

FIRLATMA RAMPALARINDA ATEŞLEME AŞIRI BASINÇ DALGALARININ HAD ANALİZİ

Murat Özüm DURU¹
ODTÜ Havacılık ve Uzay
Mühendisliği, Ankara

Sinan Eyi²
ODTÜ Havacılık ve Uzay
Mühendisliği, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada amaç 45 derece eğimli bir rampa üzerine yerleştirilmiş 2 boyutlu düzlemsel bir jetten üretilen ateşleme aşırı basınç dalgalarını(ignition over pressure) ve başlangıç girdaplarının(starting vortex) CFL3D isimli hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı ile incelenmesidir. İkinci derece fiziksel ve sözde(pseudo) zaman terimleri kullanılarak fırlatma ortamının HAD simülasyonları için gerekli uzaysal ve zamansal çözünürlük gereksinimlerini araştırmak amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu analizlerde çözüm alanındaki iki noktadan elde edilen basınç değerleri yorumlanmıştır ve farklı HAD programı kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.. Elde edilen sonuçlardaki program farklılıkları yorumlanmıştır. Seyrek ağ yapısı ateşleme aşırı basınç dalgaları(ignition over pressure) için yeterlidir ancak dalgalanma katmanları(fluctuation of shear layer) için daha sık ağ yapıları gerekmektedir. Ek olarak, CFL sayısının 4 ya da daha küçük olduğu zaman aralıkları yeterli sonuç vermektedir.

GİRİŞ

Ateşleme sırasında roket motorları büyük boyutta ateşleme aşırı basınç dalgaları üretir. Lüleden çıkan gazlar rampa ve lüle arasındaki bölgede şok ve genişleme dalgaları oluşturur. Oluşan şok ve genişleme dalgaları birlikte hareket ederek rampa boyunca ilerler. Yansıyan ateşleme aşırı basınç dalgaları fırlatma aracına doğru geri yansiyabilir. Bu yansımalar fırlatma aracının yapısal bütünlüğüne zarar verebilir ve stabilitesini etkileyebilir.

Ateşleme aşırı basınç dalgaları azaldığında da fırlatma akustiği önemli hale gelir. Türbülanslı lüle jetinin ortamla etkileşimi ve rampaya çarpmasıyla akustik dalgalar oluşturur. Bu akustik dalgaların sebep olduğu yapısal titreşimler fırlatma aracının elektroniğine ve faydalı yüküne zarar verebilir. Ateşleme aşırı basınç dalgaları ve fırlatma akustiğinin doğru analizi başarılı fırlatma için önemlidir. Analiz için kullanılan yöntemlerden biri ikinci derece fiziksel ve sözde zaman terimleri kullanılarak yapılan zamana bağlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarıdır. Her fiziksel zaman adımından sonra sözde zamanlı zamandan bağımsız hesaplama yapılarak analizin kararlılığı artırılır.

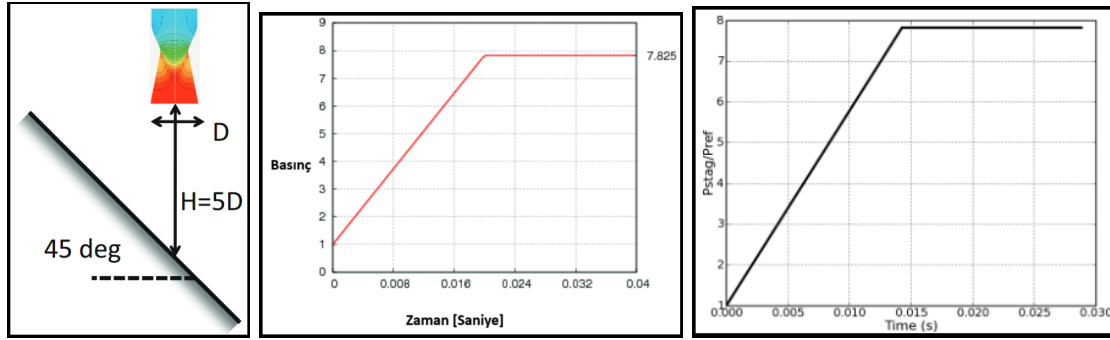
¹Murat Özüm DURU, ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ozum.duru@metu.edu.tr

²Prof. Dr. Sinan Eyi, ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: seyi@metu.edu.tr

YÖNTEM

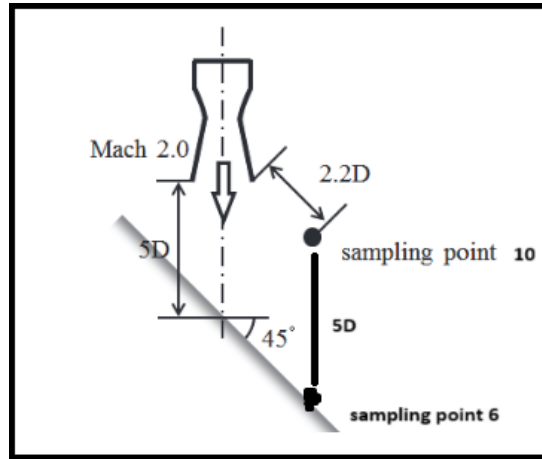
Modelleme

0.1 metre genişliği olan 2 boyutlu düzlemsel lüle, 45 derece eğimli rampanın 0.5 metre uzağına yerleştirilmiştir. Lülenin genişleyen kısmı 15 derecelik düz duvarlara sahiptir ve çıkışında 2 mach hıza ulaşır. Yanma odasının basıncı fırlatma ortamını simüle etmesi için ortam basıncından başlayarak, 2 mach için gerekli basınca ulaşana kadar 10. nokta için 0.02 saniye ve 6. nokta için 0.014 saniye içerisinde arttırılır.



Şekil 1: Problem Geometrisi, 10. Noktanın Yanma Odası Basıncı Geçmişi [Fujii, Nonomura,, Shima, Takaki ve Tsutsumi, 2012], 6. Noktanın Yanma Odası Basıncı Geçmişi [Toshiaki, Nagata, Takaki, Tsutsumi ve Ueda, 2014]

Referans değerler sırasıyla Basıncı $P_a = 100kPa$, sıcaklık $T_a = 300K$, ortamdaki ses hızı $C_a = 347m/s$ ve lüle çıkış genişliği $D_e = 0.1m$ olarak alınmıştır. Zaman D_e/C_a ile boyutsuzlaştırılmıştır. Ayrıca, lüle duvarları ve rampa duvarları viskoz değildir. Lüle izentropik varsayım kullanılarak yarı tek boyutlu(quasi-one dimensional) akış teorisine göre çizilmiştir.

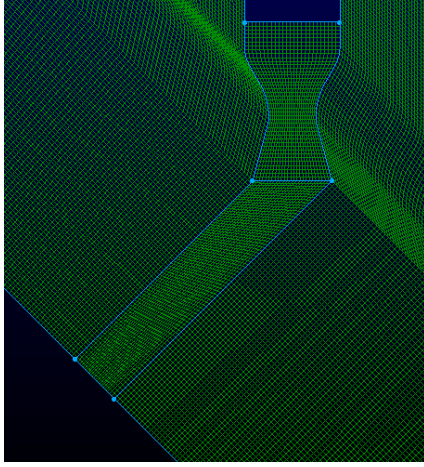


Şekil 2: Çözüm Alanında Alınan Örnek Noktalar [Toshiaki, Nagata, Takaki, Tsutsumi ve Ueda, 2014]

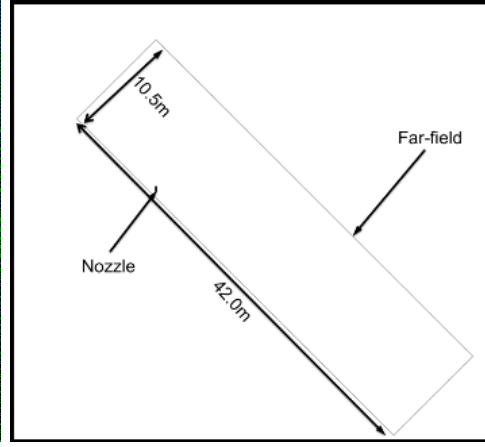
Çözüm alanında ateşleme aşırı basınç ve akustik dalgaların etkilerini analizi için belli noktaların statik basınç verilerinin toplanır. Bu çalışmada sadece 6. ve 10. noktaların statik basınç verilerini kullanılmıştır. Yukarıdaki şekilde 6. ve 10. noktanın konumu gösterilmiştir.

Çözüm Ağı ve Çözüm Alanı

Çözüm alanı eğrisel yapıları çözümü için oluşturulmuştur. Aşağıdaki şekillerde çözüm ağının bir kısmı ve bütün çözüm alanı gösterilmiştir. Çözüm ağı lüleden uzaklaştıkça seyrekleştirilmiştir.



Şekil 3: Çözüm Ağı



Şekil 4: Çözüm Alanı [Barad, Housman, ve Kiriş, 2011]

Çözüm alanının geniş tutulma sebebi oluşan akustik dalgalarının uzak alan (farfield) sınırlardan sekip geri gelmesinin önüne geçmektir. Ayrıca, uzak alana doğru gidildikçe çözüm ağı daha da seyrekleştirilmiştir. Bu da akustik dalgaların sönümlenmesini sağlar. Ek olarak, lüle çıkışında duvara dik bir parça olmasının sebebi 10. ve 6. nokta ve çevresinin tamamen kartezyen ağı yapısı ile oluşturulması içindir.

HAD Programı

HAD programı olarak NASA'nın CFL3D programı kullanılmıştır. CFL3D [Biedron, Rumsey ve Thomas, 1997], NASA tarafından oluşturulmuş açık kaynak kodlu bir yazılımdır. CFL3D ince tabaka Reynolds ortalama Navier Stokes denklemlerini ve Euler denklemlerini çözebilir. Sadece yapısal çözüm ağı kullanır. Başlangıçta transonik dış akışlar için tasarlanmış olup sonradan gerekli sınır koşulları eklenerek iç akışta çözebilir. CFL3D'nin zamana bağlı sınır koşulları bulunmamaktadır. Yanma odasının basıncını doğrusal olarak arttırmak için simülasyon parçalarına bölünmüş ve her 5 iterasyondan sonra bash kodu kullanarak CFL3D'nin girdi dosyasındaki basınç artırılmıştır. Ayrıca, CFL3D'nin kendi içinde çözüm ağı oluşturma ve sonuçları görselleştirme imkanı sunmaz.

Simülasyonlarda kullanılan sayısal methodlar şunlardır: 2. derece gerçek ve sözde(pseudo) zaman birimlerinin kullanıldığı örtülü(implicit) zaman ilerlemesi kullanılmıştır. Matrisler skalar köşegen tersine çevirme (inversion) yöntemi ile çözülmüştür. İki nokta içinde Roe'nun şeması akı-farkı ayrıştırması kullanılmıştır. 6. nokta için upwind temelli 3. derece methodu Euler akılarının uzamsal ayrıştırma methodu için kullanılmıştır. Ayrıca, 6. nokta için MIN-MOD akı sınırlayıcı kullanılmıştır. 10. nokta içinse 2. derece tamamen upwind methodu Euler akılarının uzamsal ayrıştırma methodu olarak kullanılmıştır ve herhangi bir akı sınırlayıcı kullanılmamıştır.

CFL3D boyutsuz bir çözücüdür. Çözüm alanının boyutu girdi dosyasındaki karakteristik uzunluk başına Reynolds sayısı ile belirleniyor. Ayrıca girdi dosyasındaki zaman adımı da ses hızı ve karakteristik uzunluk ile boyutsuzlaştırılmıştır.

$$reue = \frac{\rho_{\infty} M_{\infty} \sqrt{\gamma R T_{\infty}} L_R}{\mu_{\infty}} \quad dt_{boyutsuz} = \frac{dt_{gercek} a}{L_R} \quad (1)$$

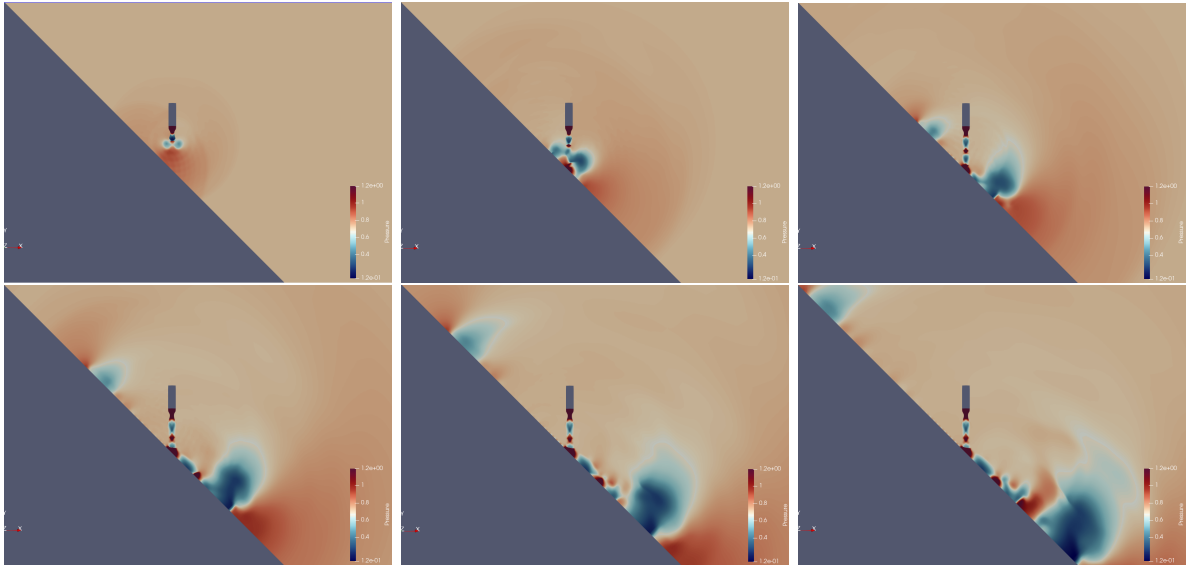
UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Simülasyonlar 3 farklı sıklıktaki çözüm ağında 6. ve 10. noktalar için yapılmıştır. Simülasyonlar 4 çekirdekli İntel i7-6700HQ ve i7-10610U işlemcilerini içeren iki farklı laptopta toplam 10 günde yapılmıştır. Aşağıdaki tabloda Çözüm ağlarının bilgileri verilmiştir.

Tablo 1 : Çözüm Ağı Çözünürlüğü

Çözünürlük	Uzay Adımı	Hücre Sayısı
Seyrek	0.005 metre	165 bin
Orta	0.0025 metre	550 bin
Sık	0.00125 metre	1 Milyon 941 bin

0.0036 saniyeden 0.0216 saniyeye kadar 0.0036 saniye aralıklarla alınmış basınç konturleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. 6. noktaya göre basınç arttırımı yapılmıştır. Sol-üstteki şekilde ateşleme aşırı



Şekil 5: Farklı zamanlardaki basınç konturleri

basınç dalgaları gözükmektedir. Orta-üstteki şekilde başlangıç girdapları oluşmaya başlamıştır. Orta-alt ve Sağ alttaki şekilde ise dalgalanma katmanları oluşmaya başlamıştır.

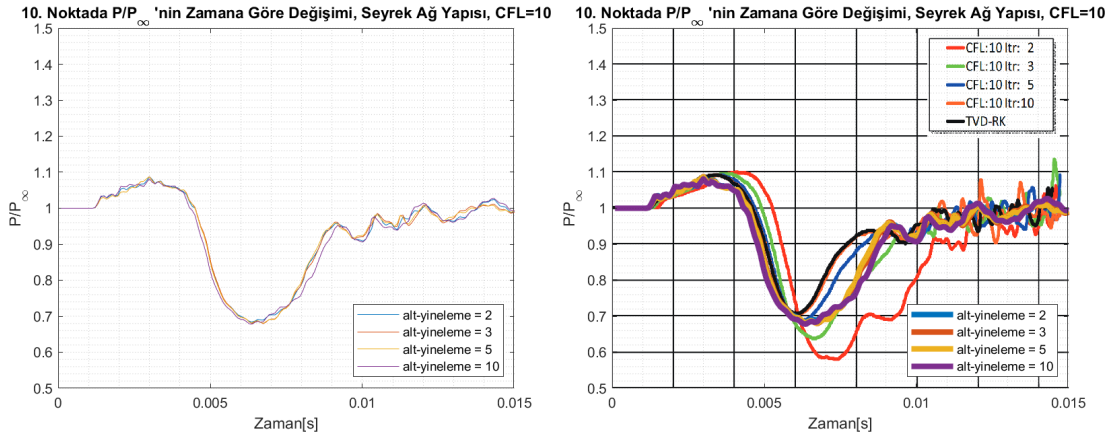
10. Nokta

Seyrek çözünürlükte 10. noktanın analizleri için Tablo 2'de gösterilen zaman adımları kullanılmıştır. Simülasyonlar 0.015 saniye yürütülmüştür.

Tablo 2 : Uygulanan Zaman Adımları

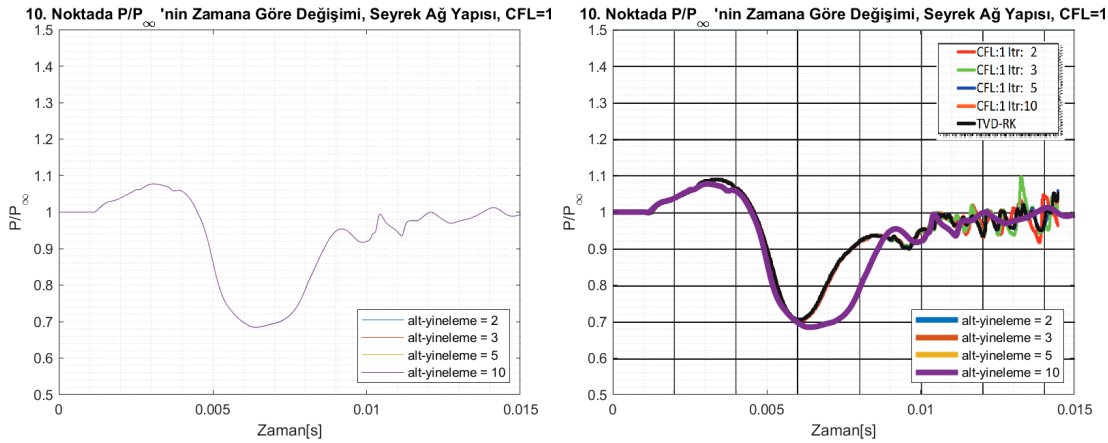
olay	CFL	alt-yineleme	olay	CFL	alt-yineleme
1	10	2	11	2	5
2	10	3	12	2	10
3	10	5	13	1	2
4	10	10	14	1	3
5	5	2	15	1	5
6	5	3	16	1	10
7	5	5	17	0.5	2
8	5	10	18	0.5	3
9	2	2	19	0.5	5
10	2	3	20	0.5	10

Aşağıdaki şekillerde 10. noktanın statik basınç verilerinin farklı ağ yapısı sıklıkları ve farklı CFL sayılarında sonuçları ve karşılaştırmaları gösterilmiştir.



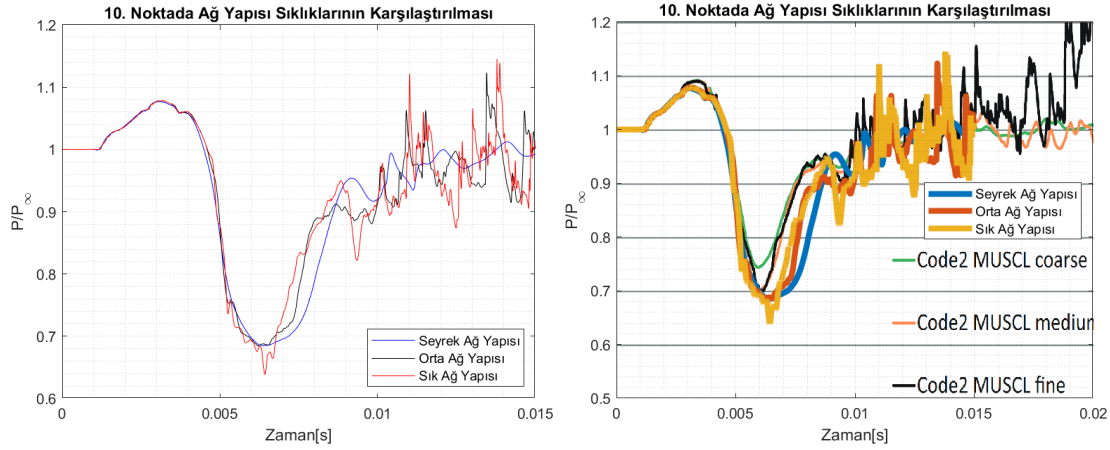
Şekil 6: 10. noktanın Basınç verisi ve karşılaştırılması, Seyrek Ağ Yapısı CFL=10, [Fujii K., Nonomura, T., Shima E., Takaki R. ve Tsutsumi S., 2012]

Şekil 6'da elde ettiğimiz çözümler yüksek CFL sayısında ve düşük alt-yinelemede yakınsama olmuş gibi gözükse de ilgili makaledeki sonuçlarla karşılaştırılmasında basıncın dip yaptığı yerden sonraki kısımlarda farklılıklar gözleniyor.



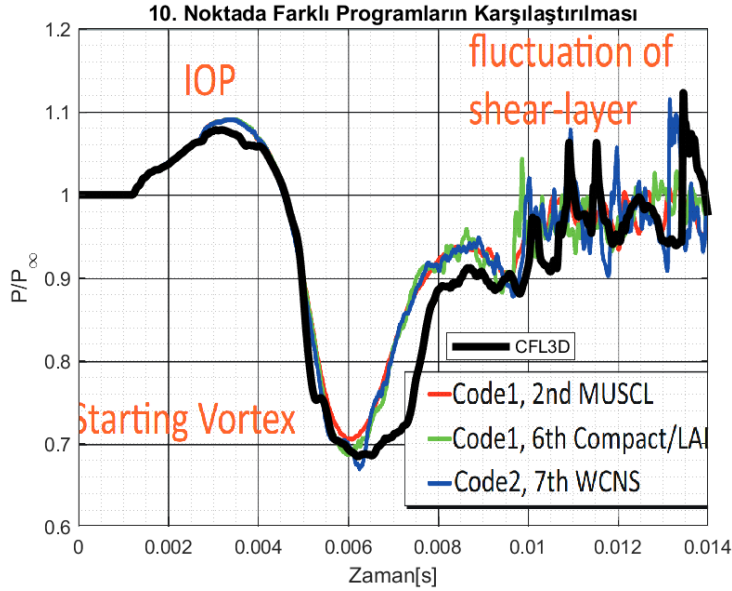
Şekil 7: 10. noktanın Basınç verisi ve karşılaştırılması, Seyrek Ağ Yapısı CFL=1 [Fujii K., Nonomura, T., Shima E., Takaki R. ve Tsutsumi S., 2012]

Şekil 7'de düşük CFL sayısında yine aynı şekilde basıncın dip yaptığı yere kadar farklılık gözlenmesi de daha sonrasında dalgalanma kısmına kadar olan bölgede farklılıklar gözleniyor.



Şekil 8: 10. noktanın Farklı Ağ Yapısı Sıklıklarındaki Sonuçları ve Karşılaştırılması [Fujii K., Nonomura, T., Shima E., Takaki R. ve Tsutsumi S., 2012]

Şekil 8'de ağ yapısı sıklıklarının karşılaştırılmasında da yine aynı şekilde başlangıç girdabına kadar olan kısımda bariz farklılıklar görünmese de başlangıç girdabına ve dalgalanma katmanı bölgesi arasında farklılıklar gözlenmektedir.



Şekil 9: 10. noktanın Farklı Programlardaki Sonuçlarının Karşılaştırılması [Fujii K., Nonomura, T., Shima E., Takaki R. ve Tsutsumi S., 2012]

Şekil 9'da farklı programlarla CFL3D'nin 10. noktadaki sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Ateşleme aşırı basınç ve başlangıç girdap bölgelerinde belirgin farklılık gözükmesine de dalgalanma katmanı ve başlangıç girdabı arasındaki bölgede bariz farklılıklar vardır.

Şekil 6'dan 9'a kadar olan sonuçların hepsinde başlangıç girdabı ve dalgalanma katmanı arasındaki bölgede bariz farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıkların sebepleri en başında lüle farklılığı olabilir. İlgili makalede [Fujii K., Nonomura, T., Shima E., Takaki R. ve Tsutsumi S., 2012] lüle konturu ile ilgili bilgi verilmediği için lüle Şekil-1'de gösterilen lüle ve yanma odası şekline deneme yanılma ile çizilmiştir. Ayrıca, CFL3D boyutsuz bir çözücü olduğu için çözüm alanı veya zaman adımı da bir sorun çıkmış olabilir. Basınç artırma amacıyla bir olay için yapılması gereken simülasyon 5er yinelemelik parçalara bölüdüğü için zaman adımlarında farklılıklar oluşmuş olabilir.

6. Nokta

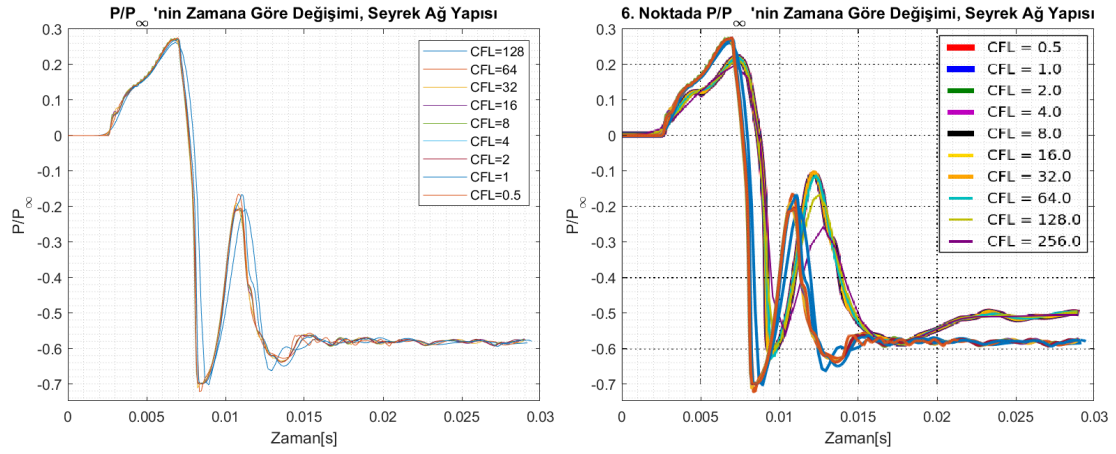
Seyrek çözünürlükte 6. noktanın analizleri için Tablo 3'te gösterilen zaman adımları kullanılmıştır. Simülasyonlar 0.028 saniye yürütülmüştür.

Tablo 3 : Uygulanan Zaman Adımları

olay	CFL	alt-yineleme	olay	CFL	alt-yineleme
1	256	10	6	8	10
2	128	10	7	4	10
3	64	10	8	2	10
4	32	10	9	1	10
5	16	10	10	0.5	10

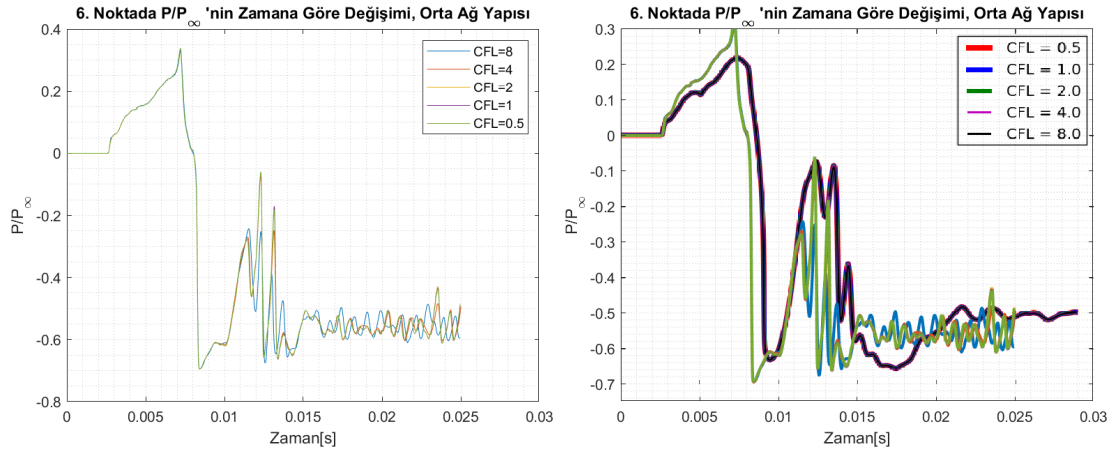
Orta sıklık ve sık ağ yapısında CFL sayısı 0.5 -8 arasındaki simülasyonlar 2 alt-yineleme ile tekrarlanmıştır.

Aşağıdaki şekillerde 6. noktanın statik basınç verilerinin farklı ağ yapısı sıklıkları ve farklı CFL sayılarında sonuçları ve karşılaştırılmaları gösterilmiştir.



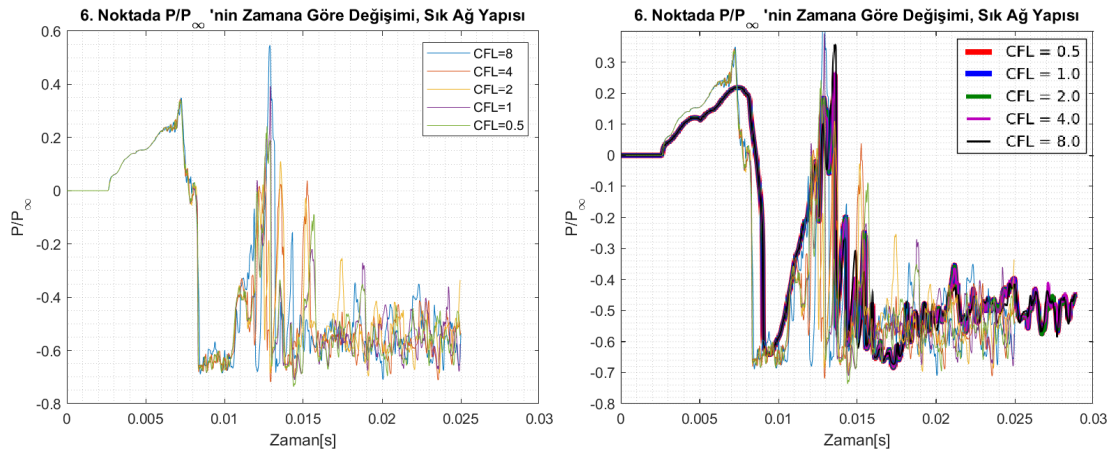
Şekil 10: 6. noktanın Basınç verisi ve karşılaştırılması, Seyrek Ağ Yapısı [Barad M., Housman, J. ve Kiriş, C . 2011]

Şekil 10'da 6. noktanın seyrek ağ yapısında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlarda en düşük ve en yüksek basınç noktalarındaki basınç değerleri ve oluşma zamanında farklılıklar gözlenmiştir. Ayrıca, dalgalanma katmanının olduğu süre ve basınç değeri farklıdır. Bunlara rağmen genel yapı olarak çözümler birbirine benzemektedir.



Şekil 11: 6. noktanın Basınç verisi ve karşılaştırılması, Orta Sıklık Ağ Yapısı [Barad M., Housman, J. ve Kiriş, C . 2011]

Şekil 11'de 6. noktanın orta sıklık ağ yapısında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlarda en düşük ve en yüksek basınç noktalarındaki basınç değerleri ve oluşma zamanında farklılıklar gözlenmiştir. Ayrıca, elde ettiğimiz sonuçlarda dalgalanmalar erken başlamış ve karşılaştırılan sonuçlara göre daha sık oluşmuştur. Ayrıca, dalgalanma katmanının oluştuğu süre ve basınç değeri farklıdır. Genel yapı olarak çözümler birbirine benzemektedir.



Şekil 12: 6. noktanın Basınç verisi ve karşılaştırılması, Sık Ağ Yapısı [Barad M., Housman, J. ve Kiriş, C . 2011]

Şekil 12'de 6. noktanın sık ağ yapısında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlarda en düşük ve en yüksek basınç noktalarındaki basınç değerleri ve oluşma zamanında farklılıklar gözlenmiştir. Ayrıca, elde ettiğimiz sonuçlarda dalgalanmalar erken başlamış ve karşılaştırılan sonuçlara göre daha sık ve dalgalanın genliği daha fazladır. Genel yapı olarak çözümler birbirine benzemektedir.

Şekil 10'dan 12'ye kadar olan sonuçlar seyrek, orta ve sık ağ yapılarında yapılan analizlerin ilgili makale [Barad M., Housman, J. ve Kiriş, C . 2011] ile karşılaştırılmasını ve elde edilen sonuçları içermektedir. Şekil 10'da seyrek ağ yapısında elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında ateşleme aşırı basınç dalgasının pik yaptığı basınç değeri ve zamanında farklılıklar vardır. Ayrıca, ikinci pikte de yine oluşma zamanı ve basınç değeri farklıdır. En son olarakta dalgalanma katmanı farklı basınç değerinde oluşmaktadır. Genel olarak bakıldığında elde edilen sonuçlarda olaylar daha erken oluşmuştur.

Şekil 11'de orta sıklık ağ yapısında elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında şekil 10'da oluşan farklılıklara ek olarak dalgalanmaların daha erken başladığı ve dalgalanmaların genişliğinin daha fazla olduğu gözükmemektedir. Aynı şekilde şekil 12'de sık ağ yapısında elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında genişliği daha fazla olan dalgalanmalar karşılaştırılan makaledeki sonuçlara göre daha erken zamanda başlamıştır.

Karşılaştırılan sonuçlarda iki temel farklılık vardır. Birinci farklılık olayların farklı zamanlarda gerçekleşmesi ve basınç değerlerinin farklı olmasıdır. Bunun iki sebebi olabilir. Birinci sebep analizlerdeki lüle farkı. İlgili makalede [Barad M., Housman, J. ve Kiriş, C . 2011] lüle, makaledeki şekillerden benzetilerek çizilmiştir. Yanma odası genişliği ve lülenin genişleme açısı sonuçlarda farklılıklara yol açmış olabilir. İkinci sebep boyutsuzlaştırmadır. Simülasyonlar 0.014 saniyeye kadar basınç yükseltme amacıyla 5 yinelemelik parçalar halinde yürütülmüştür. CFL3D girdi dosyasına da boyutsuz zaman aralığı girildiği için tüm parçalarda gerçek zaman aralığının aynı olup olmadığı şu an için bilinmemektedir. Ayrıca, CFL3D girdi dosyasında bir diğer boyutsuzlandırma ile ilgili girdi olan *reue* girdisi Euler denklemlerinin kullanıldığı çözümde sorunlar çıkarabilmektedir. İkinci farklılık dalgalanmaların daha erken başlamasıdır. Bu akı sınırlayıcıdan kaynaklanamaz çünkü elde edilen sonuçlar ve ilgili makalede [Barad M., Housman, J. ve Kiriş, C . 2011] MID-MOD akı limitleyici kullanılmıştır. Ancak, ilgili makalede yüksek dereceli MUSCL extrapolasyonu kullanıldığı için dalgalanmalardaki genlik farkı bundan kaynaklı olabilir. CFL3D'de 3. derece tamamen upwind harici başka yüksek dereceli çözüm kapasitesi bulunmamaktadır. Ek olarak, ilgili makalede matrisler dönüşümlü satır örtük Jacobi(alternating line implicit Jacobi) methodu kullanılmıştır ancak elde edilen sonuçlarda matrisler skalar köşegen tersine çevirme (inversion) yöntemi ile çözülmüştür. Bu farklılıklar genel olarak sonuçlardaki farklılıklara sebep olabilir.

SONUÇ

CFL3D programına Bash kodu kullanılarak zamana bağlı doğrusal arttırılabilen sınır koşulu kapasitesi kazandırılmıştır. 10. ve 6. noktanın seyrek, orta ve sık ağ yapılarında farklı zaman aralığında analizleri ile zaman aralığı ve uzay aralığına hassasiyeti analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 10. nokta için [Fujii K., Nonomura, T., Shima E., Takaki R. ve Tsutsumi S., 2012] ve 6. nokta için [Barad M., Housman, J. ve Kiriş, C . 2011] ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardaki farklılıkların olası sebepleri açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre seyrek ağ yapısı ateşleme aşırı basınç dalgalarının(ignition over pressure) hesaplanmasında yeterlidir. Dalgalanma katmanının (fluctuation of shear layer) analizi için daha sık ağ yapıları kullanılması gerekir. Ek olarak, CFL sayısının 4'ten daha küçük olduğu zaman aralıkları da yeterli sonuç vermektedir. Çalışmanın devamında CFL3D programının kaynak kodları değiştirilerek zamana bağlı doğrusal sınır koşulu kapasitesi eklenecektir ve boyutsuzlaştırmadan dolayı olduğu tahmin edilen farklılıklar belirlenip bunlarla ilgili çözümler bulunacaktır.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma " *Fırlatma Rampaları için Akış Analiz ve Tasarım Optimizasyon Yazılım Geliştirilmesi*" başlıklı ve 1001-123M355 numaralı TUBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Biedron, R., Rumsey, C. ve Thomas, J., 1997. *CFL3D: Its History and Some Recent Applications*, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- Fujii, K., Nonomura, T., Shima, E., Takaki, R. ve Tsutsumi, S., 2012. *Impact of Temporal and Spatial Resolution on the Aeroacoustic Waves from a Two-dimensional Impinging Jet*, Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD7), Big Island, Hawaii.
- Toshiaki, H., Nagata, H., Takaki, R., Takaki, R., Tsutsumi, S. ve Ueda, H., 2014. *Numerical Analysis of Ignition Overpressure Effect on H-IIB Launch Vehicle*, Journal of Spacecraft and Rockets, Cilt 51, Sayı 3.
- Barad M., Housman, J. ve Kiriş Ç., 2011. *Space-Time Accuracy Assessment of CFD Simulations for the Launch Environment*, 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii.
- Chan, W., Gusman, M., Housman, J., Kiriş, Ç. ve Kwak, D., 2009. *Time-Accurate Computational Analysis of the Flame Trench Applications*, 21. International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, s.37-41
- Kiriş, Ç., Kwak, D. ve Rogers, S.E, 1991. *Steady and Unsteady Solutions of the Incompressible Navier-Stokes Equations*, AIAA Journal Cilt 29, Sayı 4, s. 603-610.
- Kiriş, Ç. ve Kwak, D., 2010. *Computation of Unsteady Flow in Flame Trench For Prediction of Ignition Overpressure Waves*, NASA Ames Research Center.