

## Yüksek Hızlarda Farklı Rampa Modellerinde Şok Dalgası Sınır Tabaka Etkileşiminin Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi

Muhammed Osama BALKHI<sup>1</sup>  
İstanbul Teknik Üniversitesi,  
İstanbul

Fatmanur Aleyna ÖZCAN<sup>2</sup>  
RWTH Aachen University,  
Aachen

Ahmet Selim DURNA<sup>3</sup>  
Samsun Üniversitesi,  
Samsun

### ÖZET

*Şok dalgası sınır tabaka etkileşimleri hem iç hem de dış akışlar için sesüstü akışlarda karşılaşılan en önemli problemlerden biridir. Bu çalışmada  $M=2,52$ 'de sırasıyla üç farklı  $24^\circ$ ,  $33^\circ$  ve  $50^\circ$  rampa açılarında farklı rampa uzunluklarının etkisi incelenecektir. Schlieren görüntüleri yer alan iki farklı rampa açısı geometrisi temel alınarak ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıyla incelemeler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrılma şokunun açısının rampa açısı ve uzunluğundan bağımsız olduğu, ayrılma genişliğinin rampa uzunluğu ve rampa açısıyla arttığı gözlenmiştir. Rampa açısının artmasıyla ayrılma şokunun gücünün arttığı, bağlanma şokunun gücünün hemen hemen aynı kaldığı bulunmuştur.*

### GİRİŞ

Şok dalgası sınır tabaka etkileşimleri (SWBLI), hem iç hem de dış akışlar için sesüstü akışlarda karşılaşılan en önemli problemlerden biridir. Bu nedenle, hava ve uzay araçlarının yüzeylerinde oluşan sınır tabakası bilgisi, fiziksel mekanizmasının derinlemesine anlaşılması, verimli bir aerodinamik ve itki sisteminin tasarımı için esastır. Günümüzde de SWBLI'nın hala fiziksel mekanizması anlaşılammakta olup yüksek hızlı uçuşta her yerde görülmeleri ve araç ve bileşen performansı üzerindeki etkileri nedeniyle Ferri'nin (Ferri 1940) 1940'ta SWBLI ile ilgili ilk araştırmalarından bu yana yaklaşık 80 yıldır havacılık ve uzay camiasının ilgi odaklarından biri olmaya ve çalışılmaya devam edilmektedir (Dolling 2001).

SWBLI ile ilgili birçok deneysel çalışmada farklı görüntüleme teknikleriyle etkileşim incelenmiş ve farklı türbülans modelleriyle hesaplamalı olarak karşılaştırması yapılmıştır. (Knight et al. 2003)(Amaha 2014)(Détery and Dussauge 2009)(Andreopoulos, Y., Agui, J. H., and Briassulis 2019)(Sun, Gan, and Wu 2020). Bu çalışmalardan biri olan, Verma vd. (Verma, Manisankar, and Raju 2012) raporunda Mach sayısı (M) 2,05'te  $24^\circ$  derecelik rampa açısında şok dalgası sınır tabaka etkileşimini renkli Schlieren tekniği ile deneysel olarak incelemiştir. Sınır tabaka kalınlığını 3,85 mm olarak ölçmüş ve şok dalgası sınır tabaka etkileşim uzunluğunu ise yaklaşık olarak 20 mm olarak bulmuştur. Verma vd. ile benzer ancak farklı rampa açılarının etkisinin de incelendiği, Sun vd. (Sun, Gan, and Wu 2020) deneysel çalışmasında ikişer derece aralıklarla  $20^\circ$ 'den  $30^\circ$ 'ye kadar  $M=2$ 'de ve farklı iki Reynolds sayısında yüksek hızlı Schlieren görüntüleme tekniğini kullanarak SWBLI incelemiştir. Bu çalışmada  $24^\circ$  derecelik rampa açısı için Sun vd., Verna vd.'nin raporuyla tutarlı sonuçlar bulmuştur. Ayrıca, Sun vd. sabit tutulan rampa yüksekliğinde artan rampa açısıyla ayrılma şok dalgasının akıma ters yönde yavaşça hareket ettiğini ve bütün Schlieren görüntülerinde SWBLI sonucu ayrılma şok dalgası açısının  $47^\circ$  civarında bulunduğunu raporlamışlardır. Son zamanlarda Sun'ın çalışmasına benzer şekilde, Ramaswamy ve Schreyer (Ramaswamy and Schreyer 2019)  $24^\circ$  ve  $33^\circ$  derecelik sıkıştırma rampaları ile  $M=2,52$  de yağ akışı, odaklamalı Schlieren görüntüleme yöntemleri ve PIV ile deneysel olarak çalışmıştır. PIV yöntemi ile  $33^\circ$  sıkıştırma rampasında  $24^\circ$ 'ye göre daha büyük ayrılma bölgesi gözlenmiş ve ayrılma şok açısı her iki rampa açısı için yaklaşık  $37^\circ$  bulunmuştur. Schlieren görüntüleme sonuçlarında da aynı ayrılma şoku açısı tespit edilmiştir.

<sup>1</sup> Yüksek Lisans öğrencisi, Uçak ve Uzay Mühendisliği, E-posta: mosamabalkhi@gmail.com

<sup>2</sup> Misafir araştırmacı, Lisans öğrencisi, Uçak ve Uzay Mühendisliği, E-posta: aleyna.oezcan@rwth-aachen.de

<sup>3</sup> Dr. Öğretim Üyesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Böl., E-posta: ahmetselim.durna@samsun.edu.tr

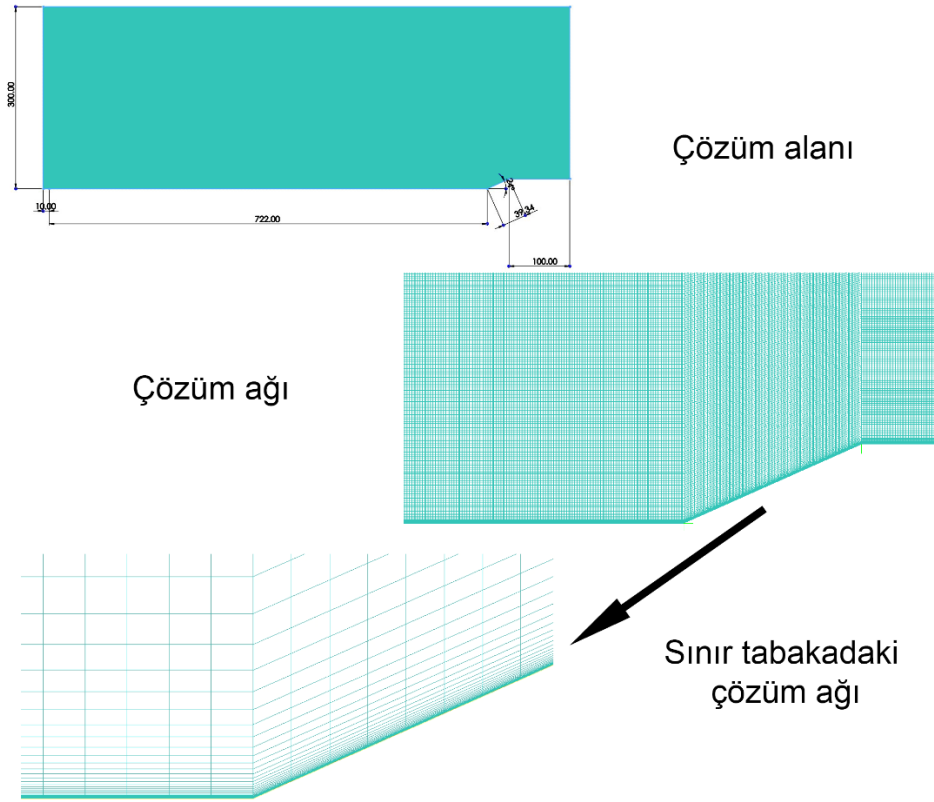
SWBLI yapıları üzerindeki sıkıştırma rampa açısı etkisinin deneysel araştırmaları, birçok sayısal araştırma için referans olmuştur. Zheltovodo'nun (A. A. Zheltovodov 1996-1977)  $M=3$ 'teki deneyleri, simülasyon doğrulamalarının devamı için kullanılmıştır. Hickel vd.'nin (W. Hu, S. Hickel, and B. W. Van Oudheusden 2021)  $M=2,9$ 'da  $24^\circ$  sıkıştırma rampasında gerçekleştirdikleri doğrudan sayısal DNS simülasyonu ve Adams vd. (M. Grilli, S. Hickel, and N. A. Adams 2012)  $M=2,88$ 'de  $25^\circ$  sıkıştırma rampasındaki LES simülasyonunun sonuçları Zheltovodo'nun deneylerini referans veren benzer önemli çalışmalar olarak örnek verilebilir. Ayrıca bir diğer önemli çalışmalardan biri olan Rizzetta vd.'nin sayısal çalışması, (D. P. Rizzetta and M. R. Visbal 2002) Smiths ve Muck'ın (A. J. Smits and K. C. Muck 1987) deneylerini referans alarak, daha farklı rampa açılarının da eklenmesi ile  $M=3,0$ 'da  $8^\circ$ ,  $16^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $24^\circ$  sıkıştırma rampa açıları için LES simülasyonu gerçekleştirmiş, ancak çalışmaları deneysel sonuçlar ile zayıf bir şekilde uyumuştur. Deneysel sonuçlarla daha az yakınsayan bu gibi birçok sayısal çalışmaya rağmen, günümüz çalışmaları arasında deneysel sonuçlarla paralel sonuçlara ulaşabilen en iyi referans çalışmalardan bir diğeri ise Stolz vd.'nin (S. Stolz, N. A. Adams, and L. Kleiser 2001) türbülanslı süpersonik akışta, farklı rampa açısı ve Mach sayısında gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarının doğrudan sayısal bir karşılaştırması olan Zheltovodov vd.'nin (M. S. Loginov, N. A. Adams, and A. A. Zheltovodov 2006)  $M=2,95$ 'da  $25^\circ$  bir sıkıştırma rampası üzerindeki LES simülasyonudur. Çalışmalar şok pozisyonu, ayrılma ve yeniden bağlanma konumu, yüzey basınç dağılımları ve rampa açısında ve Mach sayısındaki türbülans yapısı gibi ana nicelikler açısından başarıyla doğrulanmıştır. Durna vd. (Durna vd. 2016, Durna ve Celik 2019, Durna ve Celik 2020)  $M=7$ 'de iki rampa açısına sahip bir geometride rampa açısının hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarda rampa açısı arttıkça şok-sınır tabaka etkileşiminin yüksek basınç ve ısı yüklerine sebep olan karmaşık bir mekanizmasının ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Bu araştırmanın amacı şok dalgası sınır tabaka etkileşimi içeren bir koşulda hem rampa açısı hem de rampa uzunluğunun etkisine bakmaktır. Bu çalışmada  $M=2,52$ 'de sırasıyla  $24^\circ$ ,  $33^\circ$ , ve  $50^\circ$  rampa açılarında şok dalgası sınır tabaka etkileşiminin doğası ve rampa uzunluğunun etkileri hesaplamalı olarak incelenmiştir.

## YÖNTEM

### Model ve Çözüm Ağı Yapısı

Şekil 1'de bu çalışmada kullanılan tek sıkıştırımlı rampa modeli, uygun bir kontrol hacmiyle birlikte gösterilmiştir. Şekil 1'de Ramamswamy ve Schreyer (2019)'in deneylerinde kullandıkları  $24^\circ$  rampa açısına sahip bir modeli gösterilmektedir. Bu çalışmada rampa açısı  $24^\circ$ ,  $33^\circ$ , ve  $50^\circ$  ve rampa uzunluğu 20, 39,4 ve 100 mm olacak şekilde 9 farklı rampa modeli elde edilmiş ve Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Rampa geometrisi ve çözüm ağı (A24-L39)

Tablo 1: Farklı rampa modellerinin sınıflandırması ve adlandırması

Rampa açısı / Rampa uzunluğu [mm]	24°	33°	50°
20	A24-L20	A33-L20	A50-L20
39,4	A24-L39	A33-L39	A50-L39
100	A24-L100	A33-L100	A50-L100

Şekil 1’de ayrıca A24-L39 modeline uygulanan çözüm ağı yapısı gösterilmektedir. Bu çözüm ağı ICEM CFD yazılımıyla oluşturulmuştur. Sınır tabakasını modellemek amacıyla duvar kısmına yakın olan bölgelerde küçük elemanlar kullanılmış ve  $y^+$  parametresi 1 olarak şekilde ilk tabaka kalınlığı yaklaşık  $1 \times 10^{-6}$  (m) değerinde elde edilmiştir. Toplam hücre sayısı 450.000’dir. Ayrıca sınır tabakada maksimum en boy oranı 776 olmasına rağmen alanın geri kalan alanlarının hepsinde tam kare elemanlar elde edilmiştir.

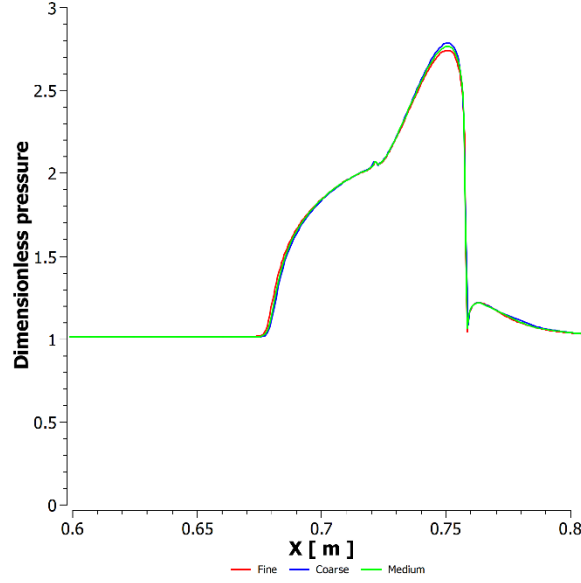
### Sayısal Yöntem ve Sınır Koşulları

Hesaplama alanının sol ve üst yüzeylerinde serbest akım koşulları uygulanmıştır. Serbest akımın hızı  $M=2,52$ , toplam basıncı 56446,27 Pa olarak (Ramaswamy and Schreyer, 2019) çalışmalarıyla aynı alınmıştır. Hesaplama alanının sol alt yüzeyindeki başlangıç noktasında simetri sınır koşulu verilip, rampa yüzeylerine kaymama sınır koşulu uygulanmıştır. Hesaplamalar ANSYS Fluent ticari akış çözücüsü Standard  $k-\omega$  türbülans modeliyle yapılmıştır. Çözücü yoğunluk bazlı (density-based), daimi ve sıkıştırılabilir akış koşullarındadır.

### Çözüm Ağından Bağımsızlık

Çözümlerin ağı bağımlılığını araştırmak için, ağ yapısı düzenlenerek iki eksendeki nokta sayısı 2’şer kat artırılarak 3 farklı çözüm ağı elde edilmiştir. Her üç ağ için de hücre en boy oranı ve ağ yapısı hemen hemen aynı tutulmuştur. Sırasıyla kaba, orta ve ince boyutlu ağlar için toplam 0,25, 0,45 ve 0,75 milyon hücre sayısı elde edilmiştir. Şekil 2, tüm ağ boyutları için rampa duvarı boyunca statik

basınç dağılımını (serbest akış statik basıncı ile boyutsuzlaştırılmış) göstermektedir. Üç ağ boyutu için de basınç değerlerinin hemen hemen aynı kalmasına rağmen, kaba ağ basınç değerlerinin tepe noktasında ( $X=0,75$  m) çok az bir farkla değiştiği gözlemlenmiştir. Böylece sonuçların ağdan bağımsız olduğuna karar verilmiş ve analiz orta boyutlu ağ kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

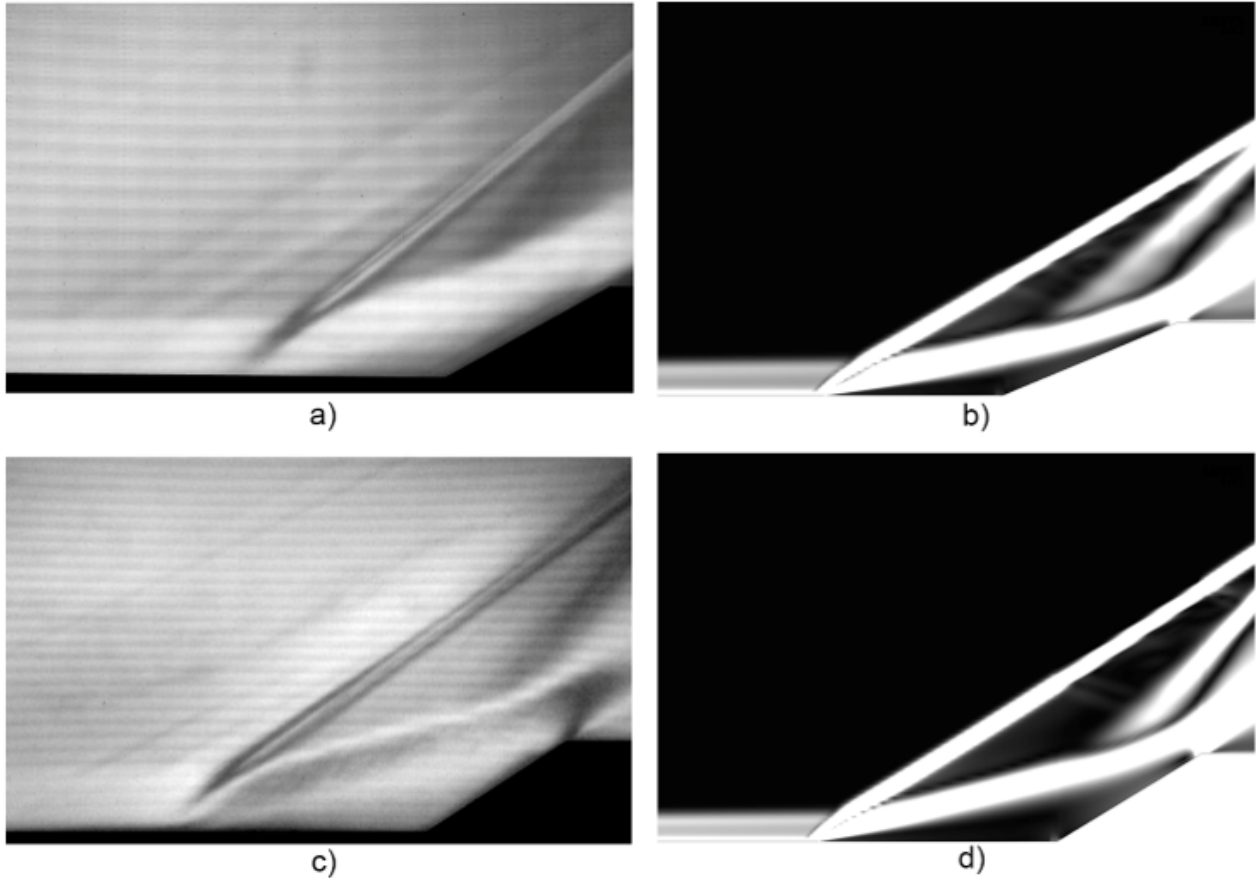


Şekil 2: 3 farklı ağ boyutu için rampa duvarı boyunca (serbest akış basıncı ile boyutsuzlaştırılmış) statik basınç dağılımı

## UYGULAMALAR ve DEĞERLENDİRMELER

### Doğrulama

Şekil 3'te iki farklı rampa açısındaki ( $24^\circ$  ve  $33^\circ$ ) rampa modelleri üzerinde HAD ile elde edilen Mach konturu ve Ramaswamy and Schreyer'ın ortalama Schlieren görüntüleriyle karşılaştırılması gösterilmektedir. Her iki rampa açısı için de Schlieren görüntüsünde ayrılma şokunun açısı  $33^\circ$  olup hesaplamalı çalışmada da birebir aynısı bulunmuştur. Ayrıca, şok yapısı, ayrılma bölgesinin genişliği ve tekrar bağlanma (reattachment) şok dalgası da benzerlik göstermektedir.

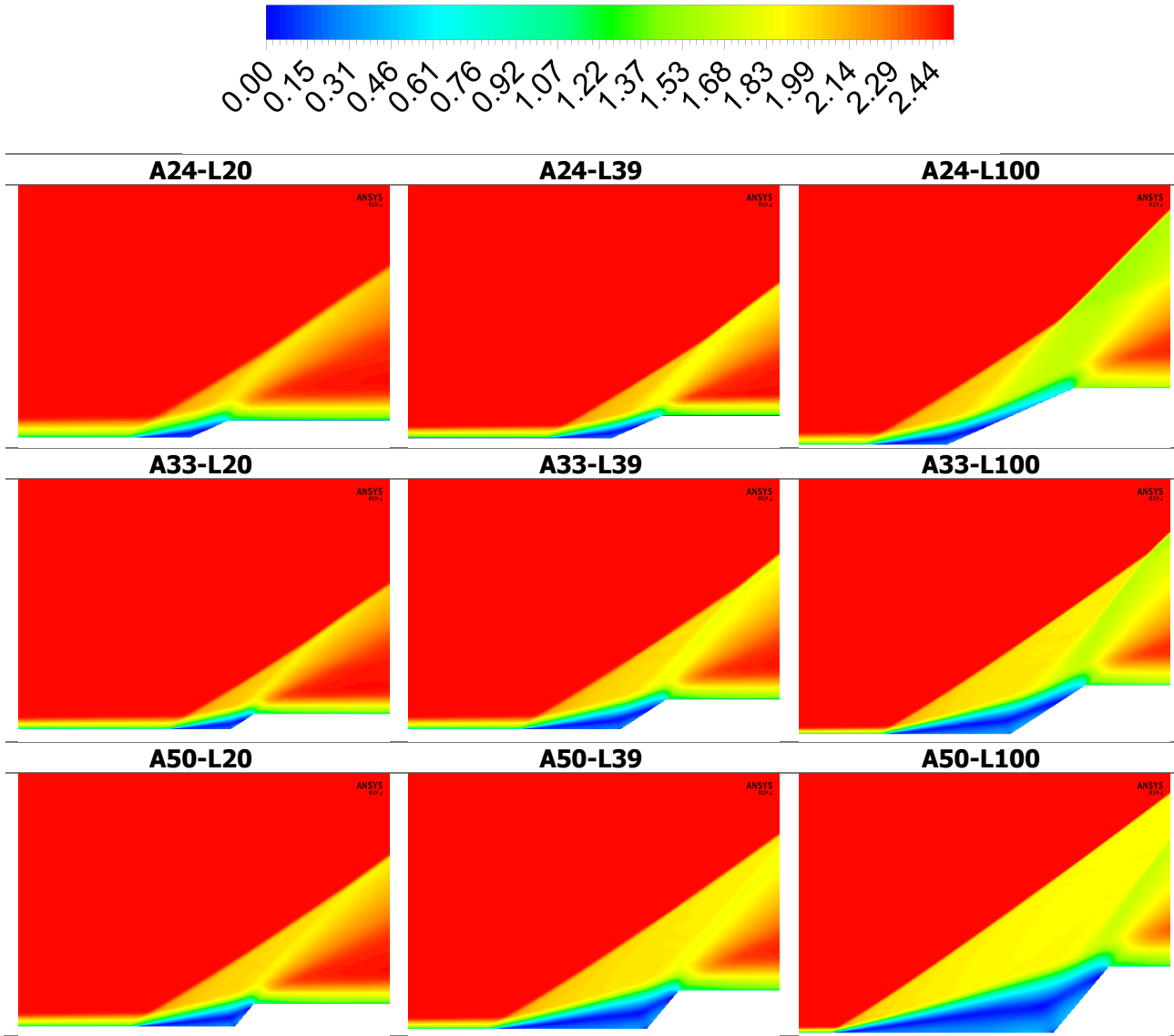


Şekil 3: a) 24° c) 33° rampa modeli için Schlieren görüntüsü (Ramaswamy and Schreyer 2019)  
b) 24° d) 33° rampa modeli için HAD sonuçları

#### Rampa açısı ve uzunluğu etkisi

Şekil 4 sırasıyla yatay ve dikey olarak rampa açısı ve uzunluğu arttırılığında dokuz rampa modelinin Mach konturlarını göstermektedir. Aynı rampa açıları için rampa uzunluğunu arttıkça kayma tabakasının altındaki bölgenin genişlediğine dikkat çekilmektedir. İncelenen tüm durumlar için, ayrılma açısının hemen hemen aynı olduğu gözlemlenmiştir. (A50-L100 hariç). Ancak artan rampa açısı ile ayrılma şokunun arkasındaki Mach sayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha büyük (artan) rampa uzunlukları için de benzer bir değişim fark edilmektedir.

Ek olarak, daha büyük rampa açıları ve uzunlukları için yeniden bağlanma şokunun arkasındaki bölgenin Mach sayısının daha az olduğu da görülmektedir. Bu gözlem, bu tarz durumlar için daha güçlü bir yeniden bağlanma şokunun göstergesi olabilir.



Şekil 4: 9 rampa modeli için Mach kontürü

Çalışılan rampa modelleri için ayrılma şoku açısı, ayırma bölgesi genişliği ve ayrılma ve yeniden bağlanma şoklarının gücü Tablo 2'de verilmiştir.  $\vartheta$  parametresi ayrılma şoku açısı olarak tanımlanmıştır ve  $x/\delta$  parametresi ise sıkıştırma köşesinden ayrılma bölgesi genişliğinin sınır tabaka kalınlığına bölümüdür (boyutsuz ayrılma bölgesi genişliği).  $\Psi$  ve  $\xi$ , sırasıyla ayrılma ve yeniden bağlanma şoklarının arkasındaki statik basıncın, bu şoktan geçmeden önceki basınç değerlerine bölümü olarak tanımlanmıştır.

Artan rampa açısı için ayrılma şok açısı değerinin ( $\vartheta$ )  $33^\circ$  olarak sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Benzer bir gözlem, artan rampa uzunlukları için de fark edilmektedir, çünkü  $\vartheta$  değeri de daha büyük rampa uzunlukları için bir değişim göstermemektedir. Ancak, A50-L100 durumu için  $\vartheta$  değeri  $36^\circ$  olarak tespit edilmiştir, bu durumda hafif bir artış fark edilmektedir. Bunun büyük rampa açısı ve uzunlukları için ayrılma bölgesinin büyüklüğünün sonucu olabileceği düşünülmektedir. Sabit bir rampa uzunluğu için, rampa açısı arttıkça boyutsuz ayrılma bölgesi genişliğinin ( $x/\delta$ ) arttığı görülmektedir. Rampa açısı sabit olduğunda ve rampa uzunluğu arttığında ise,  $x/\delta$  değerinin de arttığı fark edilmektedir. Rampa uzunluğu sabitlendiğinde ise, ayrılma şoku gücü  $\Psi$  rampa açısıyla birlikte artar. Bu durum sabit rampa açıları ve daha yüksek rampa uzunlukları için de belirtilebilir. Yeniden bağlanma şoku gücü ( $\xi$ ), rampa uzunluğu arttıkça, sabit rampa açıları için önemli ölçüde artmaktadır. Bununla birlikte, ilginç bir şekilde, rampa açısı farklılık gösterse bile, sabit rampa uzunlukları için  $\xi$  değerleri nispeten aynı kalır.

Tüm durumlar, Standard  $k-\omega$  (2 denklem) türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür.

Tablo 2: Farklı rampa modelleri için şok dalgası karakteristikleri

	$\vartheta$	$x/\delta$	$\Psi$	$\xi$		$\vartheta$	$x/\delta$	$\Psi$	$\xi$		$\vartheta$	$x/\delta$	$\Psi$	$\xi$
<b>A24-L20</b>	33°	2,86	1,82	1,17	<b>A33-L20</b>	33°	4,47	1,84	1,16	<b>A50-L20</b>	33°	6,98	2	1,12
<b>A24-L39</b>	33°	4,69	1,86	1,23	<b>A33-L39</b>	33°	7,31	1,98	1,31	<b>A50-L39</b>	33°	12,45	2,1	1,18
<b>A24-L100</b>	33°	5,84	1,92	1,32	<b>A33-L100</b>	34°	14,35	2,13	1,33	<b>A50-L100</b>	36°	26,36	2,28	1,33

## SONUÇ

Bu çalışmada, ayrılma şok açısının, ayrılma bölgesi genişliğinin ve SWBLI yapılarının etkisi incelenmiştir. Şok gücü ve ayrılma açısı gibi parametreler Standart  $k-\omega$  türbülans modeli kullanılarak gözlemlenmiştir. Doğrulama çalışması, Schlieren görüntüleri ile tutarlı sonuçlar vermiştir. Çalışma sonucunda sırayla verilen sonuçlar elde edilmiştir: Ayrılma şoku açısı, rampa açısı veya uzunluğunu ayrı ayrı artırıldığında sabit kalır. Ayrılma genişliği, rampa uzunluğu sabit tutularak rampa açısı artırıldığında veya rampa açısı sabit tutulurken rampa uzunluğu artırıldığında artmaktadır. Ayrılma şokun gücü diğer parametre sabit tutulurken rampa açısı veya uzunluğu artırıldığında artmaktadır. Yeniden bağlanma şokunun gücü, rampa açısının artmasıyla hemen hemen aynı kalır, ancak rampa uzunluğunun artmasıyla paralel olarak artmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda rampa uzunluğunun etkisini araştırmak için daha fazla deneysel çalışma ile doğrulanması hedeflenmektedir. Ayrıca RANS yerine DNS gibi daha kapsamlı türbülans modelleri ile çalışma genişletilebilir.

## Kaynaklar

- A. Ferri, "Experimental results with airfoils tested in the high-speed tunnel at Guidonia," NACA Technical Reports, vol. 946, 1940.
- D. S. Dolling, "Fifty years of shock-wave/boundary-layer interaction research: What next?," AIAA Journal, vol. 39, no. 8, pp. 1517–1531, 2001, doi: 10.2514/2.1476.
- D. Knight, H. Yan, A. G. Panaras, and A. Zheltovodov, "Advances in CFD prediction of shock wave turbulent boundary layer interactions," Progress in Aerospace Sciences, vol. 39, no. 2–3, pp. 121–184, 2003, doi: 10.1016/S0376-0421(02)00069-6.
- A. S. Durna, MEHA. Barada, B. Celik, "Shock interaction mechanisms on a double wedge at Mach 7," Physics of Fluids, 2016; 28:096101, doi:10.1063/1.4961571.
- A.S. Durna, B. Celik, "Time-periodic shock interaction mechanisms over double wedges at Mach 7," Shock Waves 2019;29:381–99. doi:10.1007/s00193-018-0864-7.
- A.S. Durna, B. Celik, "Effects of Double-Wedge Aft Angle on Hypersonic Laminar Flows," AIAA Journal, Vol. 58, No. 4, 2020, doi:10.2514/1.J058754.
- A. H. Amaha, "Numerical Investigation of Shock wave Turbulent Boundary Layer Interaction over a 2D Compression Ramp," vol. 4, no. 1, pp. 25–32, 2014.
- J. Détery and J. P. Dussauge, "Some physical aspects of shock wave/boundary layer interactions," Shock Waves, vol. 19, no. 6, pp. 453–468, 2009, doi: 10.1007/s00193-009-0220-z.
- G. Andreopoulos, Y., Agui, J. H., and Briassulis, "Shock Wave–Turbulence Interactions," no. 247, pp. 1–6, 2019.
- Z. Sun, T. Gan, and Y. Wu, "Shock-wave/boundary-layer interactions at compression ramps studied by high-speed schlieren," AIAA Journal, vol. 58, no. 4, pp. 1681–1688, 2020, doi: 10.2514/1.J058257.

- S. B. Verma, C. Manisankar, and C. Raju, "Control of shock unsteadiness in shock boundary-layer interaction on a compression corner using mechanical vortex generators," *Shock Waves*, vol. 22, no. 4, pp. 327–339, 2012, doi: 10.1007/s00193-012-0369-8.
- D. P. Ramaswamy and A. Schreyer, "Influence of Air-Jet Vortex Generators on Spatial Structures in a Shock Wave / Turbulent Boundary Layer Interaction," no. 1952, 2019.