

DÜZ YÜZEYDEN SES ÜSTÜ HIZDAKİ AKIŞA DİK YÖNDE ÜFLENEN YÜKSEK BASINÇLI JETİN AKIŞLA ETKİLEŞİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Utkun Erinç Malkoçoğlu*, Hayri Acar† ve Okşan Çetiner ‡
İstanbul Teknik Üniversitesi
Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada sonlu açıklığa sahip, kama ile başlayıp sonrasında düz yüzey halini alan bir levhadan nominal $M_\infty \approx 2.60$ koşulundaki ses üstü hıza sahip bir akışa dik yönde üflenen ve farklı toplam basınçlara sahip jetin, ses üstü hızdaki akış ile etkileşimi deneysel olarak incelenmiştir. Yüksek hızlı kamera ile schileren görüntülemesinin yanı sıra etkileşimin yüzey üzerindeki etkinliğini ortaya çıkarmak için yüzey yağ akım görüntülemesinden de yararlanılmıştır. Farklı enjeksiyon koşullarının akış alanına olan etkilerinin incelenebilmesi için, 1 mm ve 2 mm ölçülerine sahip iki jet enjeksiyon çapının yanı sıra hücum kenarı kamasının bitiminden itibaren 20 mm ve 30 mm uzaklıkta iki jet enjeksiyon deliği merkezi için deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonucunda elde edilen ilk görüntülerde mevcut olan akım çizgilerine bakılarak jetin enjekte edildiği delikten bir miktar akım üstü yönündeki mesafede ayrılma şokundan ötürü akımın yüzeyden ayrıldığı, delikten akım altı yöne doğru ilerlendiğinde ise bir at nalı girdap bölgesinin oluştuğu, buna bağlı olarak da ise zıt yönde dönen bir girdap çifti tespit edilmiştir. Bu girdap çiftine bağlı olarak da jet enjeksiyon deliğinin hemen akım altı bölgesinde V şekilli ayrılma bölgesi gözlenmiştir.

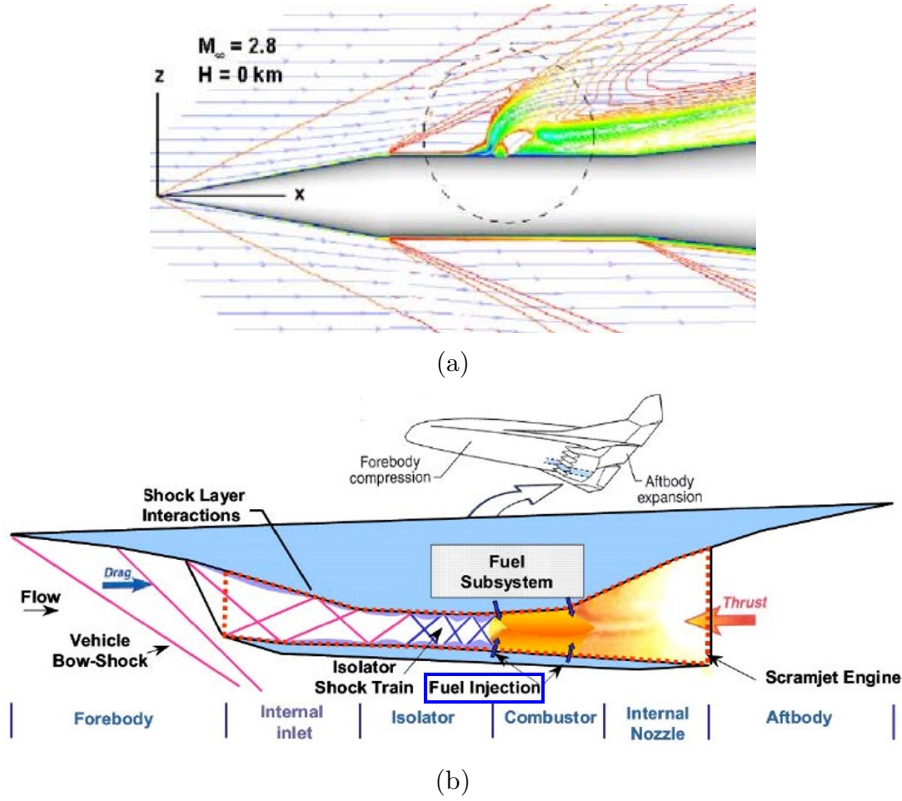
GİRİŞ

Akışa dik yönde üflenen jetin akışla oluşturduğu etkileşim, akış fiziğinde rastlanan tipik problemlerden biridir. Akışın rejimi değiştikçe etkileşim sonucu oluşan yapılar ve şiddetleri da buna göre şekillenmekte olup, ses üstü hızdaki akış koşullarında jetin etkileşimi, akışın barındırdığı enerji göz önünde bulundurulduğunda kritik öneme sahiptir. Ses üstü hızda seyreden füzelerin kontrol yüzeyi olmadan, yanal itki jeti kullanılarak manevra edilmesi esnasında ses üstü akış alanı ile ona dik yönde üflenen jetin etkileşimi meydana gelmektedir (Şekil 1a). Yanal itki ile manevra edilen füzelerin irtifa kontrolü konvansiyonel manevra yüzeylerine kıyasla daha etkin bir şekilde

*Araştırma Görevlisi, Uzay Müh. Böl. E-posta: malkocoglu@itu.edu.tr

†Dr. Öğr. Üy., Uçak Müh. Böl., E-posta: acarh@itu.edu.tr

‡Prof. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: cetiner@itu.edu.tr



Şekil 1: Ses üstü akışa dik yönde üflenen jetin akışla oluşturduğu etkileşimin karşılaşıldığı örnekler: (a) Jenerik bir füze modeli etrafında ses üstü hızla sahip akış ile bu akışa dik yönde enjekte edilen jetin neden olduğu etkileşimin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizinden elde edilen akış alanı [Adeli ve Seiler, 2012] (b) Ses üstü yanmalı ramjet motorunda yakıt enjeksiyonu [Gao vd., 2019]

gerçekleştirilebilmektedir [Choi vd., 2020], [Gnemmi vd., 2008]. Fakat bu tür hava-uzay araçlarının performansı akışın jet ile etkileşiminden dolayı ortaya çıkan aerodinamik kuvvetlerin miktarına bağlıdır [Champigny, 1994]. Ses üstü akışa dik yönde üflenen jetin akışla etkileşiminin gerçekleştiği başka bir durum ise ses üstü hızda yanmanın gerçekleştiği ramjet motorlarında püskürtülen yakıtların, motorun yanma odasından geçen hava ile karışması (Şekil 1b) sırasında oluşmaktadır [Gruber vd., 1995]. Mümkün olan en az sürükleme ve momentum kaybıyla yanmanın gerçekleştirilebilmesi bu motorların performansında önemli bir rol oynamakta [Zhao vd., 2013], yakıtın yanma odası sınırlarından akış alanına jet verilerek üflenmesi basit ama etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [BenYakar, 2000].

Bahsi geçen örneklerden hareketle, ses üstü akış - jet etkileşiminde meydana gelen akış olaylarının detaylıca incelenerek ortaya çıkarılması ve anlaşılması havacılık ve uzay endüstrisi için önemli hususlar arasında yer almaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Trisonik Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki 15 cm x 15 cm Trisonik Rüzgar Tüneli'nde, $M_\infty = 2.60$ için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Hızlı kamera kullanılarak etkileşim bölgesi schileren tekniği ile görüntülenmiş, bu görüntüler yüzey yağ akım görüntüleme yöntemi ile desteklenmiştir. Böylelikle, ses üstü hızlarda oluşan jet etkileşiminin anlaşılmasına katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

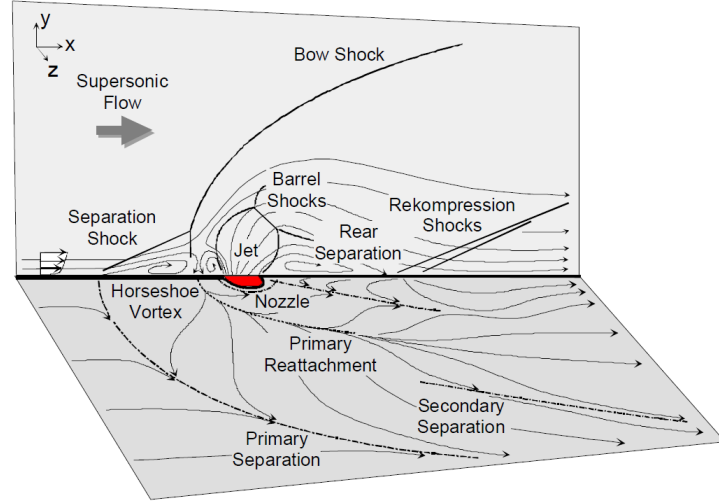
Öne Çıkan Akış Yapıları

Ses üstü akışa dik yönde enjekte edilen jetin akışla olan etkileşimi, oluşan yapılar yönünden oldukça zengindir. Dolayısıyla, bu akış yapılarının tanımlanması, jetin ses üstü akışa nüfuzu ve akışla karışma fenomenlerinin kavranması için önem arz etmektedir. Ortaya çıkan yapıların en başta geleni

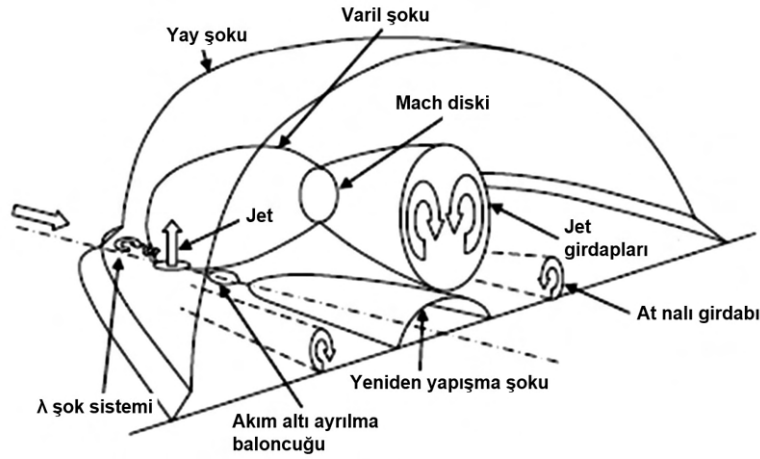
yay şoku olarak gösterilebilir (Şekil 2a ve 2b). Zira, yüksek basınca sahip jet, özellikle çıkış yüzeyinin yakınlarında akışa karşı bir nevi katı bir silindir gibi davranmakta ve ses üstü akışı kendi etrafından geçmeye zorlamaktadır. Bu nedenle, yay şoku enjeksiyon yüzeyinin yakınlarında neredeyse bir dik şok görünümünde olmaktadır. Jetin, enjeksiyon yüzeyinden uzaklaştıkça ses üstü akışla daha fazla karışması sonucu sahip olduğu momentum azalmakta ve bu durum yay şokunun enjeksiyon yüzeyi ile yaptığı açının giderek azalmasına, bir başka deyişle, yay şokunun enjeksiyon yüzeyinden uzaklaştıkça giderek bükülmesine sebep olmaktadır. Belirtildiği üzere, yay şokun enjeksiyon yüzeyi yakınlarında dik şok gibi davranmasından ötürü bu bölgede yüksek basınç gradyanları meydana gelmektedir. Bunun sonucunda, enjeksiyon yüzeyi üzerinde gelişen sınır tabaka jetin akım üstünde ayrılmaktadır. Bu ayrılmanın izleri, enjeksiyon yüzeyi üzerinde birincil ve ikinci ayrılma çizgileri ile ortaya çıkmaktadır. Ayrılan sınır tabaka yay şokunun akım üstünde, akım üstüne doğru bakan bir eğik şoka yol açmakta (Şekil 2b'de " λ şok sistemi" olarak ifade edilmiştir) ve bu şok da "ayrılma şoku" olarak adlandırılmaktadır [Viti vd., 2009]. Ayrılma şokunun, sınır tabakanın ayrılmasına bağlı olarak daimi olmayan bir karaktere sahip olduğu bilinmektedir [Cubbison vd., 1961]. Müteakiben, ayrılma şoku ve yay şokunun arasında bir "akım üstü resirkülasyon bölgesi" oluşmaktadır [Gnemmi vd., 2008].

Akış yapılarının incelenmesine akım altı yönünde ilerlenerek devam edilecek olursa, enjeksiyon yüzeyinden ses üstü akışa doğru çıkan az genişlemiş jet, adeta bir varil şeklini andıran "varil şoku" ile çevrelenmektedir. Varil şoku, jet çıkış yüzeyinin yakınlarında etrafına doğru genişlemekteyken, yüzeyden uzağa ilerledikçe ses üstü akışın etkisiyle daralmaktadır. Yay şokunun şiddetli olduğu ve dik şoku andırdığı bölüm, varil şokunun yakınlarında bulunmaktadır [Viti vd., 2009] ve varil şokunun içindeki az genişlemiş jetin ani bir şekilde "Mach diski" ile son bulması ile yay şokunun şiddeti de azalmaktadır. Mach diski, adından da görülebileceği üzere dairesel bir şekle sahip bir dik şoktur, jetin Mach sayısı bu şokun arkasında akışın hızı ses hızının altına düşmektedir. Mach diski, jet yörüngesini büyük ölçüde etkilemesinden ötürü önemlidir [Champigny, 1994]. Mach diskinin akım altında ses altı rejimdeki jet ile ses üstü akış arasında bir kayma yüzeyi (veya kayma tabakası) meydana gelmekte ve akım altı yönde ilerlendikçe bu iki akış daha da birbirine karışmaktadır [Viti vd., 2009]. Mach diskinden akım altı yönde ilerlendikçe akış yeniden hızlanmakta ve sonuç itibarıyla Mach diskinin altında kalan bölgede düşük basınca sahip "akım altı resirkülasyon bölgesi" (Şekil 2a'deki "akım altı ayrılma bölgesi") oluşmaktadır. Aynı yönde daha da ilerlendiğinde akış yüzeye yeniden yapışmakta ve bir "yeniden sıkışma şoku" (Şekil 2b'de "yeniden yapışma şoku") görülmekte; dolayısıyla, jet enjeksiyon yüzeyindeki basınç ani bir artış göstermektedir [Champigny, 1994]. Bu şok, varil şokunun yüzeye doğru bastırılmasından ötürü ortaya çıkmakta ve varil şokunun akım altında akışın genişlemesine engel olmaktadır.

Halihazırda bahsi geçen şokların yanı sıra girdaplar da etkileşim sonucu oluşan yapılardandır. Bu girdaplardan en dikkat çeken "at nalı girdabı"dır. Daha önce bahsedilen akım üstü resirkülasyon bölgesi akım altına ilerlendikçe at nalı girdabı halinde tezahür etmektedir. At nalı girdabı, etkileşimin üç boyutluluğuna işaret etmektedir. Bir başka önemli yapı ise "zıt yönlü dönen girdap çifti"dir. Akışın simetri düzlemine doğru, zıt yönde dönen bu karşılıklı girdaplar jetin ses akışla karışmasına katkıda bulunmaktadır. Dahası, jetin karışmasıyla birlikte, jet halinde verilen yakıtın yanma odasında hava ile daha etkin bir şekilde tepkimeye girmesi de zıt yönlü girdap çifti vasıtasıyla sağlanabilmektedir [Karagozian vd., 2003]. Zira, bu yapı akış alanında girdaplılığı artırmaktadır. İlaveten, kayma yüzeyi ile akışta gerçekleşen kararsızlıklar sonucu "geniş ölçekli yapılar" da ortaya çıkmaktadır [BenYakar, 2000]. Jet enjeksiyon deliğinin kenarında, jet ve ses üstü hızdaki akışın teğetsel hız farkından dolayı jet enjeksiyon yüzeyinden akım altı yöne doğru gidildikçe firkete (İng. "hairpin") şeklini andıran "kayma tabakası girdapları" nı görmek mümkündür. Kayma tabakası girdapları, yay şoku ile jet arasındaki daralan bölgede neden olduğu sıkışma ile birlikte yay şokunu etkileyebilmektedir [Viti vd., 2009]. Ayrıca bu girdaplar yarı-periyodik bir şekilde oluşmakta olup, varil şokunun da şeklini değiştirebilmekte; ilaveten, Mach diskinin oluşumuna ve konumuna etki edebilmektedir.



(a)



(b)

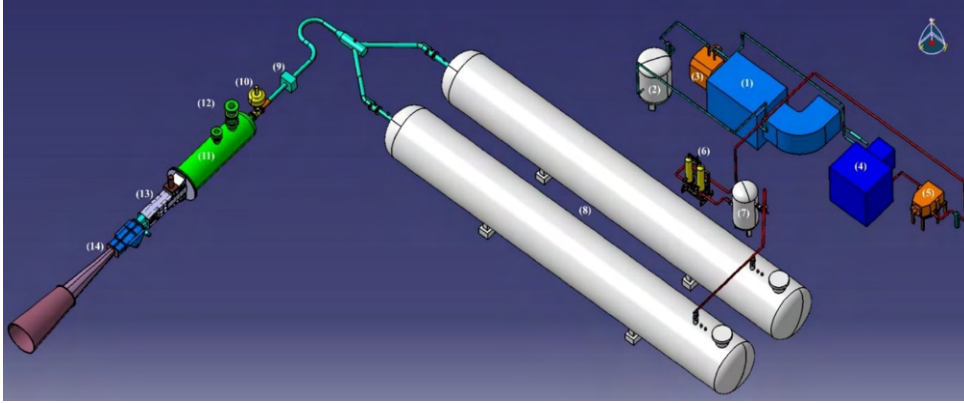
Şekil 2: Ses üstü akışa dik yönde üflenen jetin akışla oluşturduğu etkileşim sonucu ortaya çıkan akış alanları: (a) akışın simetri düzlemi ve jet enjeksiyon düzlemi [Kovar ve Schülein, 2006] (b) etkileşim sonucu oluşan akış alanının üç boyutlu izometrik görünümü ([Dong vd., 2018]'den alınarak yeniden düzenlenmiştir)

YÖNTEM

Rüzgar Tüneli

Deneylerin gerçekleştirildiği İTÜ 15 cm x 15 cm Trisonik Rüzgar Tüneli, deney odası kesit alanı ve uzunluğu sırasıyla 150 mm x 150 mm ve 400 mm olan, havanın basınçlandırılmış depo tanklarından kontrollü bir şekilde deney odasına verilmesi usulüne göre çalışan, üfleme tipte bir rüzgar tünelidir. Tünelde ses hızı civarı ve ses üstü akış rejimlerinde şok / sınır tabaka etkileşiminin yüksek hızlı schlieren görüntülemesi, iç ve karışık sıkıştırılabilir ses üstü hava alıklarında yüksek frekanslı çalkantılı basınç ölçümleri gibi yüksek hız uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Tünelin çalışma aralığı nominal Mach 0.4 – 4.0 olup, sıkıştırılabilir ses altı rejimden ses üstü rejime uzanan geniş bir rejimi kapsamaktadır. Bununla birlikte; $0.4 < M_{\infty} < 2.2$ aralığı için LINERS, $2.6 < M_{\infty} < 4.0$ aralığı içinse BLOCKS olmak üzere deneyin hedeflenen nominal Mach sayısına göre iki ayrı lüle seçimi

mevcuttur. Tünelin şematik görünümü Şekil 3'te sunulmuştur.



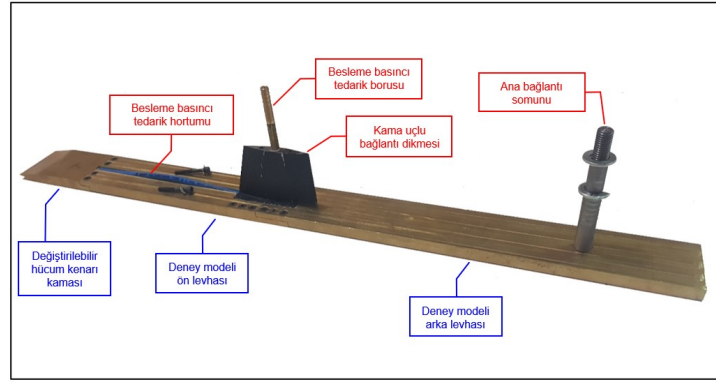
Şekil 3: İTÜ 15 cm x 15 cm Trisonik Rüzgar Tüneli'nin şematik görünümü [Tabanlı, 2014]: (1) birinci kademe kompresör (2) birinci kademe kompresörün depo tankı (3) nem alıcı (4) ikinci kademe kompresör (5) radyatör (6) yüksek basınçlı kimyasal kurutucu (7) ikinci kademe kompresörün depo tankı (8) dış depo tankları (9) izolasyon vanası (10) regülasyon vanası (11) dinlenme odası (12) emniyet membranı (13) deney odası (14) difüzör

Deney Modeli ve Jet Beslemesi

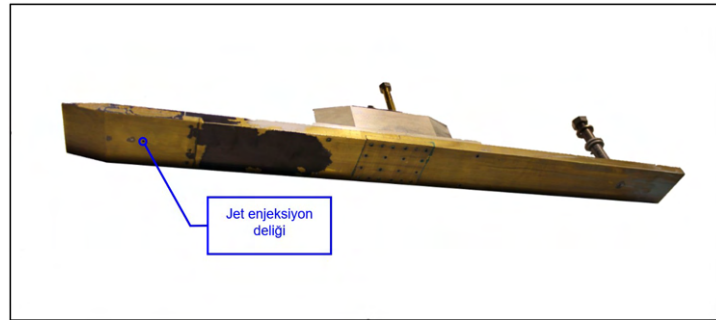
Deney odasının modeli bağlamaya yönelik herhangi bir yüzey içermemesinden ötürü deney odasının akım altı yönünde bir ek bağlantı bloğu yerleştirilerek, deney modeli hücum ve firar kenarlarında kama şekli bulunan bir ara bağlantı dikmesi vasıtasıyla bu bloktaki bağlantı deliklerine bağlanmıştır (Şekil 4a). Dolayısıyla, bu durum ek bağlantı bloğuna bağlı olarak modelin yaklaşık 660 mm gibi bir uzunluğa sahip olmasını zorunlu kılmıştır. Şekil 4c'de görüldüğü gibi modelin açıklığı kısa tutulmuştur (açıklık oranı, $AR = b/L \approx 0.085$). Model, ucu 10° yarım kama açısına sahip bir kama ile başlayarak akım altı yöne doğru düz levha halini almaktadır. Jetin enjeksiyon yüzeyine iletimi, deney modelinin üretimi hususunda ortaya çıkan bir başka husustur. Jet enjeksiyon deliği, yarım kamanın bitiminden belli bir mesafe ötede model yüzeyinde delinmiştir, böylece modelin yüzeyinden jet enjeksiyonunun yapılması mümkün hale gelmiştir. Bu deliğe jet besleme havasının ulaştırılabilmesi için poliüretan hortum kullanılmıştır. Yüksek basınçlı jet besleme için 10 barg'ye kadar basınçlandırma yapabilen bir kompresör kullanılmış, bu kompresörden besleme boruları aracılığıyla gelen havanın basıncı bir basınç regülatörü ile ayarlanmıştır.

Akım Görüntüleme

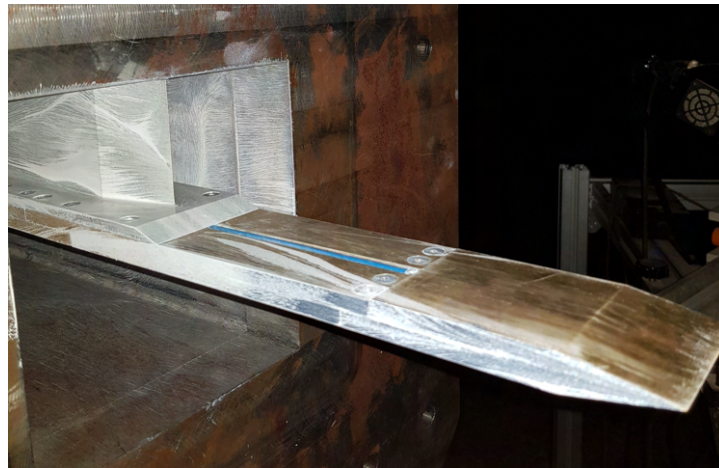
Özet bölümünde de bahsedildiği üzere, bu çalışma için gerçekleştirilen deneylerde schlieren görüntüleme ve yüzey yağ akım görüntüleme yöntemleri kullanılmıştır. Schlieren görüntüleme için Toepler'in Z-tipi schlieren kurulumu tercih edilmiştir (Şekil 5). Rutin tünel operasyon süreci başlatılarak tünele hava verilmesinin hemen ardından anlık dijital görüntü kaydı yapılmaya başlanmıştır. Gerçekleştiren deneylere ait schlieren görüntüleri Photron FASTCAM Mini UX100 model bir yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Schlieren görüntüleme için yüksek hızlı kamera sistemi ile eş zamanlı çalışabilecek ISSI LMS-DMHP-623 model bir LED ışık kaynağı kullanılmıştır. Schlieren görüntüleme için kullanılan kamera kayıt ayarları Tablo 1'de sunulmuştur. Tablodaki parametrelerden kayıt hızı, daimi olmayan akış olaylarını görüntülemek için fazlasıyla yeterli gelmektedir. Kayıt süresi ise tünelin başlangıç, tünel koşullarının sabitlenmesi ve ardından tünelin sonlanmasını gözeterek seçilmiştir. Yüzey yağ akım görüntüleme içinse deney kümesinin uygulanmasına başlanmadan önce titanyum dioksit (TiO_2), oleik asit ve parafinden (kerosen)



(a)



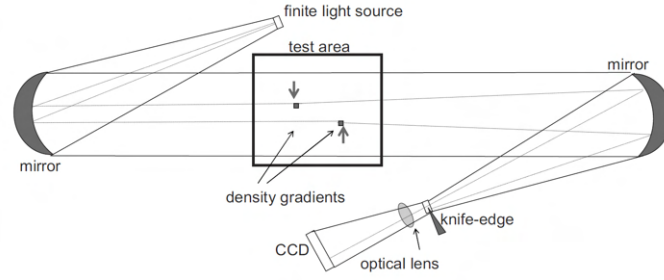
(b)



(c)

Şekil 4: Deneş modelinin (a) üst yüzeyi ve bağlantı parçası (b) alt (enjeksiyon) yüzeyi (c) Yağ akım görüntülemesi uygulanmış modelin ek bloğa bağlı haldeki izometrik görünümü

oluşan özel bir yağ karışımı hazırlanmıştır. Her bir deneş öncesinde, bu karışım model yüzeyine mümkün olduğunca eşit bir şekilde sürülmüş, ardından deneş odası kapatılmıştır. Deneşlerin bitiminden hemen sonra ise deneş odası ve ek blok ayrılmış, başka bir kamera vasıtasıyla modelin enjeksiyon yüzeyinin dijital görüntüleri kaydedilmiştir.

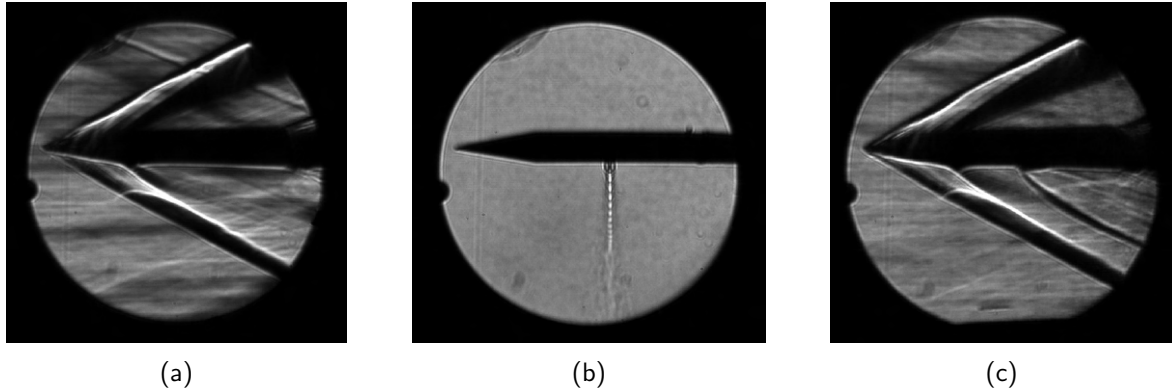


Şekil 5: Z-tipi schlieren kurulumunun şematize edilmiş bir görüntüsü [Estruch vd., 2009]

Tablo 1: Kamera kayıt ayarları

Parametre	Değer
Kayıt hızı (FPS)	1000
Pozlama hızı (1/s)	1/8000
Görüntü çözünürlüğü (piksel)	1280 × 1024
Kayıt süresi (s)	17.5

Deney kurulumunun tamamlanmasının ardından yapılan deneylere ait; ses üstü serbest akım yokluğunda jet enjeksiyonu, jet enjeksiyonu olmadan ses üstü akım ve hem jet enjeksiyonu hem de ses üstü serbest akımın varlığında schlieren görüntüleri Şekil 6'de sunulmuştur.



Şekil 6: $x_j = 30$ mm'de bulunan $d_j = 2$ mm çaplı jet deliği için schlieren görüntüleri (a) jet enjeksiyonu bulunmadan, yarım kama hücum kenarına sahip düz levhanın $M_\infty \approx 2.60$ iken oluşturduğu eğik şoklar (b) ses üstü serbest akımın yokluğunda 8 barg besleme basınçlı jet ve oluşan şok hücreleri (c) 8 barg besleme basınçlı jet ve $M_\infty \approx 2.60$ şartlarındaki akış alanı

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Yaklaşık olarak sabit ses üstü Mach sayısında ($2.59 < M_\infty < 2.66$), farklı jet basınç besleme değerleri, jet delik konumu ve çapları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. İncelenen parametreler aşağıdaki Tablo 2'de listelenmiştir. Bu tabloda; x_j , jet deliği merkezinin modelin hücum kenarını oluşturan yarım kama kısmının bitiminden itibaren uzaklığını, d_j jet deliğinin çapını, $P_{0,j}$ jet besleme basıncını, JBO jet basınç oranını, J ise jet Mach sayısı $M_j = 1.0$ için momentum akı oranını temsil etmektedir.

Tablo 2: Nominal Mach sayısı $M_\infty=2.60$ için ele alınan deney koşulları ve parametreler (AK: akış koşulu)

AK	x_j [mm]	d_j [mm]	M_∞	$P_{0,j}$ [barg]	JBO	J		
1	20	1	2.63	8	29.60	5.95		
2		2	2.64	8	30.75	6.15		
3	30	1	2.62	8	30.55	6.15		
4		2	2.61	8	30.30	6.15		
5	20	30	2	1	2.64	8	31.10	6.22

JBO ve J sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$JBO = \left(\frac{P_{0,j}}{P_\infty} \right) \quad (1)$$

$$J = \frac{(\rho U^2)_j}{(\rho u^2)_\infty} = \frac{(\gamma p M^2)_j}{(\gamma p M^2)_\infty} \quad (2)$$

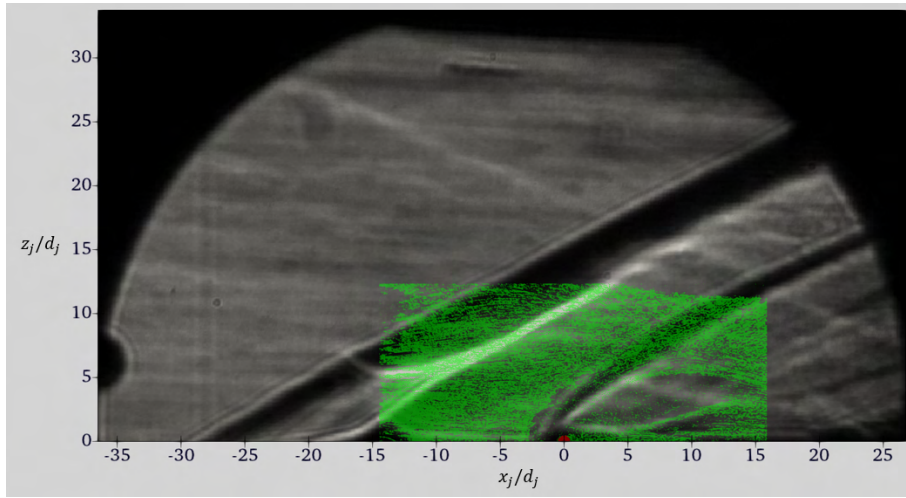
Deney kümesinden ayıklanan bu deneylere ait görüntüler, ortaya çıkan akış yapılarının netleştirilebilmesi için bir dizi art işleme (post-processing) tabi tutulmuştur. Bu işlemin alt aşamaları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. ham görüntülerde istenmeyen kısımların
 - (a) yatay eksen etrafında çevrilen schlieren görüntülerinden
 - (b) yağ akım görüntülerinden
 kırılması ve bir piksel başına düşen fiziksel uzunluğun denkleştirilebilmesi için üç noktalı yay yöntemi kullanılarak görüntülerin ölçeklenmesi (schlieren görüntüleri için bu noktalar pencere camının sınırlarında iken yağ akım görüntüleri içinse jet deliğinin sınırları üzerinde seçilmiştir)
2. jet deliği merkezlerinin hizalanması için schlieren ve yağ akım görüntülerinin üst üste çizdirilmesi
3. schlieren ve yağ akım görüntülerinin birbirine dik olarak konumlandırılmasıyla düzlemsel perspektif görüntülerinin oluşturulması
4. önemli akış yapılarına ait eğrilerin arkaplan perspektif görüntüleri üzerinde çizdirilmesi
5. bir önceki maddede zikredilen eğriler kalacak şekilde arkaplan görüntülerinin kaldırılması ve nihai perspektif eğri görüntülerinin elde edilmesi

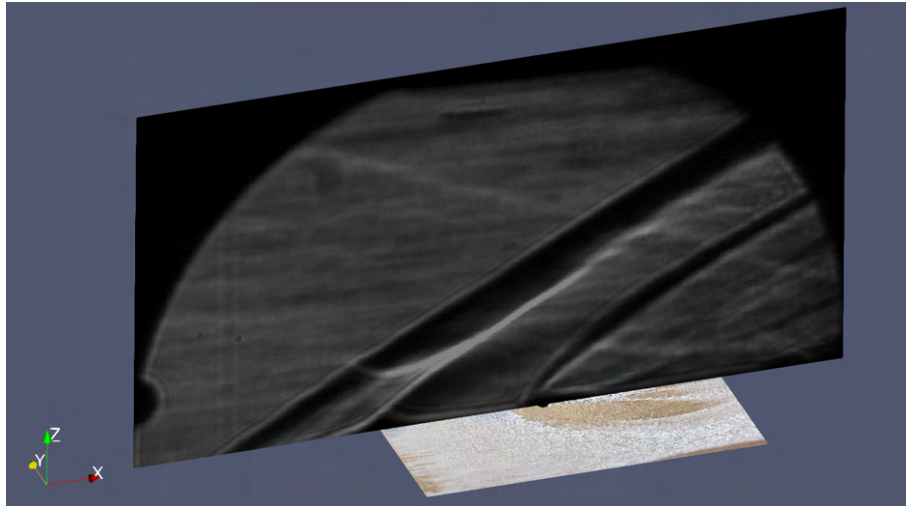
Bu ařamalara ait görseller Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.



(a)

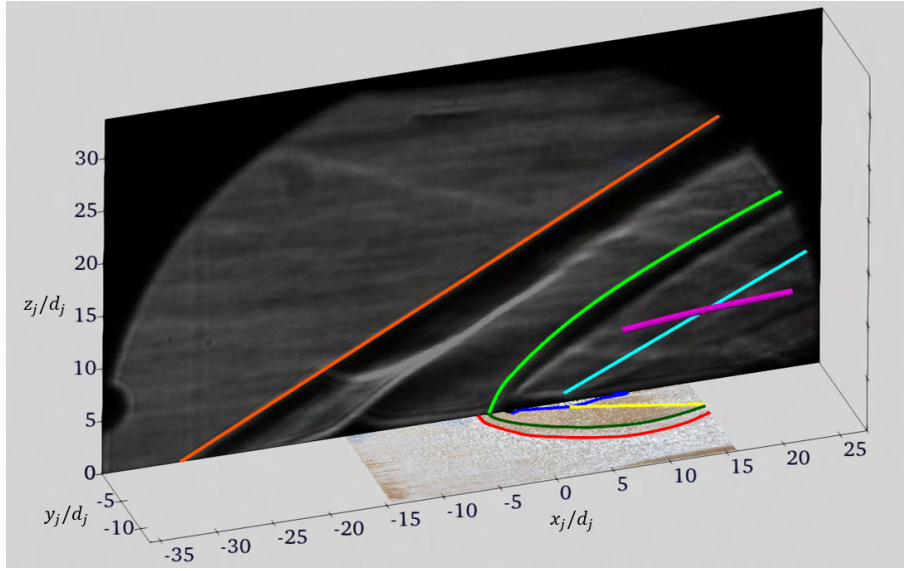


(b)

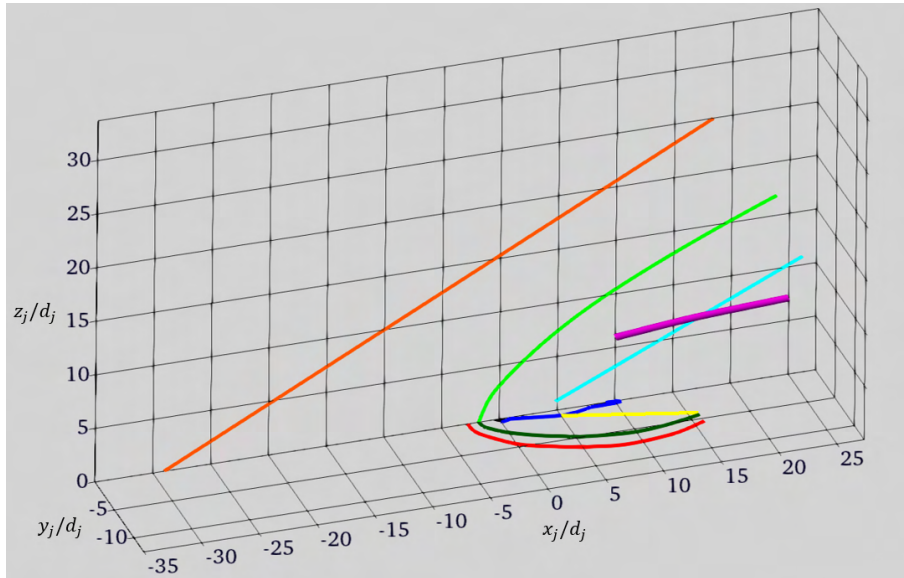


(c)

Şekil 7: Ham grntlerin art işlemesi (a) lekleme (b) jet deliklerinin akış ekseninde hizalanması
(c) dzlemsel perspektif grntlerin oluşturulması



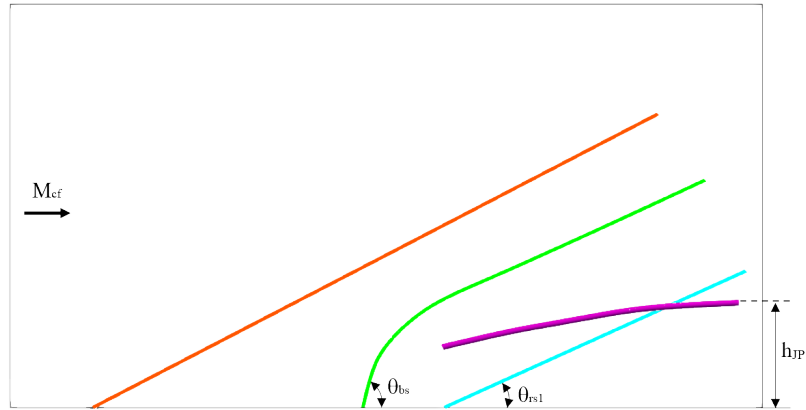
(a)



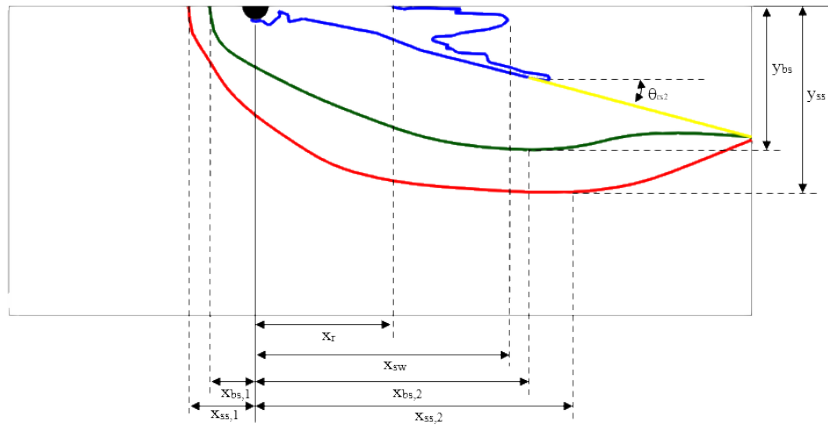
(b)

Şekil 8: Akış yapılarına ait eğrilerin eldesi (a) arkaplan görüntülerine eğrilerin çizilmesi (b) arkaplan görüntülerinin kaldırılması ve nihai eğrilerin ortaya çıkarılması

Art işlemeden sonra işlenmiş görüntülerden elde edilen karakteristik akış parametreleri Şekil 9'da sunularak Tablo 3'te tanımlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 9: Art işleme sonucu elde edilen eğriler ve karakteristik akış parametreleri (a) Akış düzlemi. Turuncu: hücum kenarı eğik şoku, açık yeşil: yay şoku, açık mavi: yeniden sıkışma şoku, mor: jet yörüngesi (b) Enjeksiyon yüzeyi. Kırmızı: ayrılma şoku, koyu yeşil: yay şoku, lacivert: akım altı ayrılma bölgesi, sarı: yansıma şoku

Tablo 3: İşlenmiş görüntülerden elde edilen karakteristik akış parametreleri

Görüntüleme yöntemi	Karakteristik parametre	Tanım
Schlieren	θ_{bs}	yay şoku açısı
	θ_{rs1}	yansıma şoku açısı
	h_{jp}	jet nüfuz yüksekliği
Yağ akım	θ_{rs2}	yansıma şoku açısı
	$x_{bs,1}$	yay şokunun jet delik merkezine olan mesafesi
	$x_{ss,1}$	ayrılma şokunun jet delik merkezine olan mesafesi
	$x_{bs,2}$	yay şokunun azami genişliğinin jet delik merkezine olan mesafesi
	$x_{ss,2}$	ayrılma şokunun azami genişliğinin jet delik merkezine olan mesafesi
	x_r	yeniden yapışma noktasının jet delik merkezine olan mesafesi
	x_{sw}	ayrılma kanat ucunun jet delik merkezine olan mesafesi
	y_{bs}	yay şokunun azami genişliği
	y_{ss}	ayrılma şokunun azami genişliği

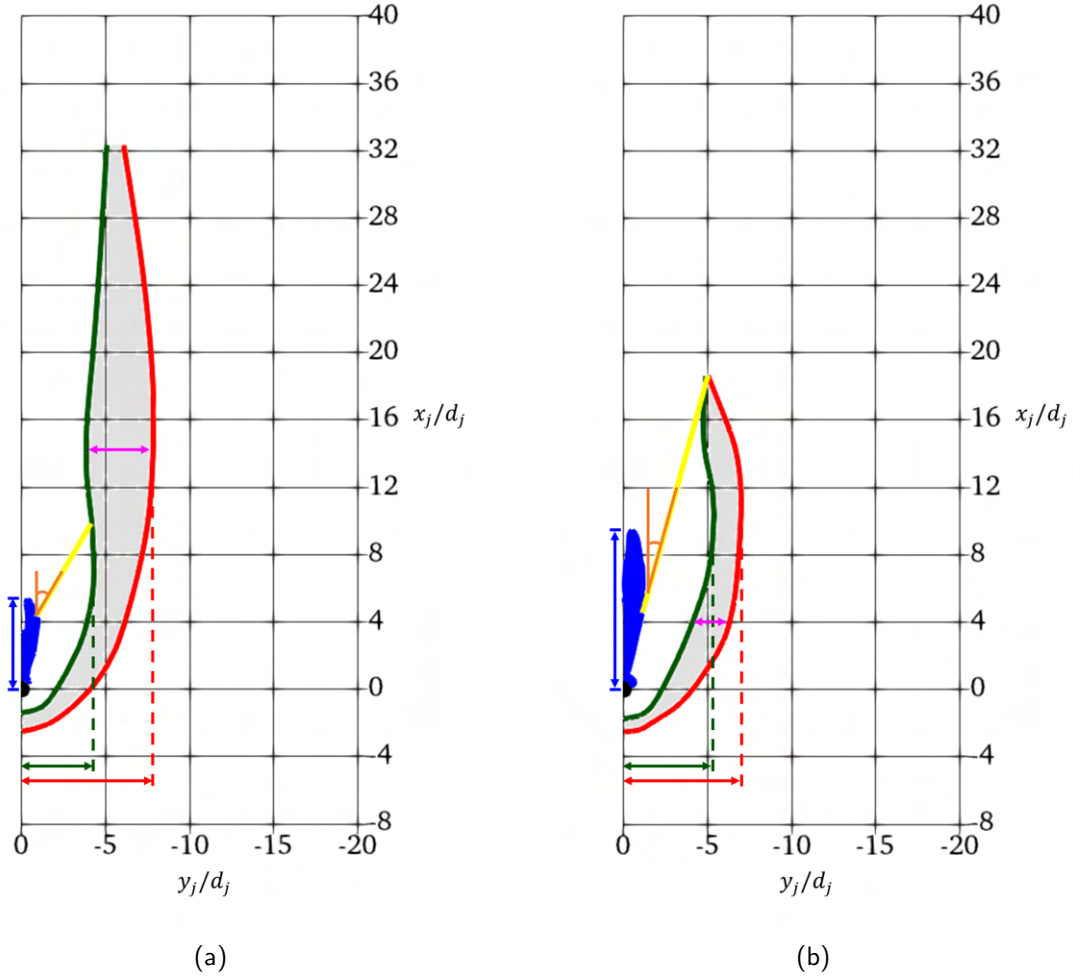
Tablo 2'de verilen akış koşulları ve Tablo 3'te listelenen karakteristik parametreler için deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir:

Tablo 4: Akış koşullarına ait karakteristik parametre değerleri

Karakteristik Parametre	AK #1	AK #2	AK #3	AK #4	AK #5
$\theta_{bs}(\circ)$	88	76	88	68	76 / 73
$\theta_{rs1}(\circ)$	23	24	23	25	N/A - N/A
$\theta_{rs2}(\circ)$	30	15	22	15	N/A - 18
$x_{bs,1}/d_j$	1.40	1.72	1.86	1.77	1.60 - N/A
$x_{ss,1}/d_j$	2.50	2.50	3.01	2.75	2.50 / 1.50
$x_{bs,2}/d_j$	6.84	10.60	13.40	9.60	13.84 - N/A
$x_{ss,2}/d_j$	14.24	11.23	12.60	8.54	7.35 / 8.00
x_r/d_j	3.35	5.12	5.01	2.68	2.60 / 6.38
x_{sw}/d_j	5.40	9.50	8.96	10.48	4.65 / 12.90
y_{bs}/d_j	4.29	5.36	6.40	5.53	5.81 - N/A
y_{ss}/d_j	7.83	6.99	9.60	7.30	7.58 / 5.38
h_{jp}/d_j	11.5	8.8	9.8	7.1	- / 5.5

Art işleme yapılan görüntüler, görüntüler arası sağlıklı mukayesenin yapılabilmesi için jet çapı ile boyutsuzlaştırılmıştır, dolayısıyla bu aşamadan itibaren karakteristik parametreler için yapılacak olan yorumlamalar boyutsuzlaştırılmış nicelikler üzerinden dile getirilecektir. Yarım kama bitiminden akım yönünde $x_j = 20$ mm mesafede, jet enjeksiyon çapının $d_j = 1$ mm'den 2 mm'ye çıkarılmasının akış alanına olan etkisi Şekil 10a ve 10b'de verilmiştir. Buna göre, ayrılma şokunun azami genişliği yaklaşık olarak %11 küçülürken, yay şokunun azami genişliği ise %25 artış göstermiştir. Böylelikle, $x_j = 20$ mm'de jet enjeksiyon çapı $d_j = 1$ mm'den 2 mm'ye çıkarıldığında at nalı girdap bölgesi daralmış ve at nalı girdap bölgesinin azami genişliği de akım üstü yönde kaymıştır. Öte yandan, akım altı ayrılma bölgesi akım doğrultusunda %80 oranında genişlerken, yansıma şokunun açısı ise 15° azalma göstermiştir. Şekil 11a ve 11b ise $x_j = 20$ mm iken jet enjeksiyon çapının $d_j = 1$ mm'den 2 mm'ye çıkarılmasından ötürü işlenmiş schlieren görüntülerinden elde edilmiş olan akış yapılarının değişimini içermektedir. Şekiller gözden geçirildiğinde yay şokunun enjeksiyon yüzeyi ile olan açısının 12° gibi kayda değer bir azalma gösterdiği ve jet enjeksiyon deliği merkezine olan akım üstü mesafesinin %23 oranında arttığı tespit edilmiştir. Buna rağmen, yeniden sıkışma şokunun açısı ise neredeyse değişmeden kalmıştır.

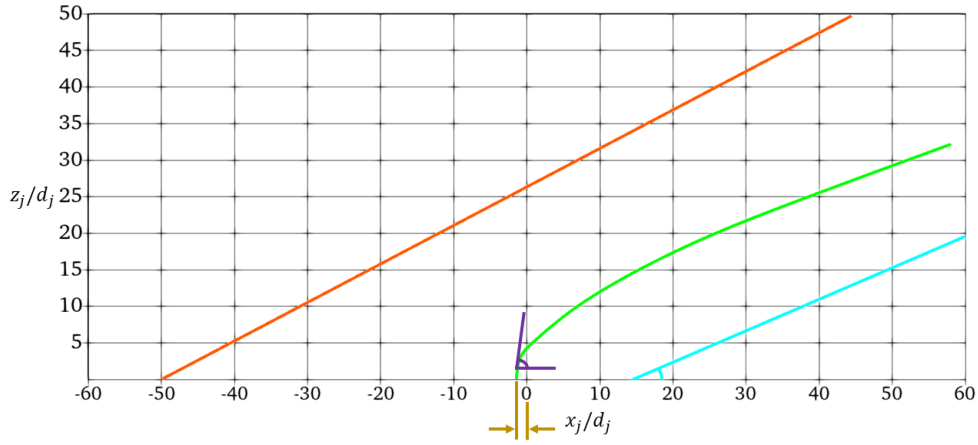
Jet enjeksiyon deliğinin merkezi $x_j = 20$ mm'den $x_j = 30$ mm'ye taşınarak jet enjeksiyon çapı $d_j = 1$ mm'den 2 mm'ye çıkarıldığında ise $x_j = 20$ mm'deki muadillerine göre ayrılma şokunun azami genişliğinin %24 oranla yine azaldığı, yay şokunun azami genişliğinin ise artmak yerine %14 azaldığı dikkati çekmiştir. At nalı girdap bölgesinin azami genişliği $x_j = 20$ mm'deki muadillerinde olduğu gibi yine akım üstü yöne kaymış, akım altı ayrılma bölgesi akım doğrultusunda %17 oranında genişlemiştir. $x_j = 20$ mm'deki mukayesede olduğu gibi yansıma şokunun açısı yine azalmış, fakat açı değişimi bu kez 6° olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, yay şokunun enjeksiyon yüzeyi ile yaptığı açı 20° azalmış ve yeniden sıkışma şokunun açısı ise 2° 'lik çok az bir değişimle neredeyse yine sabit kalmıştır. Bununla birlikte, $x_j = 30$ mm'de $d_j = 1$ mm'den 2 mm'ye çıkarıldığında, yay şoku bu kez $d_j = 1$ iken jet enjeksiyon deliğinin merkezine olan mesafesinin %5'i kadar akım altı yöne ilerlemiştir.



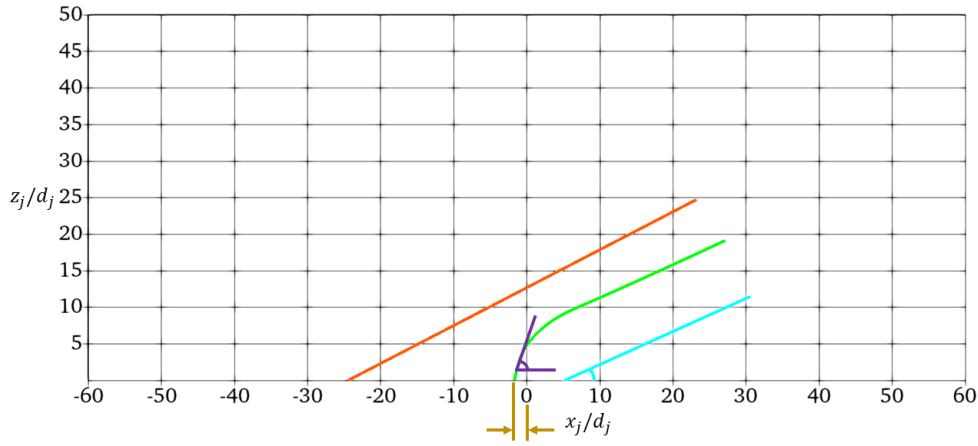
Şekil 10: Akım doğrultusunda aynı jet enjeksiyon merkezinde ($x_j = 20$ mm), jet enjeksiyon çapının $d_j = 1$ 'den 2 mm'ye çıkarılmasının yağ akım görüntülerinden elde edilen akış yapılarına etkisi: (a) $d_j = 1$ mm (b) $d_j = 2$ mm

Jet enjeksiyon deliğinin merkezinin konumu sabit tutulurken jet enjeksiyon çapının değiştirilmesinin akış alanına olan etkilerinin incelenmesinin ardından jet enjeksiyon çapı sabitken jet enjeksiyon deliğinin merkezinin akım doğrultusunda ötelenmesinin akış alanına olan etkisi incelenmiştir. Şekil 12a ve 12b'ye bakıldığında, ayrılma şokunun azami genişliği %23, yay şokunun azami genişliği ise %49 artmıştır. At nalı girdap bölgesinin azami genişliği akım altı yönde kaymakla birlikte akım altı ayrılma bölgesinin akım yönündeki uzunluğu %66 oranında önemli bir artış göstermiştir. Yansıma şokunun açısı ise 8° azalmıştır. Öte yandan, Şekil 13a ve 13b'deki schlieren görüntülerinden elde edilen akış yapılarına ait eğriler değerlendirildiğinde, yay şoku ve yeniden sıkışma şokunun açıları jet enjeksiyon deliğinin konumu değişse de yaklaşık olarak sabit kalma eğilimi göstermiştir. Bununla birlikte, yay şoku %33 oranında akım üstü yöne doğru kaymıştır.

Jet enjeksiyon çapı $d_j = 2$ mm iken, jet enjeksiyon deliğinin merkezinin $x_j = 20$ mm'den 30 mm'ye taşınmasının akış alanına olan etkisi incelendiğinde ise $d_j = 1$ mm için yapılan mukayeseye benzer şekilde ayrılma şokunun azami genişliği %4, yay şokunun azami genişliği ise %3 artmıştır. At nalı girdap bölgesinin azami genişliği yine akım altı yönde kaymış, akım altı ayrılma bölgesinin akım doğrultusundaki uzunluğu %10 oranında atmıştır. $d_j = 1$ mm için yapılan mukayeseden farklı olarak yansıma şokunun açısı bu sefer neredeyse sabit kalmıştır. Ayrıca, yay şokunun açısı da sabit kalmaktan uzak olacak şekilde 8° 'lik azalma göstermiş; yay şoku %3 oranında da olsa akım üstü yönde hareket etmiştir. Son olarak, çoğu mukayesede olduğu gibi yeniden sıkışma şokunun açısı neredeyse değişmemiştir.



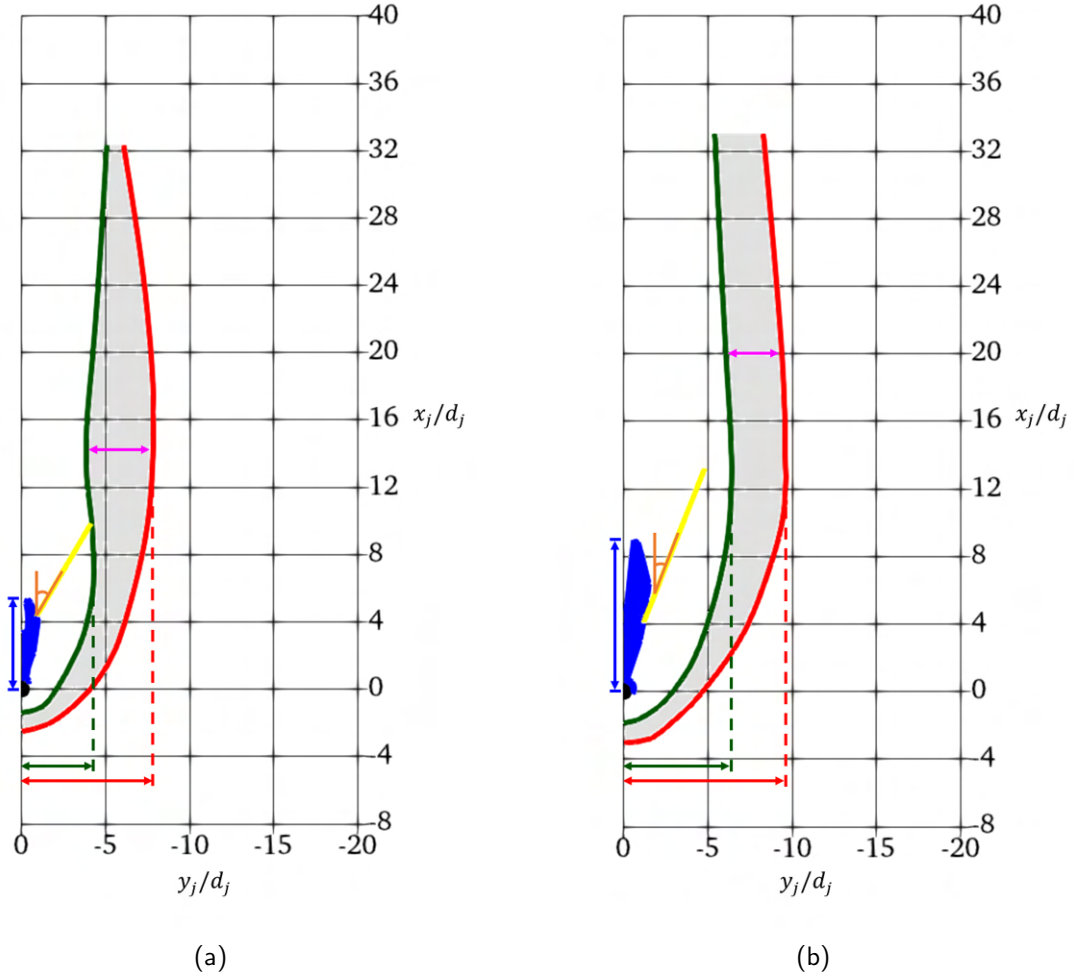
(a)



(b)

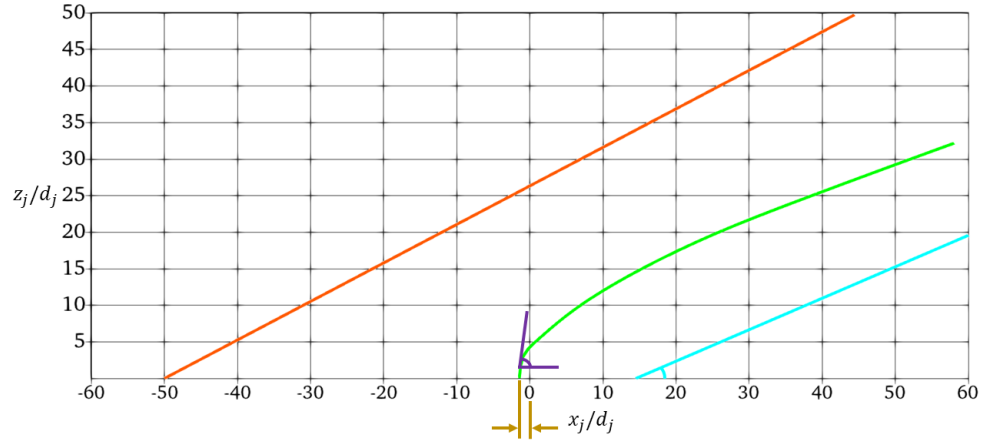
Şekil 11: Akım doğrultusunda aynı jet enjeksiyon merkezinde ($x_j = 20$ mm), jet enjeksiyon çapının $d_j = 1$ 'den 2 mm'ye çıkarılmasının schlieren görüntülerinden elde edilen akış yapılarına etkisi: (a) $d_j = 1$ mm (b) $d_j = 2$ mm

Tekil jet enjeksiyonlarında yapılan konfigürasyon değişikliklerinin akış alanına olan etkisinin incelenmesinin ardından $d_j = 2$ mm jet deliğinin merkezi $x_j = 20$ mm'de, $d_j = 1$ mm jet deliğinin merkezi ise $x_j = 30$ mm'de konumlanmış olmak üzere; tandem konfigürasyondaki jet enjeksiyonlarının tekil enjeksiyon muadilleriyle karşılaştırılması da yapılmıştır. Şekil 14a ve 14b'de verilen eğriler göz önüne alındığında; $x_j = 20$ mm'deki $d_j = 2$ mm çaplı jet enjeksiyonu için tandem konfigürasyonda tekil konfigürasyona göre ayrılma şoku ve yay şokunun azami genişliklerinin %8'er arttığı, at nalı girdap bölgesinin azami genişliğinin akım üstü yöne kaydığı, akım altı ayrılma bölgesinin akım doğrultusunda %51 küçüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 15a ve 15b'ye bakıldığında ise yay şokunun açısının neredeyse aynı kaldığı ve konumunun %7 oranında akım altı yöne ilerlediği görülmüştür.

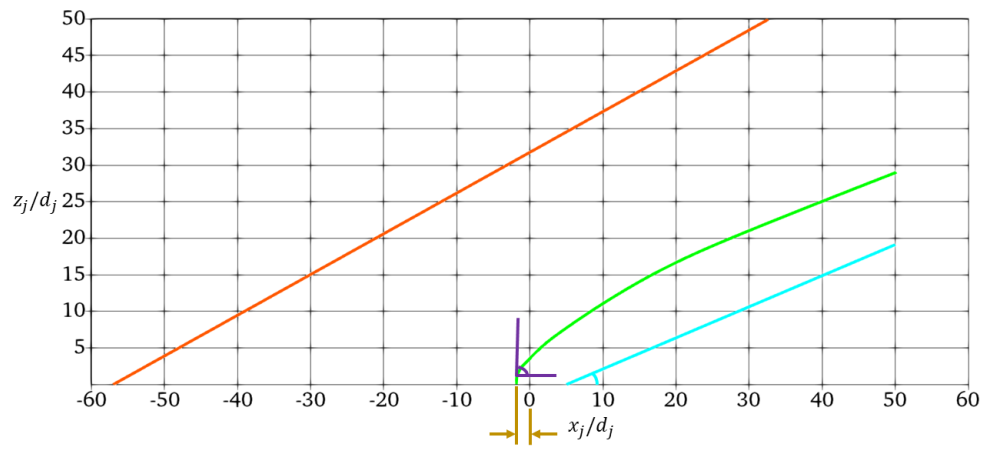


Şekil 12: Aynı jet enjeksiyon çapı için ($d_j = 1$ mm) jet enjeksiyon merkezinin $x_j = 20$ mm'den 30 mm'ye ötelenmesinin yağ akım görüntülerinden elde edilen akış yapılarına etkisi: (a) $x_j = 20$ mm (b) $x_j = 30$ mm

Tekil ve tandem konfigürasyonun $x_j = 30$ mm'deki $d_j = 1$ mm'lik jet enjeksiyonları karşılaştırıldığında ise ayrılma şokunun azami genişliğinin %23 oranında azaldığı, akım altı ayrılma bölgesinin akım yönündeki uzunluğunun %28 oranında azaldığı, at nalı girdap bölgesinin azami genişliğinin akım üstü yöne kaydığı ve yansıma şokunun açısının 2° ile 3° arası bir artış gösterdiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, $x_j = 20$ mm'deki $d_j = 2$ mm'lik jet enjeksiyonu karşılaştırmasından farklı olarak bu sefer yay şokunun jet enjeksiyon yüzeyi ile yaptığı açı 15° artmış ve yay şoku %72 gibi büyük bir oranda akım üstü yöne doğru ilerlemiştir.

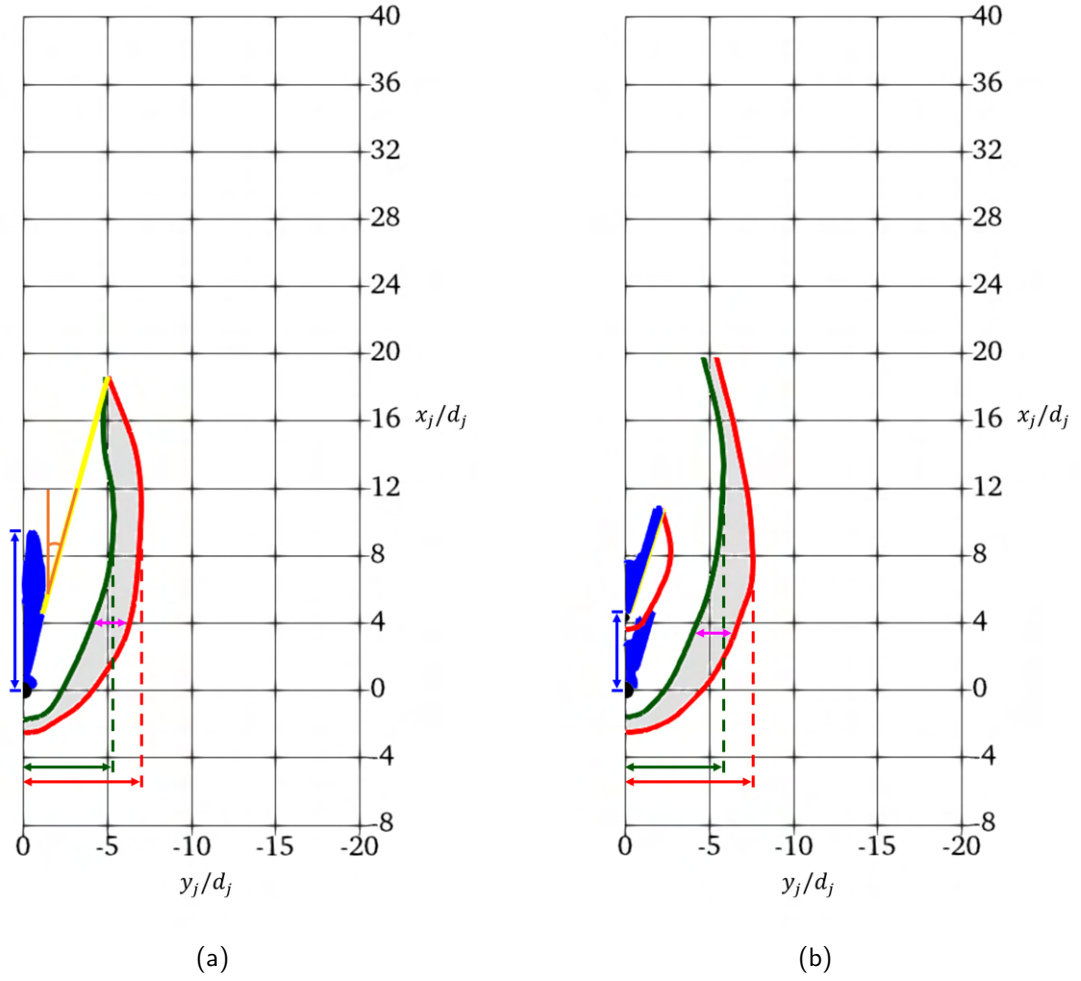


(a)

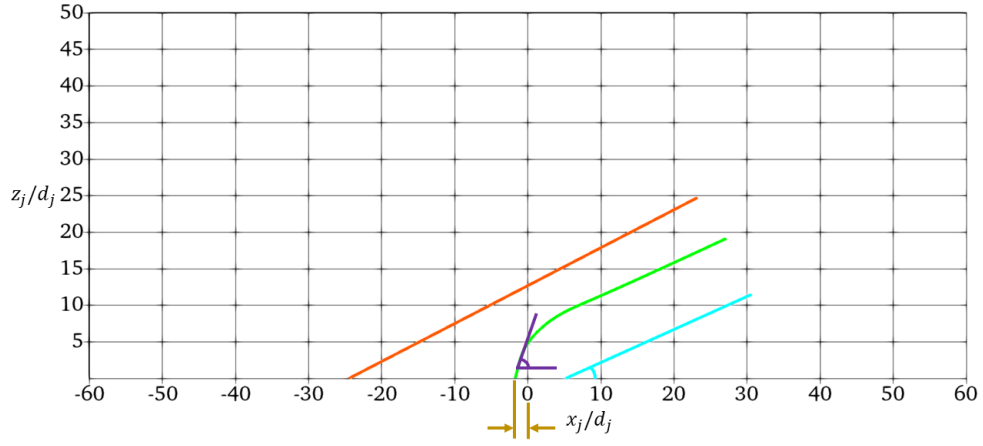


(b)

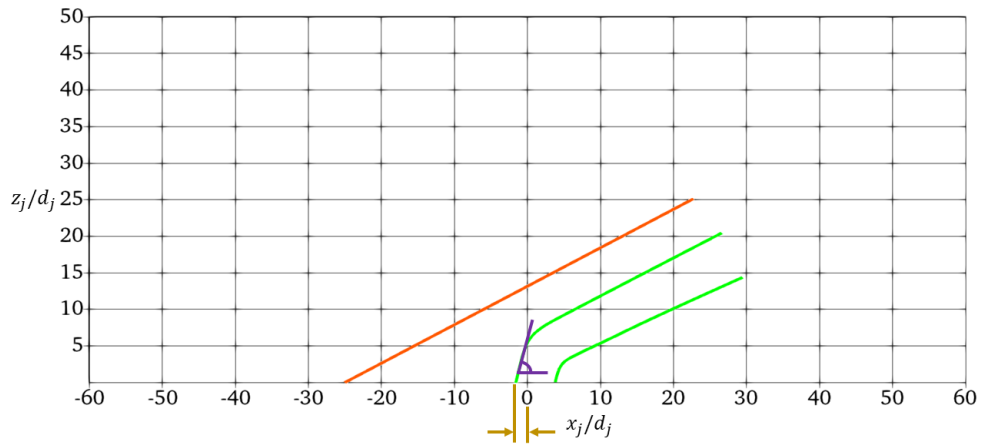
Şekil 13: Aynı jet enjeksiyon çapı için ($d_j = 1$ mm) jet enjeksiyon merkezinin $x_j = 20$ mm'den 30 mm'ye ötelenmesinin schlieren görüntülerinden elde edilen akış yapılarına etkisi: (a) $x_j = 20$ mm
(b) $x_j = 30$ mm



Şekil 14: Aynı jet enjeksiyon delik merkezi ($x_j = 20$ mm) ve çapı ($d_j = 2$ mm) için tekil ve tandem jet enjeksiyon konfigürasyonlarının işlenmiş yağ akım görüntüleri vasıtasıyla mukayesesi: (a) tekil (b) tandem



(a)



(b)

Şekil 15: Aynı jet enjeksiyon delik merkezi ($x_j = 20$ mm) ve çapı ($d_j = 2$ mm) için tekil ve tandem jet enjeksiyon konfigürasyonlarının işlenmiş schlieren görüntüleri vasıtasıyla mukayesesi: (a) tekil (b) tandem

SONUÇ

Bu çalışmada, sonlu açıklığa sahip bir yüzeyden ses üstü akışa dik yönde üflenen jetin akışla etkileşimi çeşitli akış görüntüleme yöntemleriyle ele alınmaya çalışılmıştır. Hızlı kamerayla elde edilen schlieren görüntüleri, jetin akım üstü yönünde bir yay şoku benzeri yapı oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca güçlükle de olsa ayrılma ve yay şokunun neden olduğu λ şoku da schlieren görüntülerinde tespit edilmiştir. Bununla beraber, yağ akım görüntülemesi sonucu elde edilen görüntülerde de bu yay ve ayrılma şoklarının oluşturduğu at nalı girdap yapısı ile beraber zıt yönlü girdap çiftinin varlığı belirlenmiştir. Böylelikle, akış düzleminin yanı sıra yüzey üzerindeki akış aktiviteleri de incelenen parametrelere bağlı olarak sunulmuştur.

Deneylerden elde edilen görüntüler jet enjeksiyon çapıyla boyutsuzlaştırılarak, enjeksiyon çapı ve konumu değişimlerinin akış alanına etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Jet enjeksiyon deliği merkezinin akım doğrultusundaki konumundan bağımsız olarak; aynı konumda jet çapı $d_j = 1$ mm'den 2 mm'ye çıkarılarak ses üstü akış alanına enjeksiyon yapıldığında ayrılma şokunun azami genişliğinin daraldığı, at nalı girdap bölgesinin azami genişliğinin akım üstü yönde kaydığı ve akım altı ayrılma bölgesinin genişlediği görülmüştür. Ayrıca, yansıma şokunun açısı ve yay şokunun enjeksiyon yüzeyi ile yaptığı açı azalmış; yeniden sıkışma şoku ise sabit açıda kalmıştır. Aynı enjeksiyon çapında, jet enjeksiyon deliği merkezinin konumu $x_j = 20$ mm'den 30 mm'ye ötelendiğinde ayrılma ve yay şoklarının azami genişliklerinin arttığı, akım altı ayrılma bölgesinin akım yönünde uzunluklarının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, at nalı girdap bölgesinin azami genişliğinin önceki mukayesenin aksine akım altı yönde kaydığı görülmüştür. $d_j = 1$ mm ile 2 mm koşullarında $x_j = 20$ mm'den 30 mm'ye ötelendiğinde; $d_j = 1$ mm için yansıma şokunun açısı azalırken $d_j = 2$ mm için neredeyse değişmemiştir. İlaveten, $d_j = 1$ mm için $x_j = 20$ mm'den 30 mm'ye ötelendiğinde yay şokunun açısı yine yaklaşık olarak değerini korumuş olsa da $d_j = 2$ mm iken jet enjeksiyon deliğinin konumu $x_j = 20$ mm'den 30 mm'ye alındığında bu açı azalmıştır. Bunun dışında, yeniden sıkışma şokunun açısı yine sabit kalma eğiliminde olmuştur. Son olarak, $x_j = 20$ mm enjeksiyon konumu ve $d_j = 2$ mm çapa sahip jet deliğinin akım altına $x_j = 30$ mm enjeksiyon konumu ve $d_j = 1$ mm çapına sahip ikinci bir jet enjeksiyon deliği konularak tandem enjeksiyon yapılmıştır. Tekil enjeksiyona kıyasla tandem enjeksiyon konfigürasyonundaki $d_j = 2$ mm'lik çapa sahip jet için ayrılma ve yay şoklarının azami genişliklerinin arttığı, at nalı girdap bölgesinin azami genişliğinin akım altı yöne kaydığı ve akım altı ayrılma bölgesinin küçüldüğü görülmüştür. Yine tandem konfigürasyona ait $d_j = 1$ mm'lik çapa sahip jet için tekil ve tandem enjeksiyonlar mukayese edildiğinde; ayrılma şokunun genişliğinin azaldığı, akım altı ayrılma bölgesinin akım doğrultusunda daraldığı ve at nalı girdap bölgesinin azami genişliğinin akım üstüne doğru kaydığı gözlenmiştir. İlaveten, yay şokunun enjeksiyon yüzeyi ile yaptığı açının arttığı ve yay şoku akım üstüne doğru ilerlediği tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- Adeli, R., Seiler, F., 2012. *Numerical Flow Visualisation of Side Jet / Cross Flow Interaction*, ISFV15 - 15th International Symposium on Flow Visualization, Minsk, 25-28 Haziran.
- Ben Yakar, Adela, 2000. *Experimental investigation of mixing and ignition of transverse jets in supersonic crossflows*, Doktora Tezi, Stanford Üniversitesi.
- Champigny, P., Lacau, R. G., 1994. *Lateral Jet Control for Tactical Missiles*, AGARD R-804 Special Course on Missile Aerodynamics. s. 3.1-3.57.
- Choi, K., Lee, S., Oh, K., Kim, C., 2020. *Numerical Investigation of Jet Interactions for a Lateral Thrust Jet Controlled Interceptor Operating at Medium Altitudes*, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Cilt 21, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences (KSAS), s. 39-49. DOI: 10.1007/s42405-019-00209-x.

- Cubbison, R.W., Anderson, B.H. and Ward, J.J., 1961. *Surface Pressure Distributions with a Sonic Jet Normal to Adjacent Flat Surfaces at Mach 2.62 to 6.4*, National Aeronautics and Space Administration (NASA), NASA TN D-580.
- Dong, H., Liu, J., Chen, Z., Zhang, F., 2018. *Numerical investigation of lateral jet with supersonic reacting flow*, Journal of Spacecraft and Rockets, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Cilt 55, Sayı 4, s. 928-935. DOI: 10.2514/1.A34096.
- Estruch, D., Lawson, N.J. and Garry, K.P. (2009). *Application of Optical Measurement Techniques to Supersonic and Hypersonic Aerospace Flows*, Journal of Aerospace Engineering, Cilt 22, Sayı 4, s. 383–395.
- Gao, F., Zhao, J., Chen, F. L., 2019. *Numerical Study on Internal Flow Field Dynamic Performance of Scramjet*, MATEC Web of Conferences, Cilt 288, EDP Sciences, s. 1-5. DOI: 10.1051/mateconf/201928802009.
- Gnemmi, P., Adeli, R., Longo, J., 2008. *Computational Comparisons of the Interaction of a Lateral Jet on a Supersonic Generic Missile*, AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, s. 1-9. DOI: 10.2514/6.2008-6883.
- Gruber, M. R., Nejad, A. S., Chen, T. H. Dutton, J. C., 1995. *Mixing and Penetration Studies of Sonic Jets in a Mach 2 Freestream*, Journal of Propulsion and Power, Cilt 11, Sayı 2, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., s. 315-323. DOI: 10.2514/3.51427.
- Karagozian, A. R., Cortelezzi, L. and Soldati, A., 2003. *Manipulation and Control of Jets in Crossflow*, Springer Vienna, ISBN: 978-3-7091-2792-6.
- Kovar, A., Schülein, E., 2006. *Effect of Side Jets in a Supersonic Flow Measured and Calculated on a Flat Plate and a Generic Missile Configuration*, RTO-MP-AVT-135 Innovative Missile Systems, Neuilly-sur-Seine, 18 Mayıs.
- Malkoçoğlu, U. E., 2022. *Experimental investigation of underexpanded transverse jet interaction with supersonic crossflow*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Tabanlı, H., 2014. *Implementation of fluctuating pressure in a supersonic inlet at ITU Trisonic Wind Tunnel*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Viti, V., Neel, R., Schetz, J. A., 2009. *Detailed flow physics of the supersonic jet interaction flow field*, Physics of Fluids, Cilt 21, Sayı 4.
- Zhao, Y. H., Liang, J., Zhao, Y. X., Liu, J. L., 2013. *Research on mixing characteristics and total pressure loss of the jet in supersonic crossflow*, 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, s. 1-10. DOI: 10.2514/6.2013-3751.