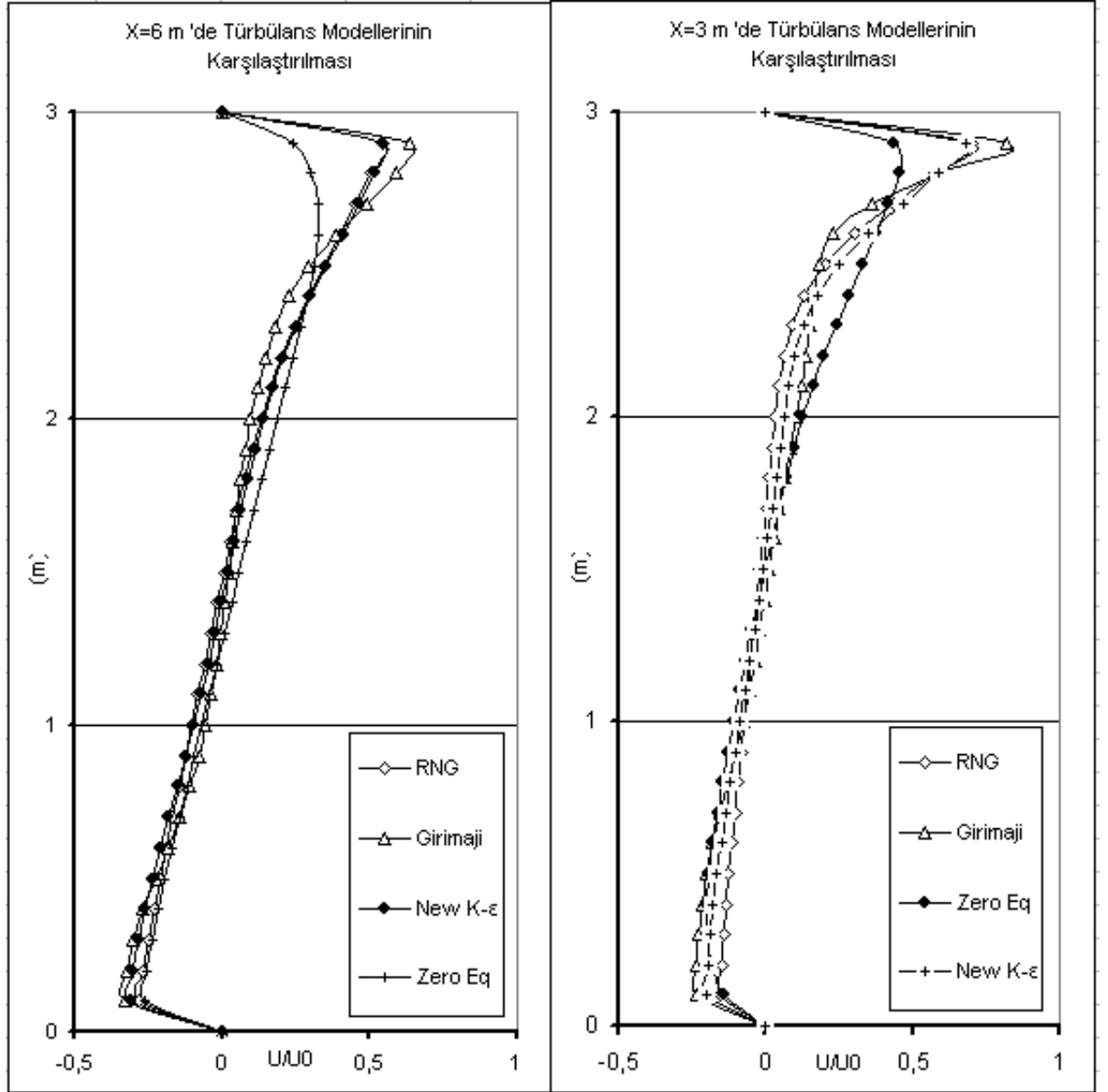
Şekil 4-40 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımlar $Y=2,916$ ve $Y=0,084$ 'de (Rong ve Nielsen 2008)



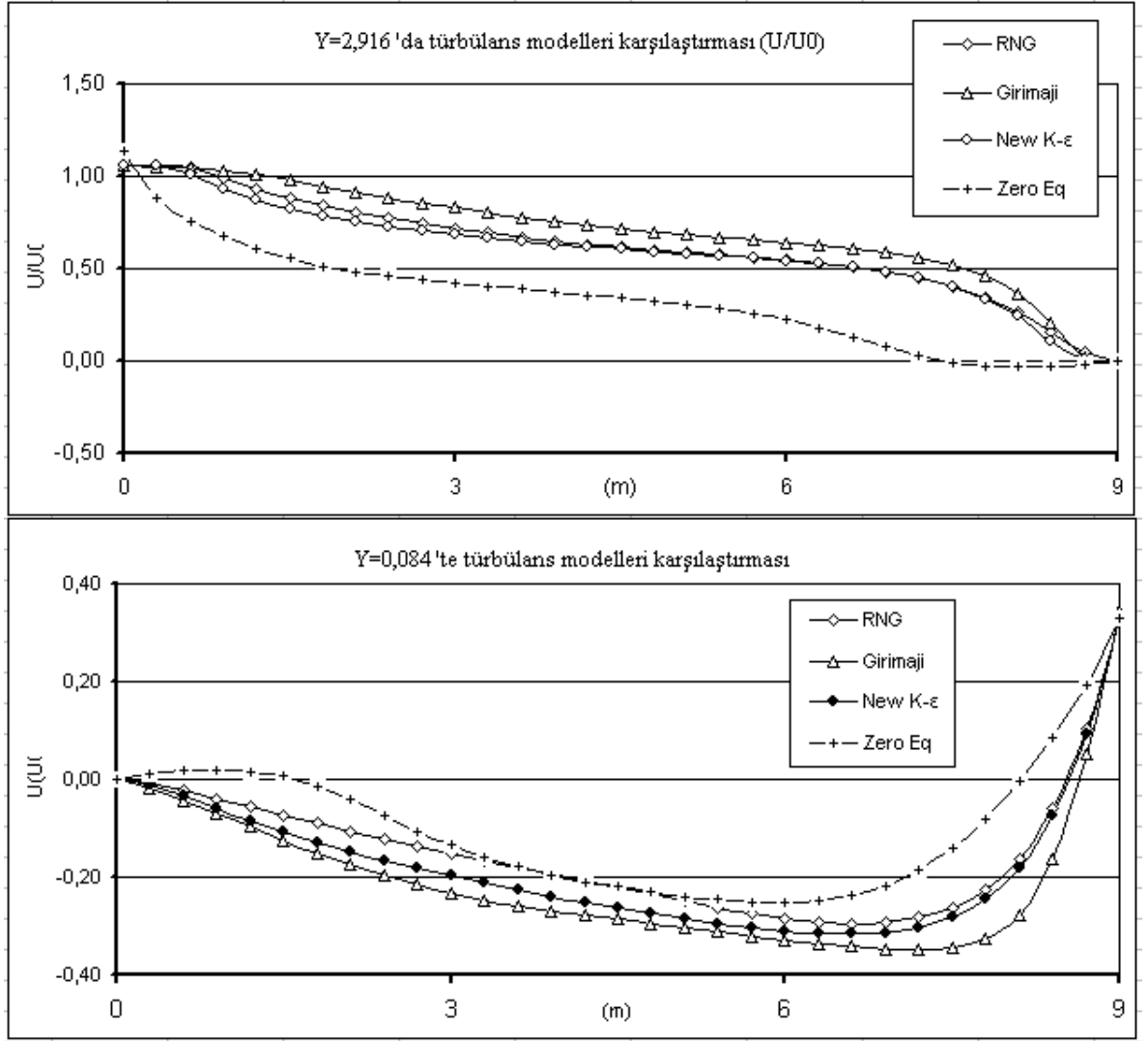
Şekil 4-41 SST Türbülans Modeli Hız Dağılımlar Y=2,916 ve Y=0,084 'de (Bu çalışma)

4.1.3.4 Diğer türbülans modellerine ait hız dağılım sonuçları

Bu bölümde diğer 4 türbülans modeline ait boyutsuz hız dağılımları verilmektedir. Diğer 4 türbülans modeli Girimaji, New K- ϵ , Zero Equation ve RNG' dir. Şekil 3.42 'de X=3 ve X=6 metredeki boyutsuz hız dağılımları verilmiştir. Şekil 4.43 'de ise Y=2,916 ve Y=0,084 metredeki boyutsuz hız dağılımları verilmiştir.



Şekil 4-42 X=3 m ve X=6 metrede diğer türbülans modellerine ait hız dağılımları (Bu çalışma)



Şekil 4-43 Y=2,916 ve Y=0,084 diğer türbülans modellerine ait hız dağılımları (Bu çalışma)

4.1.4 CPU Çözüm Süreleri ile Türbülans Modelleri Karşılaştırması

Bu bölümde CPU çözüm süreleri ile türbülans modelleri karşılaştırılmıştır. Eşsıcaklıklı çözümlerinin tamamı aynı ağ yapısı ve aynı yineleme ile yapıldığından, çözüm için kullanılan CPU zamanlarının karşılaştırması özellikle ticari uygulamalar için önemlidir.

Tablo 4.1 Eşsıcaklıklı durumda çözüm için harcanan CPU zamanları

Eşsıcaklıklı durumlar için çözüme harcanan CPU zamanları	
Standart Ke	409,78
Girimaji	408,05
Kw	403,95
New K-e	424,92
RNG	409,94
SST	418,77
Zero Eq	292,61

4.1.5 Ayrılma noktaları ile türbülans modelleri karşılaştırılması

Oda içi hava hareketlerinin modellenmesindeki en büyük belirsizliklerden biri de türbülans boyutlarının belirlenmesidir. Şekil 4.2 – 4.15 arasında bu çalışmada elde edilen tüm akım çizgileri verilmiştir. Görüldüğü üzere hemen her modelde sol alt köşede türbülans bölgesi mevcuttur. Türbülans bölgesinin boyutları yani ayrılma noktaları tablo 4.2’ de verilmiştir. Literatürden Voigt ve ark. (2003)’ in çalışmasında elde ettiği ayrılma noktaları karşılaştırma amacıyla tablo 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.2 Ayrılma noktaları karşılaştırması

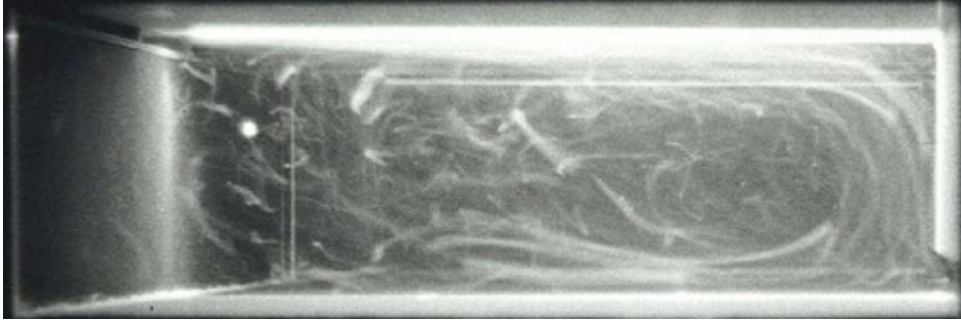
	Bu çalışma (FEM)		Voigt ve ark. (2003) (CVM)	
	Taban ayrılma noktası (m)	Duvar ayrılma noktası (m)	Taban ayrılma noktası (m)	Duvar ayrılma noktası (m)
New k-ε	0,1716	0,1306	mevcut değil	
Girimaji	0,11458	0,0591	mevcut değil	
k-ω	2,1713	0,8670	2,7	1,5
SST	1,6604	0,9541	5,8	1,7
RNG	0,19096	0,1331	mevcut değil	
Std k-ε	0,196	0,1180	0,8	0,8
Zero Eq	2,1713	1,2061	mevcut değil	

4.2 Eşsıcaklıklı Olmayan Test Modeli Sonuçları

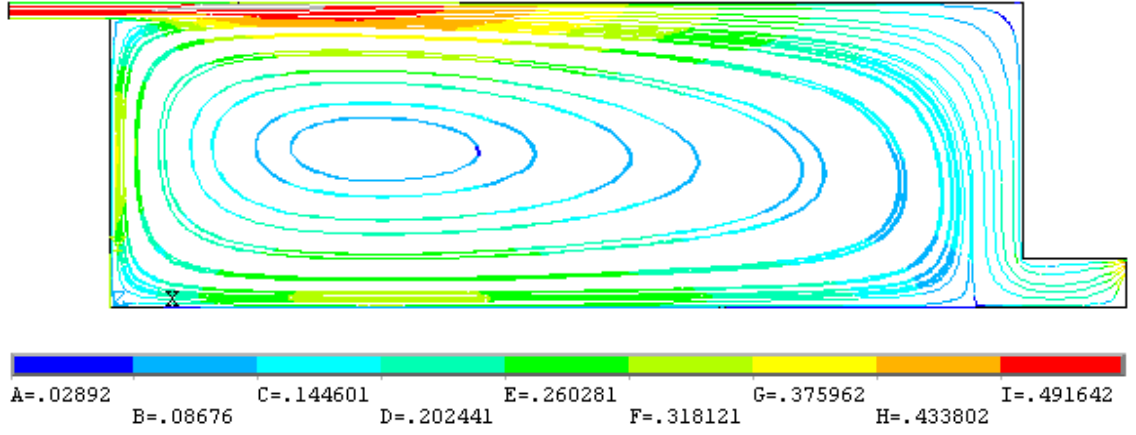
Bölüm 4.2’ de Eşsıcaklıklı olmayan Annex 20 test odasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tüm türbülans modeli karşılaştırmalarında tabana sabit ısı akısı verilmiş, yer çekimi ivmesi hesaba katılmış, akışkanın termodinamik özellikleri değişebilir verilmiş ve çözümler bu şekilde elde edilmiştir. Tüm çözümler 1600 yineleme ile elde edilmiştir. Ağ yapısı Standart K- ϵ , Girmaji ve RNG türbülans modellerinde 5800 ağ yapısı ile çözüm elde edilmiştir. Fakat K- ω , SZL, SST ve Zero Equation türbülans modellerinde 5800 ağ yapısı ile çözüm yakınsamadığından 8800 ağ yapısı kullanılmıştır.

4.2.1 Akım çizgileri ile türbülans modelleri karşılaştırılması

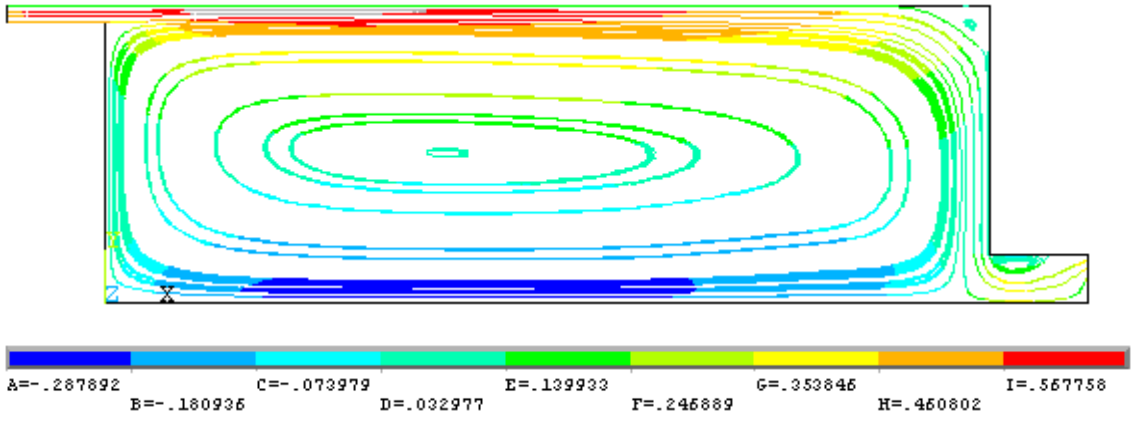
Bu bölümde literatürdeki ve bu çalışmadan elde edilen farklı türbülans modellerine ait akım çizgileri verilmekte ve karşılaştırılmaktadır.



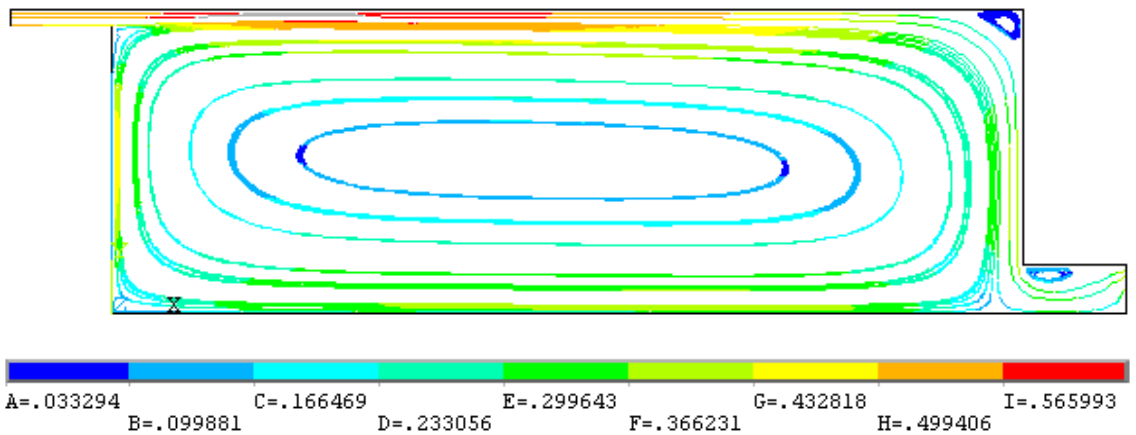
Şekil 4-44 Akış iplikleri gerçek görüntüsü Nielsen (1974) yılındaki deneysel çalışma



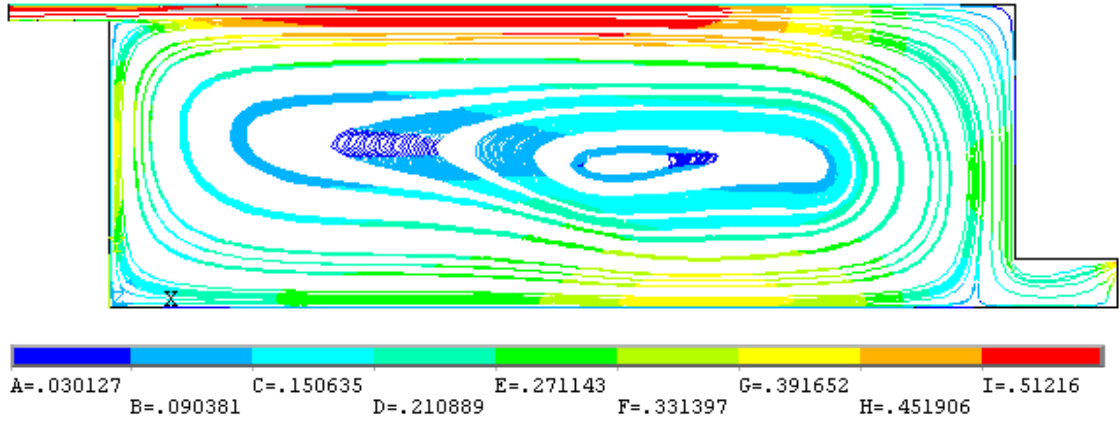
Şekil 4-45 Standart K- ϵ Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)



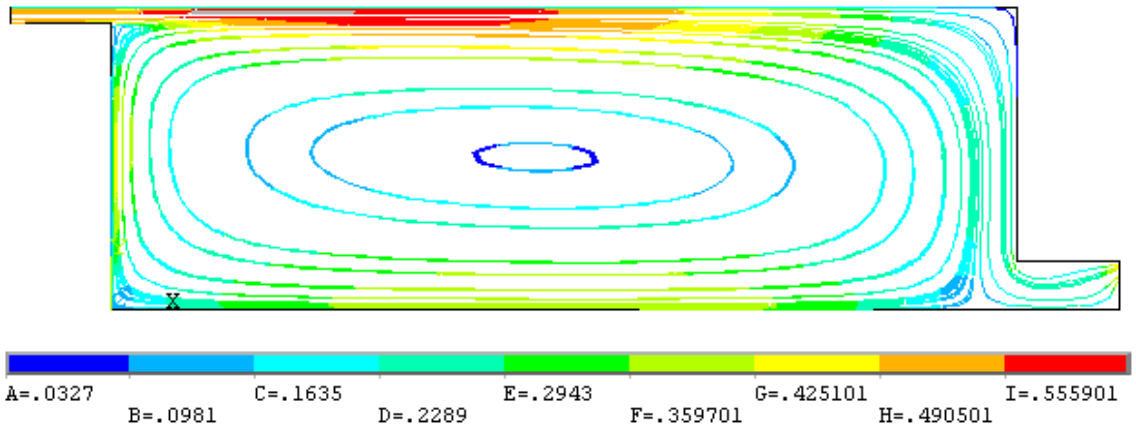
Şekil 4-46 Std K- ω Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)



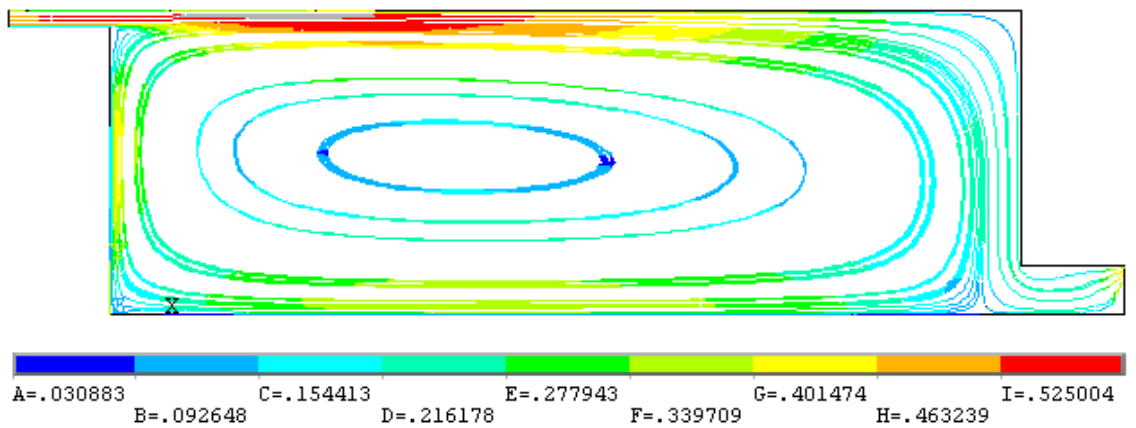
Şekil 4-47 SST Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)



Şekil 4-48 Girimaji Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)



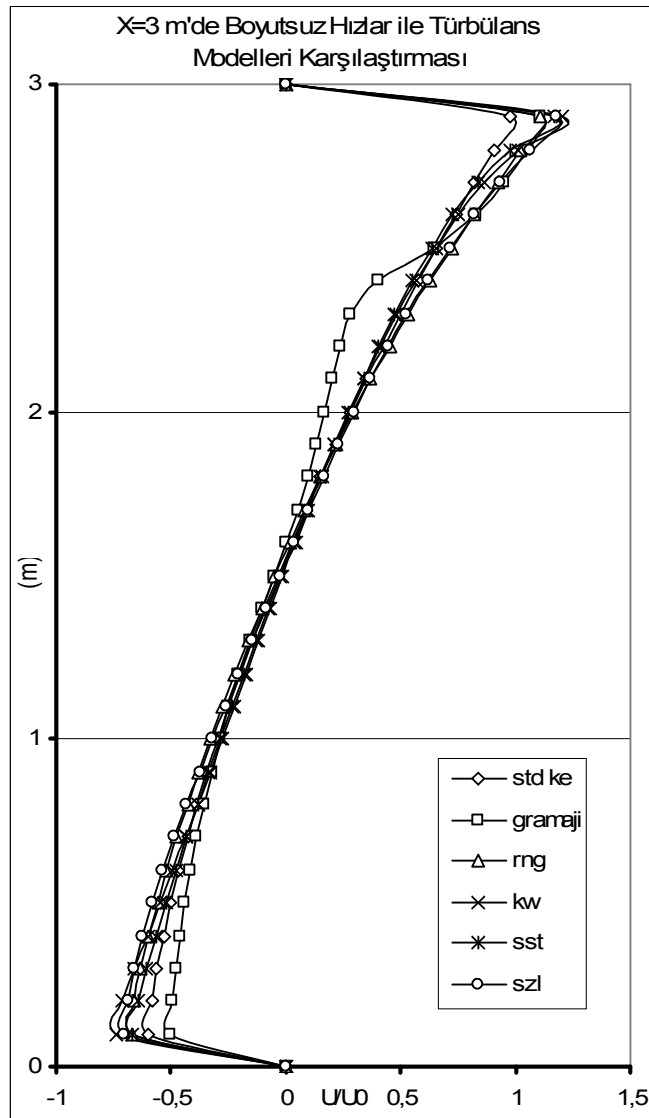
Şekil 4-49 SZL Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)



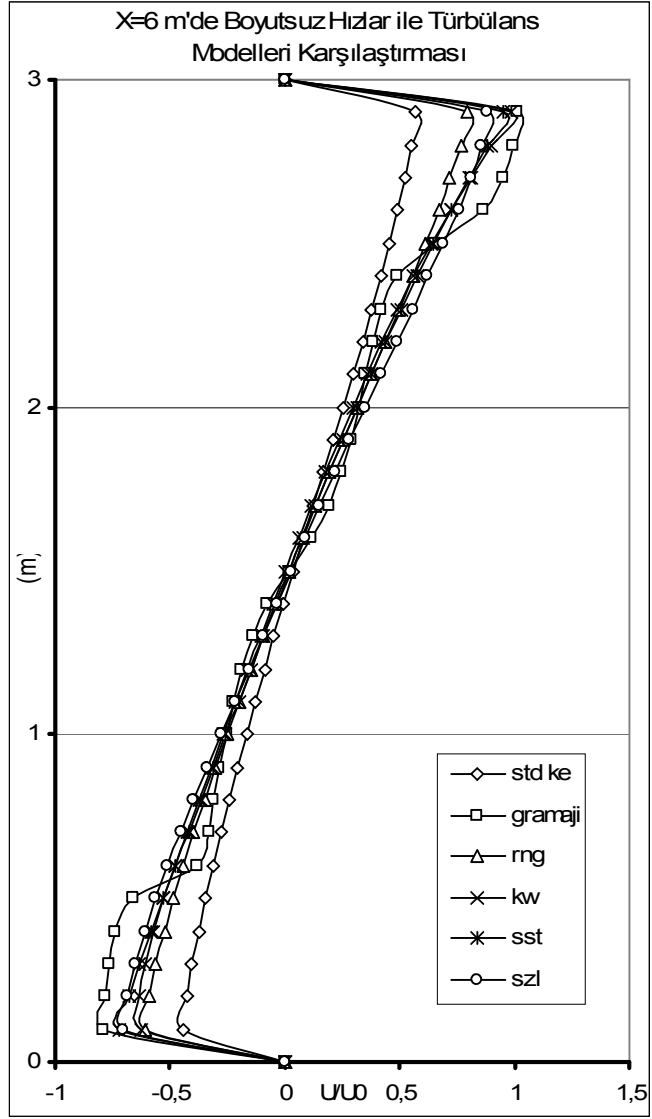
Şekil 4-50 RNG Türbülans Modelinde Akım Çizgileri (Bu çalışma)

4.2.2 Hız dağılımları ile türbülans modelleri karşılaştırılması

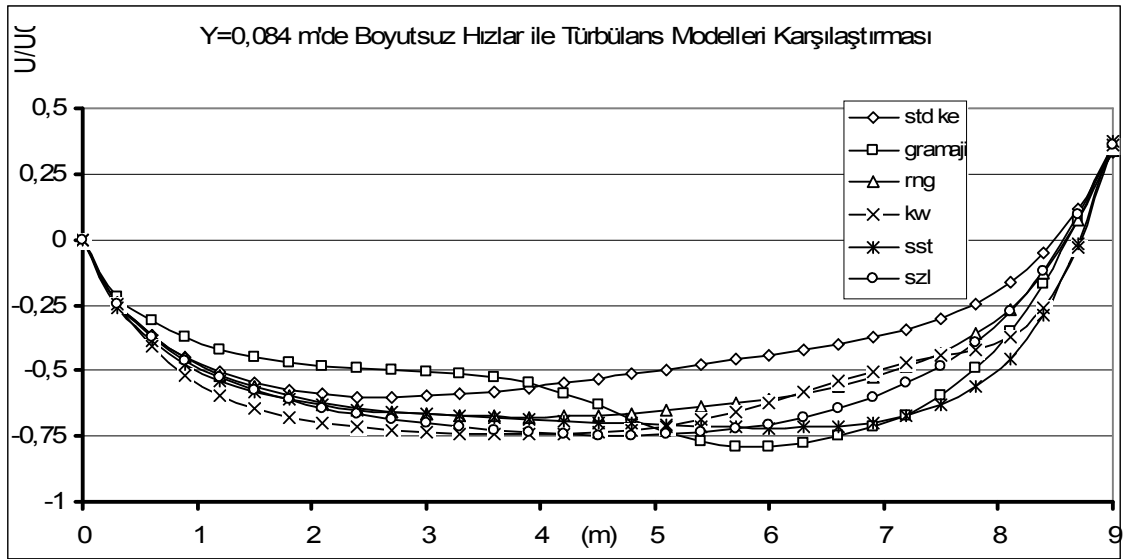
Bu bölümde hız dağılımları ile türbülans modellerinin karşılaştırılması çalışması yapılmıştır. Hız dağılımları $X=3$, $X=6$, $Y=0,084$ ve $Y=2,916$ metrelerdeki x yönündeki hız değerleri alınarak çıkarılmıştır. Literatürde eşsıcaklıklı olmayan durum için hız dağılımlarını içeren çalışma mevcut olmadığından sadece bu çalışmaya ait sonuçlara yer verilmiştir. Şekil 4.51 ve şekil 4.52 'de dikey yöndeki boyutsuz hızlar, şekil 4.53 ve şekil 4.54 'de yatay yöndeki boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılmıştır.



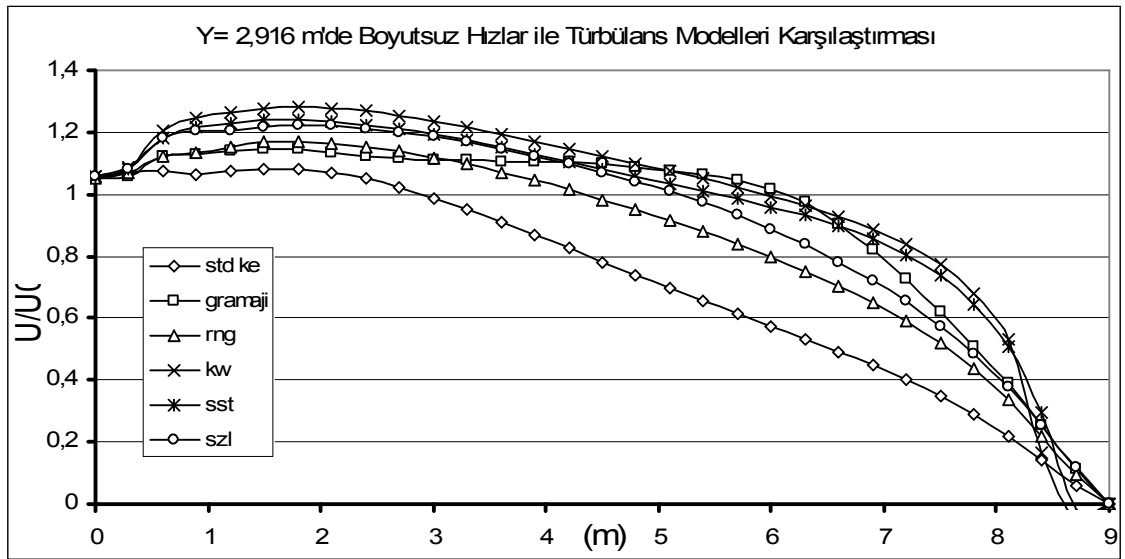
Şekil 4-51 Eşsıcaklıklı olmayan durum $X=3$ m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması



Şekil 4-52 Eşsıcaklıklı olmayan durum X=6 m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması



Şekil 4-53 Eşsıcaklıklı olmayan durum $Y=0,084$ m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması



Şekil 4-54 Eşsıcaklıklı olmayan durum $Y=2,916$ m 'de boyutsuz hızlar ile türbülans modelleri karşılaştırılması

4.2.3 CPU Çözüm Süreleri ile Türbülans Modelleri Karşılaştırılması

Bu bölümde CPU çözüm süreleri ile türbülans modelleri karşılaştırılmıştır. Eşsıcaklıklı olmayan test modeli çözümlerinin tamamı aynı yineleme ile yapılmış fakat bazı modellerde yakınsama sağlanamadığından ağ yapısı sıklaştırılarak çözüm

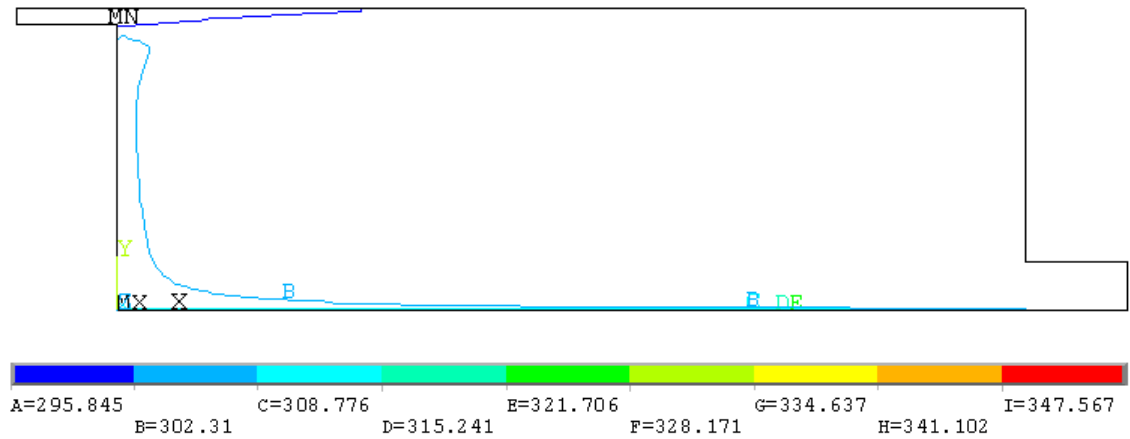
yapılmıştır. Karşılaştırmaların yorumlanırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Çözüm için kullanılan CPU zamanlarının karşılaştırması özellikle ticari uygulamalar için önemlidir.

Tablo 4.3 Eşsıcaklıklı olmayan test modeli çözüm CPU süreleri

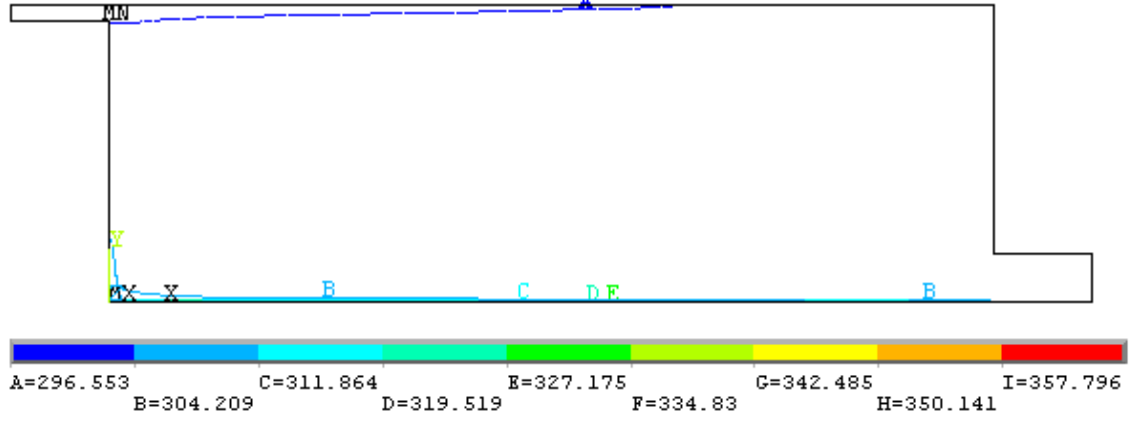
Eşsıcaklıklı olmayan Çözüm CPU Time		
Standart k-ε	724,17	5800 ağ yapısı
Girimaji	739,56	
RNG	759,94	
k-ω	1405,5	8800 ağ yapısı
SST	1427,1	
SZL	1364,9	
Zero Eq	1190,3	

4.2.4 Sıcaklık Dağılımları ile Türbülans Modelleri Karşılaştırılması

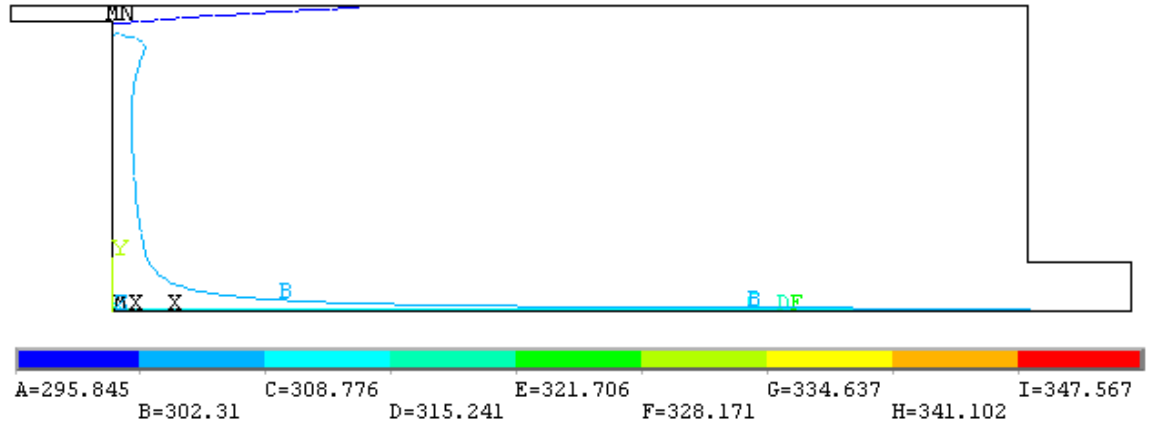
Bölüm 4.2.4 'de sıcaklık dağılımları literatürdeki az sayıdaki çalışma ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.55 – şekil 4.60 arasında bu çalışmaya ait sıcaklık dağılımları verilmiştir. Şekil 4.61 'de literatürden Lemaire (1991) 'in çalışmasına ait sıcaklık dağılımları verilmiştir. Literatürde $Ar=0,02$ olan tek çalışma Lemaire (1991) 'in çalışması olduğundan karşılaştırmada kullanılmıştır.



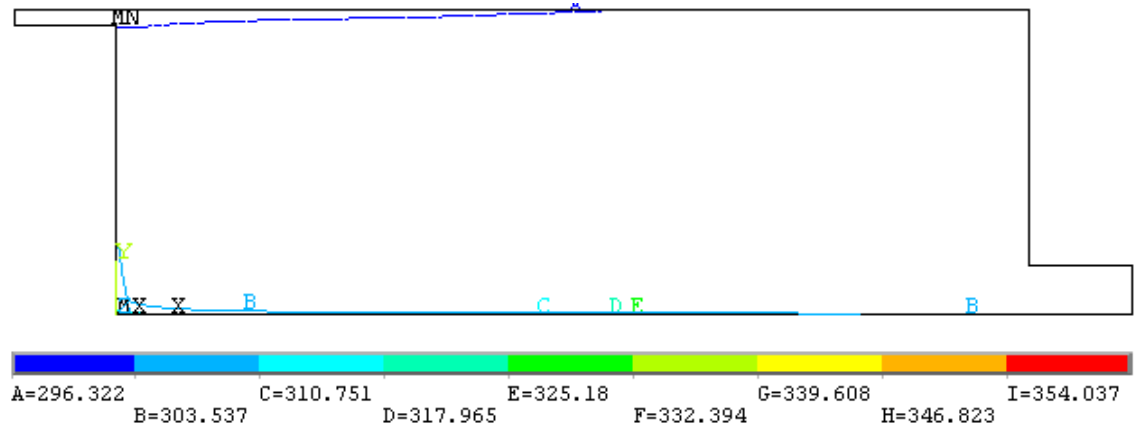
Şekil 4-55 Girimaji Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)



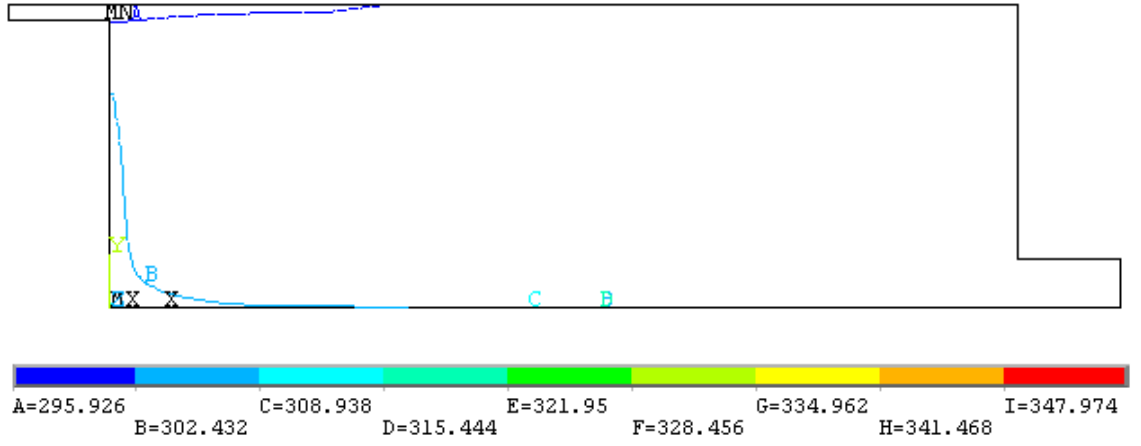
Şekil 4-56 K- ω Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)



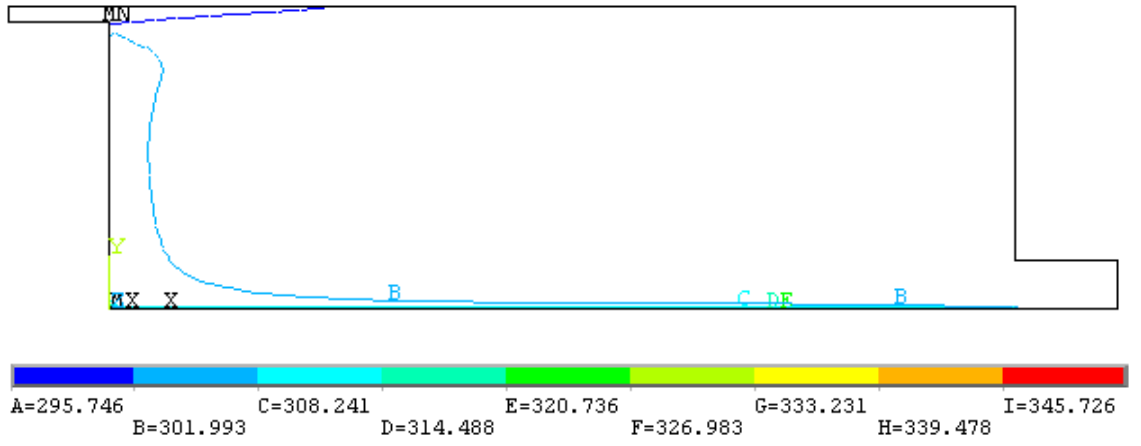
Şekil 4-57 RNG Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)



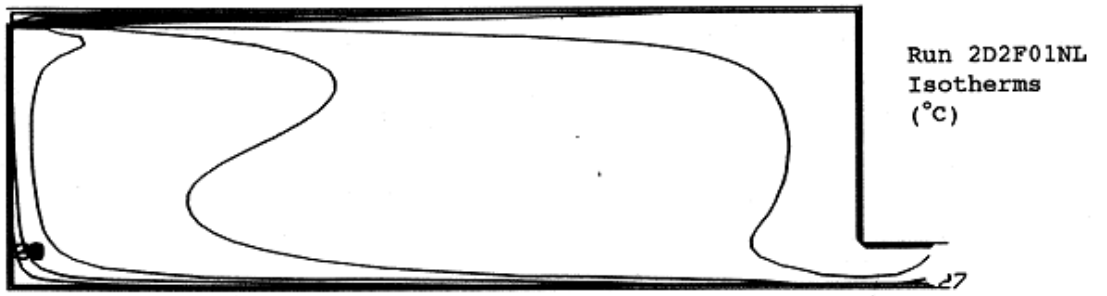
Şekil 4-58 SST Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)



Şekil 4-59 SZL Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)



Şekil 4-60 Std K-ε Türbülans Modeli Sıcaklık Dağılımı (Bu çalışma)



Şekil 4-61 Sıcaklık Dağılımı (Lemaire 1991)

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

Isıl konforun insan hayatındaki yeri gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada da görüldüğü üzere yaşam alanlarının tasarlanması esnasında HAD 'den yararlanmak vazgeçilmez bir uygulamadır. Bu sayede yaşam alanının hangi bölgesinin ısı konfor şartlarına uyduğunu tasarım aşamasında görmek mümkündür.

5.1 Isıl Konfor

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde eşsıcaklıklı durumda tüm türbülans modellerinde, yaşam alanında (yerden yüksekliğin 2,5 metreye kadar olduğu bölgede) hava hızının 0,25 m/s 'yi geçtiği bölge bulunmamaktadır. Eşsıcaklıklı olmayan durumda ise sabit ısı akısının etkisi görülmektedir. Bu durumda hava hızı yaşam alanında 0,4 m/s 'ye kadar ulaşmakta ve konforsuz bölgeler oluşturmaktadır. Tüm türbülans modelleri hava hızının bölgesel tespitinde birbirlerine yakın sonuçlar vermişlerdir.

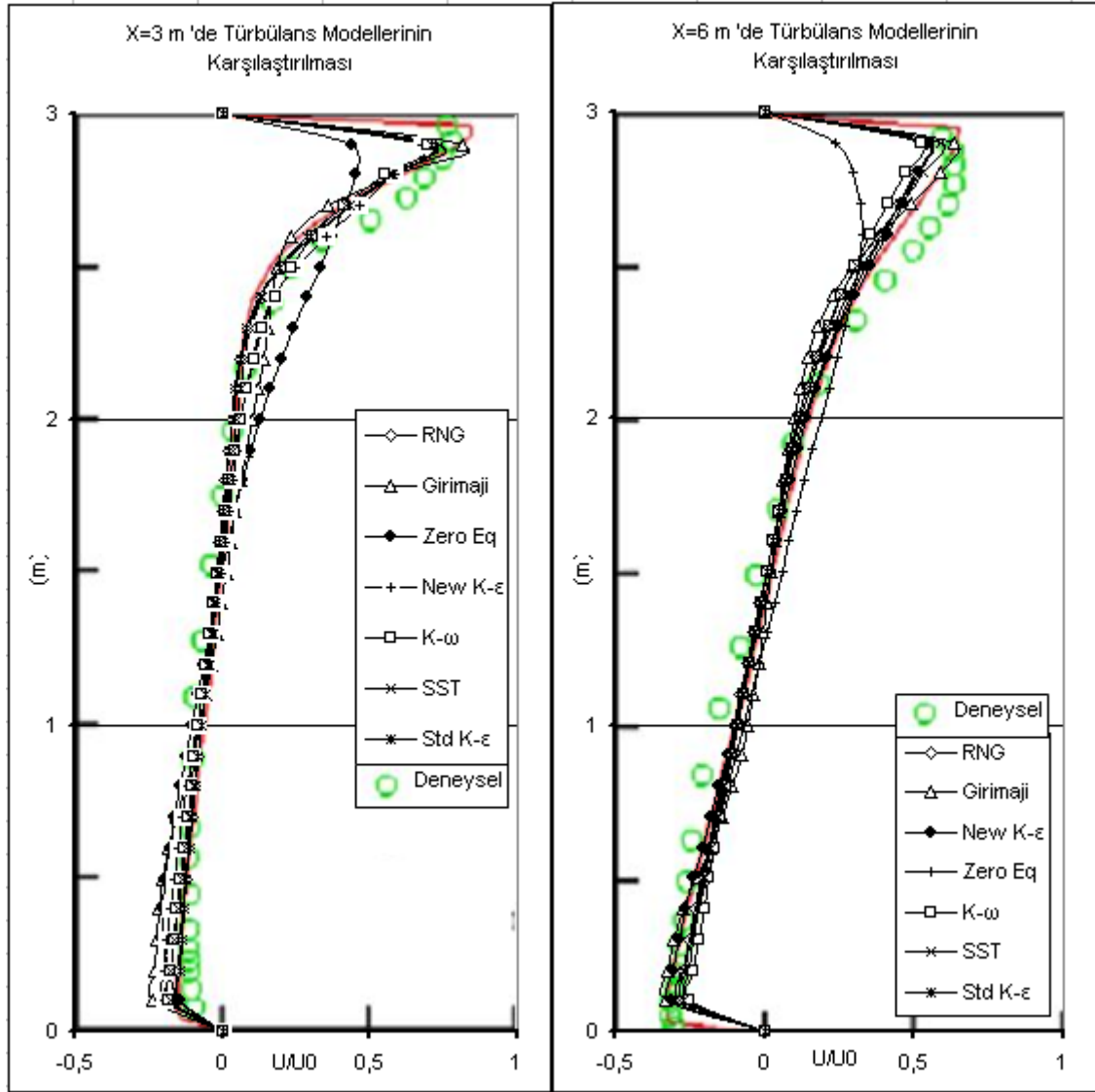
5.2 Akım Çizgileri

Eşsıcaklıklı durumda, her türbülans modeli akım çizgileri literatürdeki sayısal ve deneysel çözümler ile karşılaştırıldığında, her türbülans modeli kendi çözümüne yakın sonuçlar vermektedir. Çalışmada K- ω , SST ve Zero Equation türbülans modelleri diğer modellere göre sol alttaki türbülans bölgesini daha büyük tespit etmişlerdir. Nielsen (1974) 'de elde ettiği deneye ait görüntüde görüldüğü üzere sağ üst ve sol alt köşede türbülans bölgesi bulunmaktadır fakat bu bölgeye en yakın sonucu hangi modelin verdiğinin tespit edilmesi çok zordur.

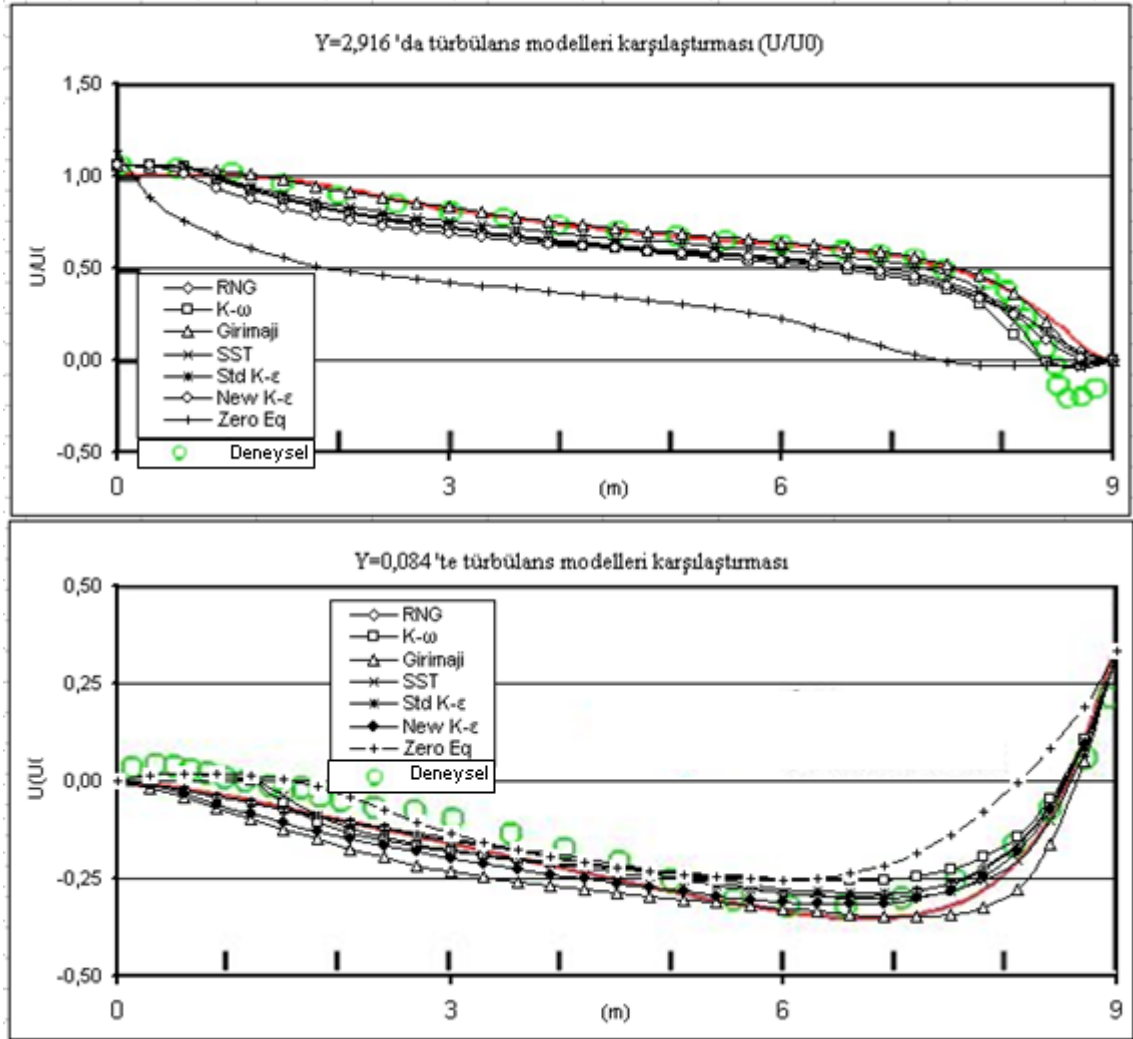
Eşsıcaklıklı olmayan durumda Lemaire (1991) 'in elde ettiği gibi köşelerdeki türbülans bölgeleri görülmemektedir. Tüm türbülans modelleri bu durumda birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir.

5.3 Hızların Karşılaştırılması

Eşsıcaklıklı durumda Şekil 5.1 – Şekil 5.4’ de tüm türbülans modellerinin yatay ve dikeyde belirlenen bölgelerdeki hız dağılımları verilmiştir. Türbülans modelleri karşılaştırıldığında Zero Equation türbülans modelinin gerek deneysel, gerek sayısal sonuçlarda en kötü sonuçları verdiği görülmektedir. Diğer türbülans modelleri deneysel çalışmalara yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 5-1 X=3 ve X=6 metrede tüm türbülans modellerinin, literatür ile karşılaştırılması



Şekil 5-2 Y=2,916 ve Y=0,084 metrede tüm türbülans modellerinin, literatür ile karşılaştırılması

Eşsıcaklıklı olmayan durumlar için literatürde hız dağılımları mevcut olmadığından hangi türbülans modelinin en doğru sonucu verdiği tespit etmek olanaksızdır. Genel olarak Girimaji ve Standart K- ϵ ayrık sonuçlar vermekte, diğer modeller birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir.

5.4 Ayrılma Noktaları

Bu çalışmada genel olarak türbülans modelleri, literatürdeki çalışmalara göre türbülanslı bölgeyi daha küçük tespit etmişlerdir. Bunun sebebi literatürdeki çalışmalarda yer çekimi ivmesinin hesaba katılmaması ya da akışkanın termodinamik

özelliklerinin değişmemesi olabilir. Literatürdeki çalışmalarda bu konu ile ilgili detaylı bilgi verilmemekle beraber, Voigt ve ark. (2003)' in çalışmasında 2 boyutlu test modelleri ile türbülans bölgesinin tam tespit edilemediği belirtilmiştir.

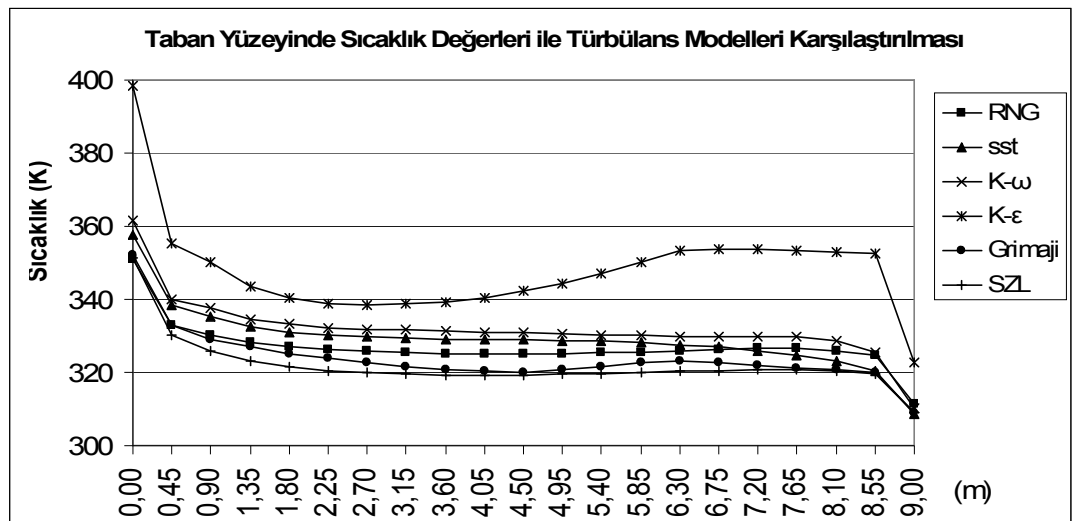
DeneySEL sonuçlar ile bu çalışma karşılaştırıldığında, tüm türbülans modelleri için ayrılma noktalarının tespitinde en iyi sonucu K- ω ve SST türbülans modeli vermektedir.

5.5 CPU Çözüm Süreleri

CPU çözüm süreleri karşılaştırıldığında Zero Equation türbülans modeli diğer modellere göre %75 oranında daha hızlı çözümler yapmaktadır. Ticari uygulamalarda bu durum ciddi avantajlar sağlamaktadır.

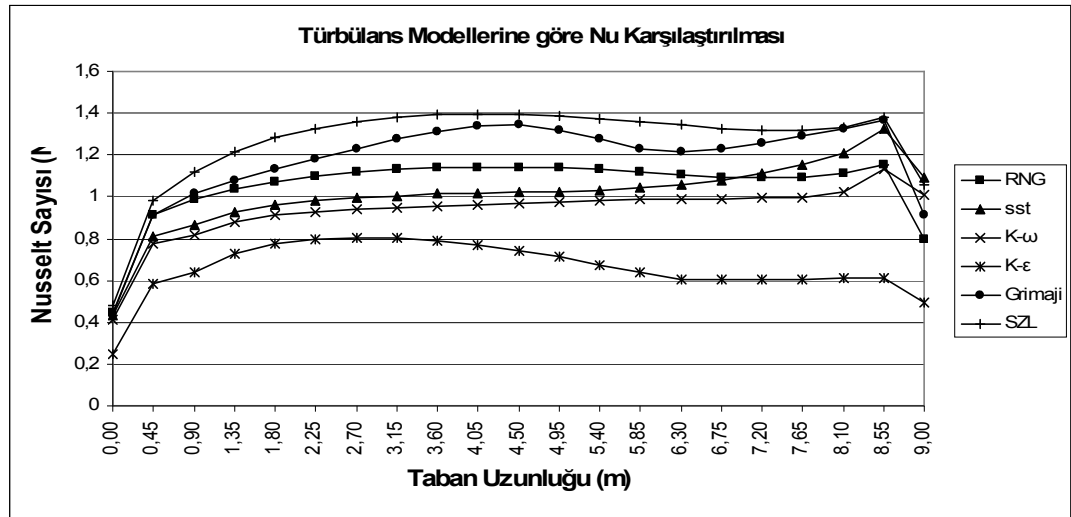
5.6 Nusselt ve Sıcaklık Karşılaştırması

Eşsıcaklıklı olmayan durumda taban boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 5-3 'de verilmiştir. Dağılımda görüleceği üzere Std K- ϵ modeli en yüksek sıcaklık değerini vermiştir. Ayrıca sol alttaki türbülans bölgesinin etkisi de sıcaklık farkı olarak görülmektedir.

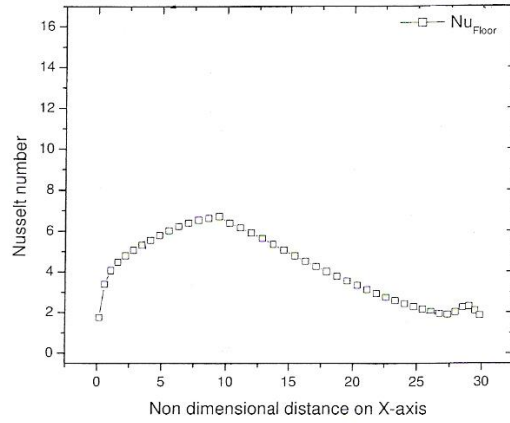


Şekil 5-3 Taban Yüzeyinde Sıcaklık Değerleri ile Türbülans Modelleri Karşılaştırılması

Eşsıcaklıklı olmayan durumda taban boyunca Nusselt sayısı değişimi Şekil 5-4 'de verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla benzer bir geometri için (Taban uzunluğu $L=6$ m) Nusselt sayısı değişimi de Şekil 5-5'de verilmiştir (Tripathi ve Moulic 2007). Bu çalışma laminer durum ($Re=2000$, $Ar=0.1$ ve tüm duvarlar sabit sıcaklıkta) için sayısal olarak elde edilmiş olup Annex 20 odası için deneysel Nusselt sayısı verileri olmadığı için göz önüne alınmıştır. Şekil 5-4 incelendiğinde Nusselt sayısı değişimi genel olarak aynı karakterde olmasına rağmen sayısal olarak farklılıklar göze çarpmaktadır. En yüksek Nusselt sayıları SZL türbülans modelinde en düşük Nusselt sayıları dağılımı ise std. k- ϵ türbülans modelinde elde edilmiştir. Bu durum doğrudan Şekil 5-3'deki sıcaklık dağılımlarıyla ilgili olup tabanda en yüksek sıcaklık dağılımları std. k- ϵ türbülans modelinde, en düşük sıcaklık dağılımları ise sırasıyla SZL ve Girimaji türbülans modellerinde elde edilmiştir. Diğer bir nokta türbülanslı Nusselt dağılımının Şekil 5-5'de laminer ve sabit sıcaklıklı durumla karşılaştırıldığında değişimin aynı eğilimde olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum bu çalışmadaki türbülanslı analizlerin izafi olarak nispeten düşük sayılabilecek Reynolds sayısında ($Re=5000$) yapılmasına yorulabilir.



Şekil 5-4 Türbülans Modellerine göre Nu Karşılaştırılması



Şekil 5-5 Tabanda Nu dağılımı, (Triphati ve Moulic 2007)

5.7 Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan görülmüştür ki standard $k-\epsilon$ türbülans modeli diğer yeni geliştirilen türbülans modelleriyle birlikte (New $k-\epsilon$, RNG, SZL, Grimaji, $k-\omega$, SST) hız dağılımlarında deneysel sonuçlara yakın sonuçları vermekte ve özellikle geniş ölçekli problemler de düşünüldüğünde popülaritesini sürdürmektedir. Fakat akış ayrılmalarının olması durumunda $k-\omega$ türbülans modeli kritik (ayrılma) noktaların tespitinde daha iyidir. Sıcaklık dağılımlarının elde edilmesinde en gerçekçi değerler SZL ve Girimaji türbülans modellerinde elde edilmiştir. Non-lineer cebirsel modellerin özellikle ısı transferi analizlerinde potansiyel vaat ettikleri söylenebilir. Zero-Equation türbülans modeli ise beklenildiği gibi hızlı sonuç vermesine rağmen, hız dağılımları diğer modellerle karşılaştırıldığında tercih edilmeyebilir. Sıcaklık analizlerinde ise bu modelde yakınsama elde edilememiştir.

Sonuç olarak her farklı durum ayrı olarak ele alınıp, türbülans modeli mahalın geometrisine, sınır şartlarına, çözüm için mevcut ekipman ve zaman bağlı olarak seçilmelidir.

İleride bu konuda yapılacak çalışmalarda üç boyutlu analizler denenebilir. Farklı geometrilerin akışa etkisi araştırılabilir. Giriş ve çıkış menfezlerinin yerleri değiştirilerek çalışma tekrarlanabilir. Bu çalışmada değinilmeyen modeller ($v2-f$, LES gibi) aynı geometride denenebilir. Ayrıca deneysel ısı transferi çalışmaları da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- AKGÜN F. 1997. Odadaki Hava Hareketinin Modellenmesi. ULIBTK' 97 11. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi. Edirne, 17 – 18 Eylül 1997, s. 260-269
- BAŞKAYA Ş. ve E.Ç. EKEN. 2006. Numerical Investigation of Air Flow Inside an Office Room Under Various Ventilation Conditions. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi – Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:12, Sayı: 1, Denizli. s. 87-95
- CHEN, Q. 1991. Simulation of Simple Test Cases. IEA Annex 20 Research, Item 1.46 Technical Report. Zurich, Switzerland. 10 p.
- ÇAKIR K. ve E. SAĞIR. 2002. Kapalı Mahallerde Termal Konfor, Havalandırma Sistemlerinde Yeni Nesil Menfezler ve Seçim Kriterleri. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6. Cilt, 3. Sayı, Sakarya. s. 46-51
- ERSOY, H. ve E. KARAOĞLU. 2007. Mekan İçi Hava Hareketlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Modellenmesi. Mühendis ve Makine Dergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Cilt:48, Sayı: 564, Ankara. s. 32-38
- ERTUĞRUL, Ş. F. , N. ESKİN, A. GÜNGÖR ve S. YILMAZ. 2005. Bir Ofis Binasının Değişken Hava Debili İklimlendirme Sisteminin Modellenmesi ve Kontrolü. VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. İzmir. s. 145-160
- KILIÇ, M. ve A. YİĞİT. 2000. Isı Transferi. Vipaş A. Ş. Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, No: 153, sıra no:29, Bursa. 415s.
- KUAS, G. ve Ş. BAŞKAYA. 2002. Havalandırılan Bir Ofis Odasında Hava Hareketinin Sayısal Analizi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 17, No:2, Ankara. s.35-52
- LAUNDER, B.E. ve D.B. SPALDING, (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289.
- LEMAIRE, A.D. 1991. Simulation of Simple Test Cases 2D1, 2D2. IEA Annex 20 Research, Item 1.46nl Technical Report. Netherlands. 12 p.
- LEMAIRE, A. D. 1993. Room Air and Contaminant Flow, Evaluation of Computational Methods. IEA Annex 20 Research, Technical Report. The Netherlands. 82 p.
- MENTER, F. R. (1994) Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, 32, 1598–1605.
- MCQUISTON, F.C. and J. D. PARKER. 1994. Heating, Ventilating, and Air Conditioning Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc. Fourth Edition, USA. 742 p.
- MOULIC, S. G. and B. TRIPATHI. 2007. Investigation of the Airflow Patterns Inside a Room Through the Low Re k- ϵ Model. Heat and Technology, India. 25(1): p. 25-31.
- NIELSEN, P.V. 1974. Flow in Air Conditioned Rooms: Model experiments and numerical solution of the flow equations . PhD thesis, Technical University of Denmark, 16p.
- NIELSEN, P.V. 1990. *Specification of a Two-dimensional Test Case*. Department of Building Technology and Structure Engineering. Aalborg University, 15p.
- NIELSEN, P.V. and L. RONG. 2008. Simulation With Different Turbulence Models In An Annex 20 Room Benchmark Test Using Ansys CFX 11.0. Aalborg University Department of Civil Engineering, DCE Technical Report No. 46, Aalborg, Denmark. 16 p.

- PULAT, E. 1997. Mikroelektronik Devre Elemanlarının Zorlanmış Taşınılma Soğutulmasının Simulasyonu. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa. 83s.
- PULAT E. ve M. KESEN, 2007. Bilgisayar Destekli Termoakış Analizi Doğrulama Çalışması. Uludağ Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Bursa. 23s.
- SİVRİOĞLU, M ve T. PIRASACI. 2005. Isıl Çevre Mühendisliği Esasları ve Uygulamaları. Alp Yayınevi, No: 22, Ankara. s. 50-51.
- TRIPHATI, B ve MOULIC, G, 2007. Investigation of the Air Flow Patterns Inside a Room Through the Low Re k-ε Model, Vol. 25, n.1, India
- VOGL, N. ve RENZ U., (1991) Simulation of Simple Two-Dimensional Test Cases: 2D1,2D2, IEA Annex 20, Research Item 1.46, Technical Report, RWTH, Aachen, Germany,
- VOIGT, F. K. 2000. Comparison of Turbulence Models for Numerical Calculation of Airflow in an annex 20 Room. Technical University of Denmark, DTU, Denmark, 39 s.
- VOIGT, F. K. , M. BRONS , J. N. SORENSEN and J. M. PEDERSEN. 2003. Review of Four Turbulence Models Using Topology. Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003 p.1325-1331. Building Simulation, 2003.
- VOIGT, F. K. 2005. Evaluating Turbulence Models for 3-D Flows in Enclosure by Topology. Ninth International IBPSA Conference. Montréal, Canada, August 15-18, 2005 p. 1293-1299. Building Simulation, 2005.
- YAKHOT, V. ve S. A. ORSZAG, (1986) Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory, J. Sci. Comput., 1, 1-51.
- WILCOX, D ve DAVID, C. (1988) Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models, AIAA Journal, 26, 1299–1310

ÖZGEÇMİŞ

Murat KESEN 1983 yılında Bursa 'da doğdu. İlkokul öğrenimini Gemlik 11 Eylül İlköğretim Okulunda, ortaokul ve lise öğrenimini Gemlik Celal Bayar Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. 2001 yılında girdiği Uludağ Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2005 yılında bitirmiş, aynı yıl Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Enerji Bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2007 yılında askerlik görevi için ara verdiği yüksek lisans eğitimini 2009 yılında tamamlamıştır. Kendisi evli ve halen Bursa 'da otomotiv sektöründe çalışmaktadır.

TEŞEKKÜR

Tüm öğrenimim boyunca bende emeği geçen aileme ve hocalarıma, tez çalışmamda benden emeğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT 'a ve tez yazım aşamasında emeği geçen eşim Ferah Kesen 'e teşekkürü borç bilirim.