

Çok Fazlı Akış Analizi İçin Türbülans Modeli ve Analiz Parametreleri Seçimi

Özgür İMRE^{1*}, Nureddin DİNLER²

¹Makine Mühendisliği A.B.D. / Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Makine Mühendisliği Bölümü/ Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Türkiye

*(ozgur.imre@gazi.edu.tr) Başlıca yazarın mail adresi

(Geliş Tarihi: 15 Haziran 2024, Kabul Tarihi: 27 Haziran 2024)

(3rd International Conference on Frontiers in Academic Research ICFAR 2024, June 15-16, 2024)

ATIF/REFERENCE: İmre, Ö. & Dinler, N. (2024). Çok Fazlı Akış Analizi İçin Türbülans Modeli ve Analiz Parametreleri Seçimi. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(5), 219-226.

Özet – Çok fazlı akış problemleri son derece maliyeti yüksek, analizi zor problemlerdir ve uygun modelin seçilmesi için karşılaştırma çalışması tam gelişmiş akışlar için zor olacaktır. Analizlerin belirlenen akış süresini en kısa gerçek zamanda ve incelenmek istenen parametreleri en doğru olacak şekilde çözmesini sağlamak için uygun türbülans modellerinin uygun parametreleri ile seçilmiş olması gerekmektedir. Bu karşılaştırma özellikle güncel çalışma gibi adaptif mesh üzerinden yürütülüyorsa parametre ve modellerin seçimi daha da önemli bir hal almaktadır. Çalışma çapraz akış etkisi altında jet akışının ayrılması ve sprej olarak modellenmesi problemi üzerine kurulduğu için seçilen modeller k ϵ -Standart, k ϵ -Realizable, k ω -Standart, k ω -SST ve k ω -SST LES Blended olmak üzere 5 tanedir. Bütün modeller yaklaşık 2 saatlik bir zaman için çözdürülüp değerlendirme bu aralık üzerinden yapılmıştır. Karşılaştırmalar için ANSYS FLUENT programı, adaptif çözüm ağı ve adaptif zaman adımlaması ile birlikte kullanılmıştır. Çok fazlı akış modeli olarak zamana bağlı VOF modeli kullanılmış ve çözümler arasındaki farklar verilmiştir. Karşılaştırma için kullanılan parametreler ise, iki saatlik simülasyonda ulaşılan maksimum akış zamanı, bir zaman adımı içerisindeki maksimum iterasyon sayısı, bir zaman adımı içerisinde geçirilen maksimum gerçek zaman değeri, iki saatin sonunda ulaşılan maksimum hücre sayısı, program tarafından tanımlanan ortalama fiziksel zaman (Δt) ve ortalama Courant sayısı değerleridir. Karşılaştırmalar hem iki saatlik koşullar için hem de belirli bir akış zamanına ulaşan modeller için yapılmış olup en uygun modelin kw-SST LES Blended modeli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler – VOF, HAD, Çok fazlı akış, adaptif mesh, Sprej, LJICF, LES

I. GİRİŞ

Gaz türbinli motorlarda yanmanın verimi birçok farklı parametreye bağlı olmakla birlikte yakıt hava karışımının uygun bir seviyede olması, sprej oluşumunun arzulanan seviyede, sıvı yakıt sütununun ayrılmasının istenilen lokasyonda olması ve bunun gibi yakıt-hava karışımı temelli parametreler ise oldukça önemlidir. Bu sebeple uzun süredir devam eden deneysel çalışmalar

süresinden kazanca geçinilmeye başlanmıştır. Lakin sayısal çalışmaların doğruluğu tanımlanan türbülans modeli ve onunla ilişkili parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermekte ve zaman zaman arzulanan kolaylıklar uygulamada sağlanamamaktadır. Bu sebeple türbülans modeli karşılaştırma çalışmasının yapılması, önceden belirlenen özelliklerin gözlemlenebilmesi için uygun analiz parametrelerinin kararının verilmesi hem zaman hem de analiz maliyetleri açısından

önceden belirlenen ortam koşulları ve yakıt-hava değişkenleri için yapılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar teknolojisinin gelişmesi ile de sayısal çalışmalar yapılmaya başlanmıştır ve literatürde bulunan deneysel çalışmalar ile bu sayısal çalışmalar doğrulanıp deney düzeneği ve

oldukça önem arz etmektedir. Çalışmanın amacı analiz parametrelerinden olan türbülans modeli seçimi ve bu seçimin etkilerinin karşılaştırılmasıdır. Çalışma sonunda ise spreyci modellemesi için en uygun türbülans modeli seçilecektir.

II. LİTERATÜR TARAMASI

Wu, Kirkendall, Fuller ve Nejad (1997), tarafından yapılan çalışmada su, etil alkol, %30 Alkol su karışımı, %40 gliserol su karışımlarının farklı nozul çıkış yarı çapları, jet hızı ve momentum akı oranları etkisi altındayken bozulma karakterlerini geniş bir deneysel çerçevede incelenmiştir. Yaptıkları deneysel çalışma ile sütun bozulması ile damlacık bozulması arasındaki analogiyi ortaya çıkartılmış ve hatta sütun ayrılma noktasının lokasyonunu damlacıklar üzerine yaptıkları çalışmalarla doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda momentum akı oranının ya da sıvı jet özelliklerinin bozulmanın eksenel yöndeki (x ekseninde) konumu üzerinde bir etkisinin olmadığını bulmuş olmalarıdır. Bu durum Rouaix ve diğerlerinin çalışması haricinde diğer bütün çalışmalarda gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarından biri de momentum akı oranını arttırdıkça (sıvının ataletinin gazın ataletine oranı) jetin deformasyona uğrayan kesit alanının uçlarındaki yüzey bozulmaları ve kopmalarının sütun ayrılmasından daha önce oluşacağıdır.

Stenzler, Lee ve Santavicca (2003), tarafından yapılan çalışmada su, aseton ve 4-heptanon için ses altı ve atmosfer koşullarında deneyler yapılmıştır. Bu deneyler momentum akı ve Weber sayılarını ayrı ayrı sabit tutarak biçimde farklı büyüklükteki parametreler ile gerçekleştirip ilgili sonuçlar ile bir veri tabanı oluşturmuştur. Daha sonra bu veri tabanından ısıtılmış ve ısıtılmamış çapraz akış hızları için denklemler çıkartılmıştır. Denklemlerin doğruluğunu yaptıkları deneysel çalışmanın verileri üzerinden gözlemleyip uygun determinasyon katsayıları bulunmuştur. Akış parametrelerinin ilgili sonuçlarla belirgin olarak verilmesi ve kullanılan deney gözlem alanının küçük olması sebebi ile sayısal çalışmalar için uygun bir deneysel çalışma olmuştur. Bahsi geçen çalışma aynı zamanda şu an da yürütülen çalışmanın da referansı niteliğindedir. Xiao, Sun, Liu, Zhang ve Zhang (2017), tarafından yapılan sayısal çalışmada çapraz hava akışının

ifade eden Volume of Fluid metodunun birleşimi olan CLSVOF metodu ile yapılmıştır. Algoritmalar ve metotlar özetlenmiş ve sonuç olarak hem ses üstü hem de ses altı çapraz akışta tahmin edilen bozulma noktaları gösterilmiştir.

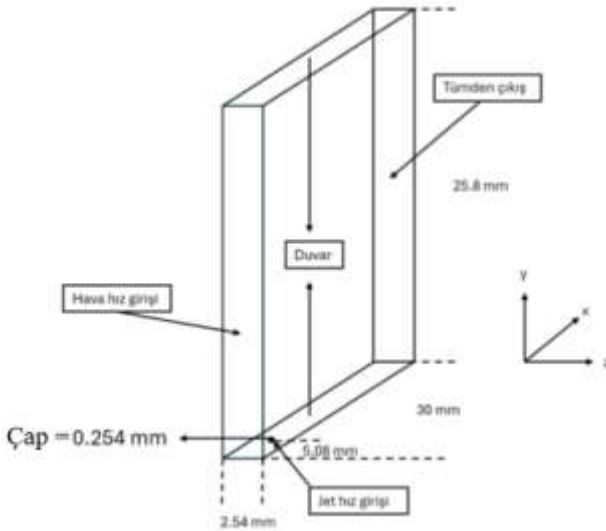
Rouaix, Stoukov, Bury, Joubert ve Legendre (2023), tarafından yapılan sayısal çalışmada çapraz akış içerisindeki jet akışı konusunu farklı bir perspektiften değerlendirmiştir. Çalışma literatürün üzerine oluşturulduğu yanma odası girişi için değil yangın söndürme uçaklarının daha büyük yarıçaplı (40 cm) nozul geometrileri için yapılmıştır. Çalışmada Star-ccm+ programı kullanılmış ve diğer çalışmaların aksine LES ya da DNS kullanılmamıştır. Türbülans modellemesi RANS ile yapılmıştır. Çalışma geometrinin (yangın söndürme uçağına dönüştürülen bir B747'nin alt kısmı) bir hesaplama alanı içerisinde modellenmesi ile ve uygun sınır koşullarının verilmesiyle başlamıştır. Daha sonra modele seyrek bir mesh atılarak ilk başta mesh yakınsaması incelenmiştir. Önceden belirlenen 14 durum içerisinde birisi seçilerek araştırmanın önemli gördüğü ve hesaplama maliyetlerinin el verdiği bir hacim oranında (volume fraction- VOF metodunda kullanılan ve grid içerisinde bulunan fazların oranı) mesh yakınsaması incelenmiştir. Bu çalışma 4 aşamadan oluşmakta olup bittikten sonra hesaplama alanı içerisinde 4 ayrı alanda 4 farklı boyutta polihedral meshlerden oluşmuş bir alan ortaya çıkarılmıştır. Bu yapı oluşturulduktan sonra ise türbülans modellerinin hacim oranlarına etkisi için ayrı bir çalışma yapılmış ve belirlenen 14 durumdan bir tanesi uygun olarak seçilip analizlere geçilmiştir. Jet sütununun maksimum uzunluklarının lokasyonları, sütun ayrılmasının başladığı lokasyonlar ve bu noktalar ile momentum akı oranı arasındaki ilişki belirlenmiş ve gerekli denklemler oluşturulmuştur.

Literatür görüldüğü gibi sayısal ve deneysel olmak üzere oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu çalışmalardan sayısal olanları türbülans

sıkıştırılabilirliğinin (ses altı veya ses üstü olması durumunda) birincil bozulmaya etkisini yüksek hızlarda ve normal sıcaklıklarda incelenmiştir. Jet ile hava arayüzünün takibi, arayüzü iyi takip edebilen ama sıvının ağırlığının takibinde o kadar da etkili olmayan Coupled Level Set (LS) ile sıvının hacmini ilgilenilen uzayın bir fonksiyonu olarak

III. PROBLEMİN TANIMI

Çalışma için seçilen problem belirli bir çapraz hava akışına bırakılan sıvı jet akışının doğru bir şekilde fiziksel sıvı sütunu bozunma aşamalarının simüle edilebilmesi için uygun türbülans modelinin seçimidir. Belirlenen problemin çözümü için Stenzler ve diğerlerinin [9] deney düzeneği kullanılmıştır. Deneyde akışın üst yüzey denklemlerini elde etmek için Stenzler ve arkadaşları çapraz akış hızı ve jet çıkış hızı ile oynayarak momentum akı oranı, Weber sayısı ve akışkanın suya oranlı viskozite oranı üzerinden denklemler çıkartmıştır.



Şekil 1. Geometri yapısı ve sınır koşulları

Model karşılaştırmasında kullanılan örnek model ise Şekil 1'de gösterilmektedir. Buna göre geometri 25.8 mm yüksekliğinde, 28.9 mm genişliğinde ve 100 mm uzunluğunda iken hesaplama maliyetini düşürmek için bazı limitasyonlarda bulunulmuştur geometri üzerinde. Deneysel çalışma incelendiğinde jetin sütun ayrılmasının gerçekleştiği lokasyon verilen girdi parametreleri ile değişmekle birlikte bütün deneylerde belirli bir noktadan sonra bu değerler sabit veya belirli bir eğilim üzerinden devam etmektedir. Akışın bu

modellemesinin teknik bölümüne ışık tutacakken deneysel olanları ise bozunmaya uğrayacak sıvı jet sütununun (ki çalışmanın bu kısmı için bu sıvı su olarak baz alınacaktır) fiziksel olayları simüle edebilme yeteneğine göre değerlendirilecektir. Sonuçlar bir sonraki bölümde sebepleri ile birlikte verilmektedir.

sonrasında yapılan çalışmalar göstermektedir ki seçilen limitler akışı modellemek ve yüzey denklemlerini çıkartmak için yeterlidir.

Tablo 1. Test koşulları

Parametre	Su
Hava hızı (m/s)	30-110
Hava sıcaklığı (°C)	18-300
Yakıt hızı (m/s)	3.2-20.3
σ (N/m)	0.0728
μ (Ns/m ²)	10.02x10 ⁻⁴
ρ (kg/m ³)	998
Momentum akı oranı	18,27,36
We	1.9-39.6

Analizlerde kullanılan parametreler, Stenzler ve diğerlerinin [9] çalışmalarından seçilmiş olup yine doğrulaması aynı deneysel çalışma üzerinden yürütülmüştür. Doğrulama olarak ise akış üst yüzey güzergahı, kopma noktasının x ve y koordinatları, sıvı jet sütununun ayrılmasının doğru bir şekilde modellenebilmesi ve spray modellemesi kullanılmadan, yani sıvı kütleciklerinin (lump) otomatik olarak spray taneciklerine dönüştürülmeden seçilen türbülans modelinin damlacık oluşturma performansı parametreler olarak seçilmiştir.

IV. MATERYAL VE YÖNTEM

Karşılaştırma için kullanılan parametreler, iki saatlik simülasyonda ulaşılan maksimum akış zamanı, bir zaman adımı içerisinde maksimum iterasyon sayısı, bir zaman adımı içerisinde geçirilen maksimum gerçek zaman değeri, iki saatin sonunda ulaşılan maksimum hücre sayısı (ilk hücre sayısı yaklaşık 336000'dir), program tarafından tanımlanan ortalama fiziksel zaman (dt) ve ortalama Courant sayısı değerleridir. En son belirtilen iki parametre simülasyonda yakınsayan her adımında değiştiği için çok belirleyici olmamakla birlikte incelemeye tabii tutulmuştur. Tüm bunlar göz önünde tutularak çalışma iki kısma ayrılmıştır bunlar sabit bir gerçek zaman

gelişimi ve sonrası çalışılan konunun bir parçası olmadığı için geometri akışın incelenmek istendiği konuma göre sınırlandırılmıştır. Buna değişikliklere göre geometri 25.8 mm yükseklik, 2.54 mm (10 enjektör çaplık mesafe) genişlik ve 30 mm uzunluk ile sınırlandırılmıştır. Model doğrulaması

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q v_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \quad (1)$$

\dot{m}_{qp} ve \dot{m}_{pq} ifadeleri fazlar arasındaki geçişleri ifade etmektedir. VOF denklemi birincil faz için çözülmeyecektir. Karışım için momentum denklemi [1] ise,

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \partial(\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla(\mu(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T)) + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad (2)$$

Bütün sıvıların karışımı için sadece yukarıda gösterilen momentum denklemi çözülür ve elde edilen hız değerleri fazlar arasında paylaştırılır. Momentum denklemi tüm fazların hacimsel oranlarına ρ ve μ değerleri üzerinden bağlıdır. Karışım için enerji denklemi [1] ise,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T - \sum_q \sum_j h_{j,q} \bar{J}_{j,q}) + (\bar{\tau}_{eff} \bar{v}) + S_h \quad (3)$$

Dikkat edilmesi gereken nokta ise, momentum denklemleri için nasıl 1E3 viskozite limiti varsa burada da çok yüksek sıcaklık farklarının olduğu çözümlenelerde yakınsama problemi yaşanacaktır.

V. SONUÇLAR

Çalışmanın ilk analiz grubu ile elde edilen amaç belirli gerçek zamanlı çözüm süresi üzerinden ulaştığımız maksimum değerlerimizi belirlemek ve gerekli karşılaştırmaları yapabilmektir. Bu kapsamda aşağıdaki tablo elde edilen ilk sonuçlar arasında yer almaktadır. Tablo 1'de gösterilen verilerin ışığında $k\epsilon$ modelleri içerisinde $k\epsilon$ -Realizable modelinin probleme maliyeti en karşılanabilir mesh sayısı artışı ve en uygun aralıktaki Courant sayısı ile yaklaştığı görülmektedir.

için (2 saat olarak seçilmiştir.) elde edilen değerler ve sabit akış zamanı için elde edilen değerler.

Kullanılan denklemler ise süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin VOF parametresi eklenmiş versiyonları olup uygun denklemler Ansys theory guide[1]'dan alınmıştır.

Bu model bir zaman adımı içerisinde her iterasyonda 1 sn. harcarken, çıktı olarak verdiği göreceli olarak yüksek dt ve düşük Courant sayısında çok fazlı akışkan modellemelerinde arzu edilen bir durumdur. $k\epsilon$ modelleri içerisinde $k\epsilon$ -Realizable modeli ile daha hızlı, düşük Courant sayısından ötürü sınırları daha belli ve göreceli olarak daha yüksek fiziksel zamandan ötürü daha fazla sonuç (diğer modellerle karşılaştırıldığı zaman neredeyse iki katı verinin işlendiği durumlar mevcuttur.) alabiliriz. Çizelge ve değerler göz önüne alınınca $k\epsilon$ -Realizable modelinin $k\epsilon$ -Standart modelden daha uygun bir seçim olduğu gözlemlenmektedir. $k\omega$ modelleri arasındaki karşılaştırma, modelin yetkinliklerinin sadece eldeki veriye bakarak değerlendirilmesinin zor olmasından ötürü biraz daha karmaşıktır. Yine de $k\omega$ -Standart ve $k\omega$ -SST modellerine bakılınca, standart model her ne kadar mesh sayısını artırırsa da daha düşük Courant sayısı ve daha yüksek fiziksel zamanla daha fazla veri işlemiştir. Bu da standart modelin çok daha hızlı olduğu anlamına gelir. $k\omega$ -Standart ve $k\omega$ -SST Blended modelleri arasında karşılaştırma yapacak olursak, Blended modelin mesh sayısı önemli ölçüde az olmasına

rağmen, toplam akış süresi benzer mertebelindedir. Bu iki model arasında da hem grafik bazlı hem de sabit akış süresi bazlı detaylı inceleme gereklidir. $k\epsilon$ -Realizable, $k\omega$ -Standart ve $k\omega$ -SST LES Blended arasındaki ayrım çok belirgin olmamakla birlikte bir akış analizinde özellikle de çok fazlı akışkanlar gibi her iki fazında türbülans denklemlerinden etkilendiği durumlarda doğru türbülans modeli seçimi son derece önemlidir. Aynı fiziksel olayın aynı durumunu karşılaştırdığımızdan emin olmak için aynı akış

Tablo 2. Sabit gerçek zamanlı analiz sonuçları

	kε-Standart	kε-Realizable	kω-Standart	kω-SST	kω-SST LES Blended
Akış Süresi (s)	0.001574	0.002672	0.001969	0.000953	0.001582
Z.A.B. Maksimum İterasyon	6	6	8	6	7
Z.A.B. Gerçek Zaman	6	6	8	11	9
Son Mesh'in Hücre Sayısı	689439	693217	796012	644376	633775
Ort. Fiziksel Zaman (dt)	2.30e-07	4.48e-07	4.63e-07	1.65e-07	3.25e-07
Ort. Global Courant Sayısı	2.000	1.604	1.808	2.120	1.710

* Z.A.B. Zaman Adımı Başına

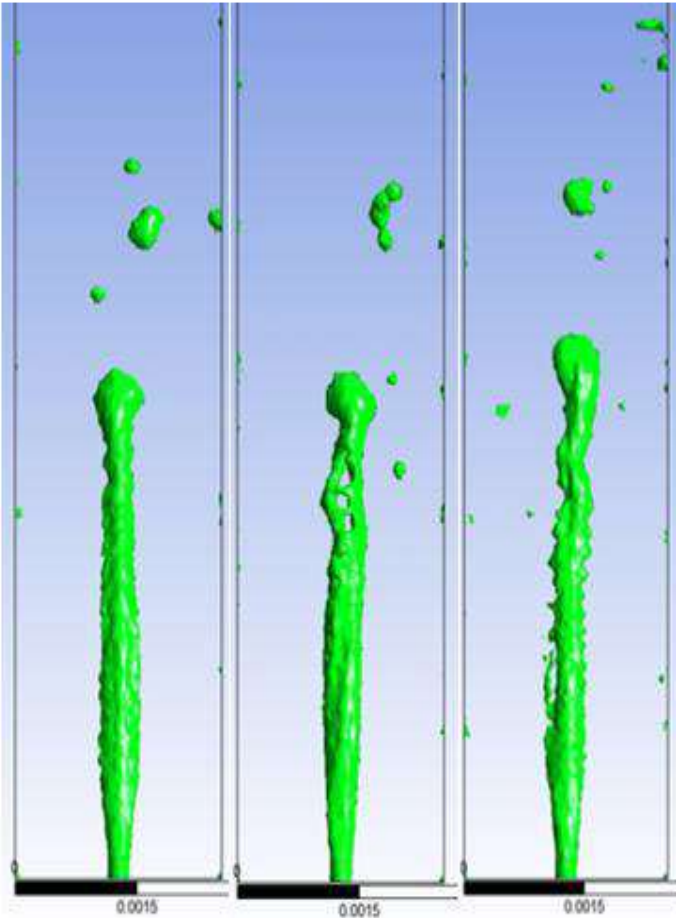
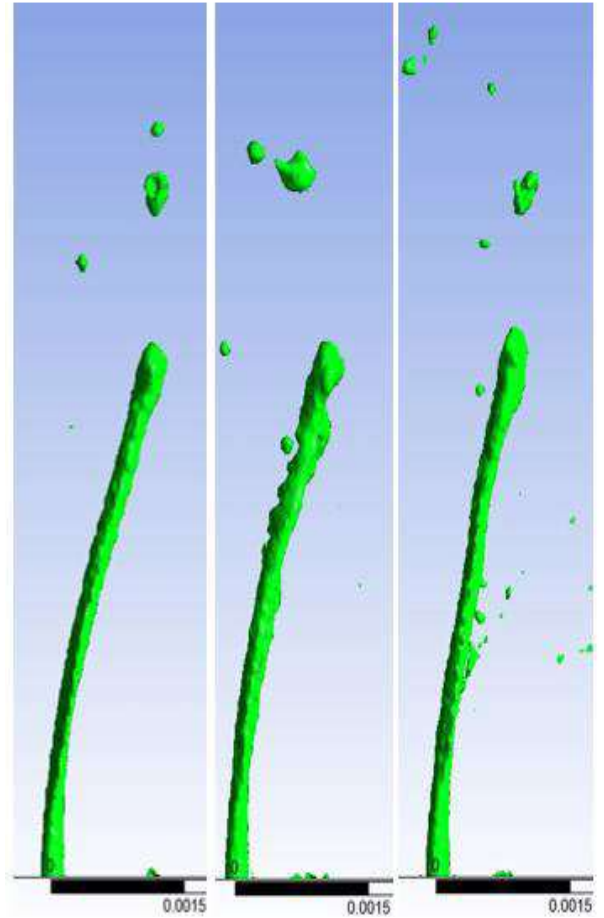
süresi için bütün modelleri hem verilere dayanarak hem de görsel olarak karşılaştırması gerekir. Bu karşılaştırmayı sağlıklı bir şekilde yaptığımızda, aynı akış süresi için her modelin hücre sayısını ne kadar arttırdığı, bu arttırılan hücre sayısı ile yapılan iterasyonlarda ne kadar süre harcandığı, kaç iterasyonla bir zaman adımında yakınsadığı ve ortalama Courant sayısının değeri gibi önemli parametreler hakkında bilgi sahibi olunacaktır. Öyle ki Courant sayısının değeri aslında hem simülasyonun güvenilirliği hem de değerlerin doğruluğu hakkında bilgi vermektedir. Bu sayının analiz içinde izin verilen değeri 250, ideal değeri 0.5-1 arasında bu analiz için uygun görülen değeri ise 1-2 arasındadır. Bu değer gereğinden fazla hücre de atlama yapmaya engel olacakken görselleştirme açısından da ideal bir aralık olacaktır. Bu sebeplerden ötürü bu ikinci karşılaştırma önceki analizlerde elde ettiğimiz en düşük akış süresi üzerinden ve aynı fiziksel durumdaki parametreler ile yapılacaktır. Bundan sonra modellerin görsel karşılaştırmasına da yer verilecektir. Önceden sunulan verileri inceleyerek kε-Standart ve kω-SST modellerinin amacımıza uygun olmadığını belirtmiştik. Ama hem sağlıklı bir karşılaştırma hem de ikinci defa kontrol amacıyla bu modeller de bu karşılaştırmaya dahil edilip en düşük akış süresi olan kω-SST'nin çözümü karşılaştırma temeli olarak alınmıştır. Çizelge incelendiğinde görülüyor ki kε-Standart ve kω-SST modellerinin elenmesi işlemi gerçekten de doğru bir tercihtir.

Bu modeller daha düşük fiziksel zamanla (-ki bu değer küçüklüğü simülasyonun süresini uzatacaktır.), bir zaman adımı içerisinde daha fazla zaman harcayıp yüksek Courant sayılarıyla daha fazla hücre atlamışlardır. Diğer üç türbülans modeli içinse her ne kadar görsel karşılaştırma gerekli olsa da kesin olan kω- Standart türbülans modelinin daha üstünkörü yaklaşımı yüksek Courant sayısı değerinden ötürüdür. Durumun böyle olması adapte edilmiş bir mesh'te hedef Courant sayısını yakalayabilmek için daha küçük zaman adımları ile analize girmesine neden olmuştur. Bu türbülans modelinin Courant sayısı, zaman aralığı ve mesh sayısı arasındaki ilişki giderek küçük mertebelerde devam edecek ve belirli bir akış süresi sonrasında (damlacık oluşumu ile bağımsız mesh sıklaştırma başladıktan sonra) bu değişimler zaman adımı içerisindeki çözüm süresini hücre sayısının fazlalığından ötürü gereksiz bir biçimde uzatacaktır. Bu da sonucunda analiz süresinin uzamasına ve yeterli veri elde edilememesine sebep olacaktır. Bir sonraki adım ise görsel karşılaştırmanın yapılmasıdır. Karşılaştırma için aynı akış sürelerine denk gelen zaman adımları baz alınmıştır. Karşılaştırma yaparken kε -Realizable modelinin 2057. zaman adımı, kω-Standart modelinin 2783. zaman adımı ve kω-SST LES Blended türbülans modelinin de 2795. zaman adımları baz alınmıştır. Bu zaman adımları 0.9 ms'ye denk gelen adımlardır.

Tablo 3. Sabit akış zamanlı analiz sonuçları

	$k\varepsilon$ -Standart	$k\varepsilon$ -Realizable	$k\omega$ -Standart	$k\omega$ -SST	$k\omega$ -SST LES Blended
Akış Süresi (s)	0.000953	0.000953	0.000953	0.000953	0.000953
Z.A.B. Maksimum İterasyon	6	7	6	6	7
Z.A.B. Gerçek Zaman	6	7	6	11	7
Son Mesh'in Hücre Sayısı	574454	567487	553420	644376	556821
Ort. Fiziksel Zaman (dt)	2.47e-07	4.60e-07	3.16e-07	1.65e-07	3.22e-07
Ort. Global Courant Sayısı	2.006	1.598	1.902	2.120	1.731

* Z.A.B. Zaman Adımı Başına

Şekil 2. $k\varepsilon$ -Realizable, $k\omega$ -Standard ve $k\omega$ -SST LES Blended ön görünüşleriŞekil 3. $k\varepsilon$ -Realizable, $k\omega$ -Standard ve $k\omega$ -SST LES Blended yan görünüşleri

Yukarıdaki ön görünüşlerden anlaşılacağı üzere $k\varepsilon$ -Realizable modeli her ne kadar yüzey dalgalanmalarını, KH (Kelvin-Helmholtz) ve RT (Rayleigh-Taylor) düzensizliklerini iyi bir şekilde modelleyebilse de akımın ayrılması konusunda güçlük yaşamaktadır. Jetin genel gidişatını belirlemek için uygun bir model olsa da fiziki kopmaların ve ayrılmaların yaşanacağı kısımlarda yanıltıcı sonuçlar verecektir. Damlacık modellemesi içinde uygun değildir. Az sayıda kopan parçacık modellediği için spray özellikleri de kötü olacaktır. İleride yapılabilecek

Önceden de bahsedildiği üzere epsilon modeli her ne kadar sıvı sütununun genel gidişatını iyi modellese de görüleceği üzere akımın ayrılmasında bariz eksiklikleri vardır. Bu eksiklik gelecek çalışmalar yapılacak damlacık modellemelerinin de sorunlu olmasına yol açacaktır. Çünkü damlacık modellemeleri sıvı yüzeyinden kopan yığınların (lump) belirli parametreler ile damlacığa dönüştürülmesi sonucunda elde edilir. $k\omega$ modellerinde bu sorun çözülmüş durumdadır. Bu türbülans

VOF-to-DPM çalışmaları için yanıtıcı olacaktır. Öte yandan her iki $k\omega$ modeli de sıvıyı daha ayrıştırılabilir bir şekilde çözmektedir ve çok daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Sıvı sütunu üzerindeki dalgalanmalar ve düzensizlikler de bariz bir şekilde belirli olmaktadır. Ke her ne kadar yüksek akış süresi ve düşük Courant sayısı çıktısı ile daha belirgin çözümler üretse de sıvının ayrılması ve damlacık oluşumu konusunda yaşadığı bariz eksiklikleri nedeniyle seçilmemiştir.

modelleri sütun yapısını epsilon modeli kadar iyi çözerken küçük elemanların ayrışması sorunu da çözülmüş durumdadır. Omega modellerinden birinin seçimi sonucunda hem spray oluşumu hem de kopma/ayrılma problemleri rahatlıkla çözülebilecektir. Bu modeller arasından $k\omega$ SST LES Blended modeli hem düşük Courant sayısı hemde az sayıda hücreye sahip mesh yapısı ile çözüme en uygun modeldir.

VI. TARTIŞMA

Çalışmanın sonucunda karşılaştırma da kullanılan 5 türbülans modelinden en uygun olanının akış süresi, Z.A.B. maksimum iterasyon, son çözüm ağının hücre sayısı, ortalama fiziksel zaman (dt) ve ortalama Courant sayısı gibi değişkenleri göz önüne alarak $k\omega$ -SST LES Blended olduğuna karar verilmiştir. Bu sayede en kısa sürede spray özelliklerinin de kolayca modellenmesini sağlayacak en optimum türbülans modeli ile çalışılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] ANSYS, (2021) Ansys Fluent Theory Guide.
- [2] Bravo L., Kim D., Ham F., Kerner K., (2018) High Fidelity Simulations of Primary Breakup and Vaporization of Liquid Jet in Crossflow, *AIAA* 2018-4683.
- [3] Chuech S. G., Przekwas A. J., Singhal A. K., (1991) Numerical Modeling for Primary Atomization of Liquid Jets, *AIAA* Vol. 7:6, 879-886
- [4] Gorokhovski M., Herrman M., (2008) Modeling Primary Atomization, *Annual Review of Fluid Mechanics* Vol. 43, 343-366.
- [5] Mirjalili S., Jain S. S., Dodd M. S., (2017) Interface Capturing Methods for Two Phase Flows: An Overview and Recent Developments, *Center for Turbulence Research Annual Briefs*, 117-135.
- [6] Wu P. K., Kirkendall K. A., Fuller R. P., Nejad A. S., (1997) Breakup Process of Liquid Jets in Subsonic Flow, *Journal of Propulsion and Power* Vol.13:1, 64-73.
- [7] Xiao F., Dianat M., McGuirk J.J., (2013) Large Eddy Simulation of Liquid-Jet Primary Breakup in Air Crossflow, *AIAA* Vol.51, No.12.
- [8] Grosshans H., Movaghar A., Cao L., Oevermann M., Szász R. Z., Fuchs L., (2016) Sensitivity of VOF Simulations of the Liquid Jet Breakup to Physical and Numerical Parameters, *Computers and Fluids* 136 (2016) 312-323.

- [13] Ragucci R., Bellofiore A., Cavaliere A., (2007) Breakup and Breakdown of Bent Kerosene Jets in Gas Turbine Conditions, *Proceedings of the Combustion Institute* 31 (2007) 2231-2238.
- [14] Xiao F., Dianat M., McGuirk J.J., (2013) Large Eddy Simulation of Liquid-Jet Primary Breakup in Air Crossflow, *AIAA* Vol.51, No.12.

- [9] Stenzler J. N., Lee J. G., Santavicca D. A., (2003) Penetration of Liquid Jets in a Crossflow, *AIAA* 2003-12327.
- [10] Li X., Soteriou M. C., (2018) Detailed Numerical Simulation of Liquid Jet Atomization in Crossflow of Increasing Density, *International Journal of Multiphase Flow* Vol. 104, 214-232.
- [11] Pai M. G., Pitsch H., Desjardins O., (2009) Detailed Numerical Simulations of Primary Atomization of Liquid Jets in Crossflow, *AIAA* 2009-373.
- [12] Rouaix C., Stoukov A., Bury Y., Joubert D., Legendre D., (2023) Liquid Jet Breakup in Gaseous Crossflow Injected Through a Large Diameter Nozzle, *International Journal of Multiphase Flow* Vol. 163, 104419.