

150 mm ŞOK-GENİŞLEME TÜPÜ TEST DÜZENEGİNİN KAVRAMSAL VE MEKANİK TASARIMI

Onur Tunçer¹, Bülent Yüceil²
İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul

Fatoş Esen Orhan³, Sertaç Cürdaneli⁴
TÜBİTAK-SAGE, Ankara

ÖZET

Ses üstü ve hipersonik akış testlerinin kısa sürede yapılabileceği bir şok-genişleme tüpü test düzeneğinin ideal gaz varsayımı altında kavramsal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalara ve dünyadaki benzer örneklere dayanarak 7.3 MJ/kg_{hava} durma noktası entalpisine ulaşabilecek 150 mm anma çaplı bir şok-genişleme tüpünün mekanik tasarımı yapılmıştır. Sistem darbe esasına göre çalıştığı için tipik test süreleri 150 ila 1000 mikrosaniye mertebindedir. Test süresini maksimize etmek için kesimlerin boyu modüler bir şekilde ayarlanabilmektedir. İstenilen test koşulları ilk doldurma basınçlarının ayarlanması ile değiştirilebilmekte ve böylece değişik Mach sayılarında testler yapabilmek için lüle değiştirmek gerekmemektedir. Bu test düzeneği kullanarak birçok yüksek entalpili akışın deneysel incelemesini yapmak mümkün olabilecektir. Söz konusu test düzeneğinin kurulumu, TÜBİTAK-SAGE bünyesinde yürütülmekte olan İç Balistik Tasarım Altyapısı (İBTA) Projesi kapsamında Lalahan yerleşkesinde gerçekleştirilecektir.

GİRİŞ

Şok genişleme tüpü (shock expansion tube) geniş sıcaklık, basınç ve Mach sayısı aralığındaki koşulları kolayca üretebilen bir test düzeneğidir, çalışma prensibi ilk defa Trimpi tarafından ortaya konmuştur [8]. Yüksek entalpili akışların incelenmesinde sıklıkla kullanılırlar [4]. Bu düzenek kavramsal olarak şok tüpüne benzer fakat ikinci bir diyaframı ile bir genişleme kesimi bulunur (bkz. Şekil 1). Bunların ardında modelin yerleştirilip ölçümlerin yapılacağı bir test odası yer alır. Şok tüpünde sonlandırıcı duvarın yer alacağı yerde genişleme tüpünde gazların atılacağı bir boşaltma tankı yer alır. Genişleme tüpü içerisindeki test gazının özellikleri isteğe bağlı olarak ve sadece her bir kesimdeki doldurma basıncını ayarlamak suretiyle değiştirilebilir. Böylece diğer çoğu test altyapısında olduğu gibi pahalı lüleleri değiştirmek gibi çözümlere ihtiyaç kalmaz. Testler arasındaki süre de kısaltılmış olur.

Şok genişleme tüpü ani darbe (impulse) prensibine dayanan bir test altyapısı olduğundan benzer türde test kapasitesine sahip sürekli akış türü test altyapılarına kıyasla, malzeme, enerji ve işgücü olarak son derece ucuzdur. Test gazında istenilen basınç, sıcaklık ve Mach sayısı birbirlerinden ayrı olarak seçilebildiğinden istenilen akışın hem aerodinamik hem de termodinamik koşullarını test odası içerisinde üretmek mümkün olmaktadır. Bu da geniş operasyonel zarfları (hız ve yükseklik) bulunan scramjet motorları içerisinde bulunan akış koşullarının oluşturulmasına imkan sağlamaktadır.

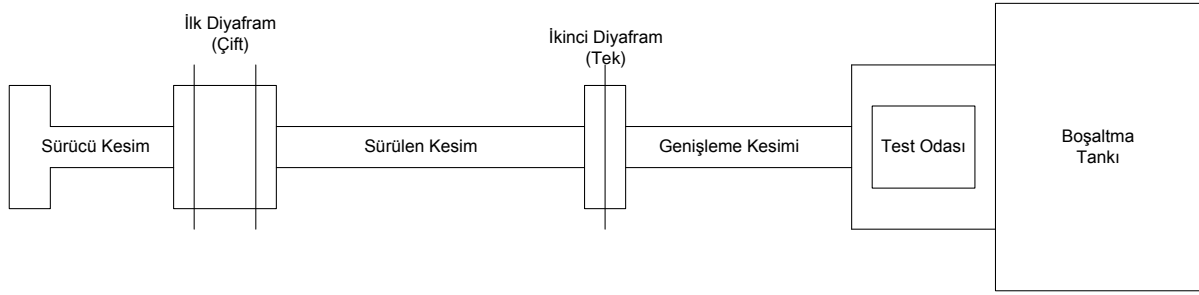
¹ Doç.Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: tuncero@itu.edu.tr, Sorumlu yazar
² Y.Doç.Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: yuceil@itu.edu.tr
³ Başuzman Araştırmacı, E-posta: fatos.orhan@sage.tubitak.gov.tr
⁴ Uzman Araştırmacı, E-posta: sertac.curdaneli@sage.tubitak.gov.tr

Şok tüpleri yahut şok tünelleri gibi diğer ani darbe prensibine dayalı test düzeneklerinin aksine, genişleme tüpleri istenilen yüksek hızları test gazını yüksek ara sıcaklıklara maruz bırakmadan üretebildiklerinden akış kimyasını bozmazlar ve test odasında gerçeğe daha yakın koşullar elde edilebilir. Ayrıca bu test düzeneğine hızlı valflerin eklenmesiyle test gazıyla etkileşime giren tepkimeli yahut tepkimesiz akışların da incelenmesi mümkün olabilir. Genişleme tüpünün en önemli dezavantajı ise çok kısa olan test süresidir. Tipik test süreleri 150-1000 μ s civarındadır. Ne var ki, teknolojiye bağlı olarak modern veri toplama cihazları ile bu kısa süreler içerisinde dahi istenilen verilerin elde edilmesi mümkün olmaktadır [2,6].

Tablo 1: Şok Genişleme Tüpü Test Düzeneğinin Yüksek Hızlı Yanma Çalışmaları Açısından Şok Tüpleri ile Karşılaştırılması [5]

Şok Tüpü	Şok Genişleme Tüpü
Uçuş Mach sayısı 10'un üzerindeki akışlarda önemli miktarda yanma kimyasını etkileyebilecek radikaller mevcuttur.	Uçuş Mach sayısı 16'ya kadar akış içerisinde radikal bulunmaz.
Test düzeneğinin simüle ettiği akışın durma noktası toplam sıcaklık ve basıncını içermesi lazımdır. Mach 12 üzerinde bu basınç 68,000 bardır.	Genişleme tüpü ile daha yüksek (örneğin $H > 5$ MJ/kg _{hava}) durma noktası basınçları ve sıcaklıklarına erişilebilir. Bunun için akışı durdurmaya ihtiyaç yoktur. Genişleme sayesinde akış hızlanır.
Lüle yüksek ısı geçişinden yahut uçan diyafram parçaları sebebiyle zarar görebilir.	Yüksek ısı geçişi yoktur. Diyafram parçalarının uçarak test objesine zarar vermesi engellenmelidir.
Test düzeneğinin simüle ettiği akışın durma noktası toplam sıcaklık ve basıncını içermesi lazımdır. Mach 12 üzerinde bu basınç 68,000 bardır.	Genişleme tüpü ile daha yüksek (örneğin $H > 5$ MJ/kg _{hava}) durma noktası basınçları ve sıcaklıklarına erişilebilir. Bunun için akışı durdurmaya ihtiyaç yoktur. Genişleme sayesinde akış hızlanır.
Uçuş Mach sayısı lüle geometrisine bağlıdır.	Uçuş koşulları sadece doldurma basınçlarının değiştirilmesi ile değiştirilebilir.
Lüle yüksek ısı geçişinden yahut uçan diyafram parçaları sebebiyle zarar görebilir.	Yüksek ısı geçişi yoktur. Diyafram parçalarının uçarak test objesine zarar vermesi engellenmelidir.
Sınır tabaka kalındır ve elimine edilmesi gerekebilir.	Daha ince bir sınır tabaka vardır.
Test süresi yaklaşık 1 ms mertebesindedir. Fakat lüle için başlangıç süresi gerekir.	Test süresi birkaç yüz mikrosaniye mertebesindedir. Lüle olmadığından başlangıç süresi gerekmez.
Test odası daha uzundur.	Test odası boyutları genişleme tüpü çıkışındaki çekirdek akışın büyüklüğüne bağlıdır.

Bir şok genişleme tüpünde kesimleri plastikten yahut ince metalden imal edilmiş diyaframlar birbirlerinden ayırır (bkz. Şekil 1). Sürücü kesim yüksek basınçta helyum gibi hafif bir gazla doldurulur. Sürülen kesim ise daha düşük basınçta olmak kaydıyla istenilen test gazı ile (örneğin hava) doldurulur. Genişleme kesimi adı verilen üçüncü kesim ise çok düşük basınçta yine helyum gibi hafif bir gaz ile doldurulur.



Şekil 1: Şok Genişleme Tüpü Test Düzeneği Şematik Gösterimi

KAVRAMSAL TASARIM

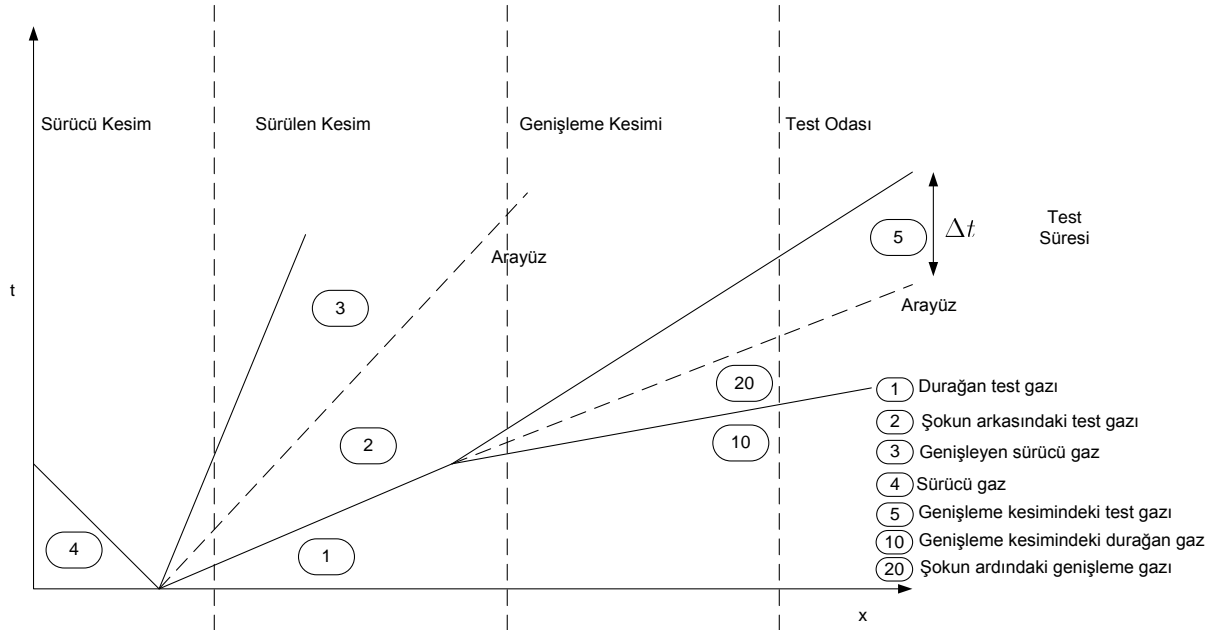
Genişleme tüpünün çalışma prensibini ve içerisinde oluşan olayların sırasını incelemek için x-t diyagramından yararlanılır (bkz. Şekil 2). Yataydaki eksen genişleme tüpü boyunca mesafeyi, düşeydeki eksen ise zamanı temsil eder. Genişleme tüpünün ilk kademesi bir şok tüpüne oldukça benzemektedir.

Sürücü ile sürülen kesimler arasındaki birinci diyafram yırtıldığı zaman ($t=0$) yüksek basınçtaki sürücü gaz daha düşük basınçtaki sürülen kesimin içerisinde yayılır. Bir şok dalgası (S_2) test gazının içerisinde yol alır ve ardındaki sıcaklık, basınç ve yoğunluğu artırır. Bu şok aynı zamanda test gazında bir ara hız (sabit laboratuvar referansına göre) oluşturur. Orta ila güçlü şoklar için bu hız Mach 1 ila 2 arasındadır. İlk şok sürülen kesimin sonuna ulaştığında, ikinci diyaframı yırtar ve genişleme kesimine girdiğinde ivmelenir. Şok dalgası ivmelenen gazda yüksek basınç, sıcaklık ve yoğunluk meydana getirir. Bu arada daha evvel şoklanmış test gazı eş zamanlı olarak sürülen kesimden düşük basınçlı genişleme kesimine geçerken soğur ve ivmelenir. Test gazının bu durumu yüksek Mach sayılı ve düşük sıcaklıklı bir akıştır. Bu akışın test odasına vardığı zaman ile terkettiği zaman arasındaki yeknesak akış sırasında istenilen ölçümler gerçekleştirilebilir [6].

Biraz daha detaylandırmak gerekirse, genişleme tüpünün sonunda yani test odası girişinde duran bir gözlemci ilk önce S_2 şok dalgasına şahit olacaktır, daha sonra ise ivmelenen gazın kısa süreli sürekli-rejimde akışı ile karşılaşacaktır. Bir anda, gözlemci test gazının gelişini haber veren temas yüzeyini görecektir. Daha sonra test odasına giren test gazının sürekli rejimde aktığı süre "test süresi" olarak isimlendirilmektedir. Seyrekleşme dalgalarında birinin ikinci diyaframdan geçip test odasına girip oradaki akışı bozmasıyla test süresi sona erer. Ölçümlerin bu süre içerisinde tamamlanması zorunluluğu vardır [6].

Şok genişleme tüpünde oluşan şok ve seyrekleşme dalgaları Şekil 2'de x-t grafiğinde gösterilmiştir. Şekilde aynı zamanda hesaplamalarda kullanılan gaz durumlarının isimlendirilmesi verilmiştir. Bu isimlendirme ilk olarak şok genişleme tüpü test düzeneğini tarif eden Trimpi tarafından yapılmıştır [8].

Bu analizde şok genişleme tüpü içerisindeki gazların ideal ve kalorifik olarak mükemmel oldukları varsayılmıştır. Aynı zamanda şok genişleme tüpünde diyaframların yırtılmaları sonucunda meydana gelen tüm şokların kuvvetli oldukları varsayılmıştır ($P_2/P_1 \gg 1$, $P_{20}/P_{10} \gg 1$). Kuvvetli şoklarda aşağıdaki denklemler geçerlidir (Eş. 1-3) [7].



Şekil 2: Şok Genişleme Tüpü x-t Grafiği ve Gaz Durumlarının İsimlendirilmesi

$$\frac{u_2}{a_1} \approx \sqrt{\frac{2}{\gamma_1(\gamma_1+1)} \frac{P_2}{P_1}} \quad (1)$$

$$\frac{a_2}{a_1} \approx \sqrt{\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1+1} \frac{P_2}{P_1}} \approx \sqrt{\frac{\gamma_1(\gamma_1-1)}{2} \frac{u_2}{a_1}} \quad (2)$$

$$M_2 \approx \sqrt{\frac{2}{\gamma_1(\gamma_1-1)}} \quad (3)$$

Birinci şok (S_1) Mach sayısı için aşağıdaki ifade (Eş. 4) yazılabilir.

$$M_{S1} \equiv \frac{U_{S1}}{a_1} \approx \sqrt{\frac{\gamma_1+1}{2\gamma_1} \frac{P_2}{P_1}} \approx \frac{\gamma_1+1}{2} \frac{u_2}{a_1} \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemler aynı zamanda ikinci şok (S_2) için de geçerlidir. Hesaplamalar için indisleri 10 ve 20 olarak değiştirmek yeterlidir [7].

Bir genişleme tüpü içerisinde konvansiyonel şok tüpünün aksine zamanda durağan olmayan bir genişleme (dolayısıyla akımın hızlanması) olayı vardır [7,8]. Bu genişleme olayı boyunca iç enerji değişimi aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanır.

$$du = - \left(\frac{dh}{a} \right)_s \quad (5)$$

Yukarıdaki denklem genişleme tüpü boyunca 2→5 durumları arasında entegre edilecek olursa aşağıdaki ifade elde edilir. Burada denklemin sol ve sağ tarafındaki ifadeler Riemann invariantlarıdır.

$$\frac{2}{\gamma_1 - 1} a_2 + u_2 = \frac{2}{\gamma_1 - 1} a_5 + u_5 \quad (6)$$

Buradan M_2 Mach sayısı ile test Mach sayısı M_5 arasındaki ilişkiyi kuracak olursak,

$$\frac{a_5}{a_2} = \frac{1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_2}{1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_5} \approx \frac{1 + \sqrt{\frac{\gamma_1 - 1}{2\gamma_1}}}{1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_5} \quad (7)$$

Düzenlersek,

$$\frac{a_5}{a_1} = \frac{a_5}{a_2} \frac{a_2}{a_1} \approx \frac{1 + \sqrt{\frac{\gamma_1 - 1}{2\gamma_1}}}{1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_5} \sqrt{\frac{(\gamma_1 - 1) P_2}{(\gamma_1 + 1) P_1}} \quad (8)$$

Bu durumda istenilen test Mach sayısı M_5 için gereken şok basınç oranı P_2/P_1 aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{P_2}{P_1} \approx \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} \left(\frac{1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_5}{1 + \sqrt{\frac{\gamma_1 - 1}{2\gamma_1}}} \right)^2 \left(\frac{a_5}{a_1} \right)^2 \quad (9)$$

Sürülen kesimin (test gazının bulunduğu kesim) ilk basıncı P_1 ile test odasındaki statik basınç oranı Eş. 10 ile hesaplanır [7].

$$\frac{P_1}{P_5} = \frac{P_1}{P_2} \left(\frac{a_2}{a_5} \right)^{\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \approx \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1} \left(\frac{1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_5}{1 + \sqrt{\frac{\gamma_1 - 1}{2\gamma_1}}} \right)^2 \left(\frac{a_5}{a_1} \right)^2 \quad (10)$$

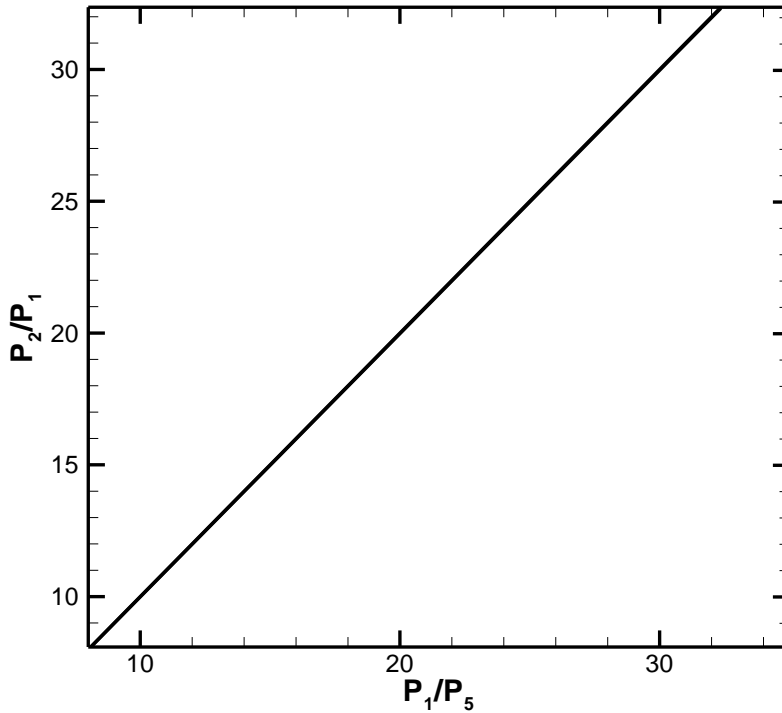
Doldurma Basınçlarının Hesabı

Şok genişleme tüpünün tasarımının yapılabilmesi için değişik kesimlerin doldurma basınçlarının değerleri tam olarak bilinmelidir. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için de şok genişleme tüpünün hangi amaçla tasarlandığı, hangi uçuş zarfını kapsayacağı tam olarak bilinmelidir. Test kesimindeki toplam basınç P_{t5} , toplam sıcaklık T_{t5} ve Mach sayısı M_5 ile uçuş koşulu arasında bir ilişki vardır.

Sürülen Kesim: Sürülen kesim test gazının (hava yahut N_2) bulunacağı kesimdir. Atmosfere yeniden giriş çalışmaları için sürülen kesim ilk basıncının P_1 en çok 300 mmHg olması yeterlidir (Trimpi, 1962). Scramjet çalışmaları için ise en çok 75 mmHg seviyesindeki doldurma basıncının hava aracının uçuş zarfını karşılayacağı öngörülmektedir. Bu kesimdeki en düşük ilk basıncın P_1 birkaç torr mertebesinde olması öngörülmektedir.

P_1 basıncı istenilen P_{t5} 'e göre seçilir. P_5 basıncı P_1/P_5 oranından hesaplanır. Toplam basınç hesabında kullanılan yoğunluk ise P_5 basıncı ve T_5 sıcaklığı ($T_1=T_5$ varsayılabilir) kullanılarak ideal gaz denkleminde bulunabilir. Simüle edilen uçuş irtifası yükseldikçe doldurma basıncı buna paralel olarak azalır.

a_1 ile a_5 ses hızları eşit ve özgül ısılar oranı $\gamma=1.4$ kabul edilecek olursa, genişleme tüpünün performans eğrisi Şekil 3'deki gibi çizilir. Bu eğride yatay eksen durağan haldeki test gazı basıncı P_1 ile bu gazın test odasına ulaştığındaki basıncın P_5 oranını göstermektedir. Düşey eksen ise test gazının sürücü gaz tarafından şoklandıktan sonraki basıncı P_2 ile ilk basınç P_1 oranını göstermektedir. Bu oran birinci şok (S_1) Mach sayısı ne kadar yüksek ise o kadar yüksek olmaktadır. Şekilden de görüleceği üzere ideal gaz ve kuvvetli şok ve eşit ses hızları varsayımları altında bu iki oran hemen hemen birbirinin aynı olmaktadır. Gerçek testlerde ise bu durumdan bir miktar sapma beklenebilir.



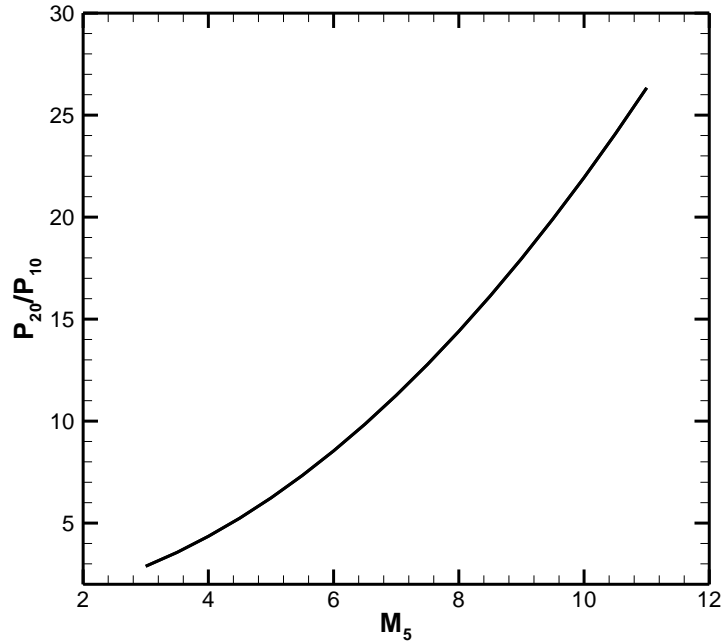
Şekil 3: Şok Genişleme Tüpü Performans Eğrisi

Genişleme Kesimi: Bu bölümde genişleme kesimindeki gazın ilk durumu (10) üzerinde durulacaktır. Herhangi bir gaz için basınç oranı P_{20}/P_{10} aşağıdaki gibi verilebilir [7].

$$\frac{P_{20}}{P_{10}} = 1 + \frac{u_{20}}{R_{10}T_{10}} \frac{1}{1-\rho_{10}/\rho_{20}} = 1 + \frac{u_5^2}{T_{10}R_u} \frac{(MW)_{10}}{1-\rho_{10}/\rho_{20}} \quad (11)$$

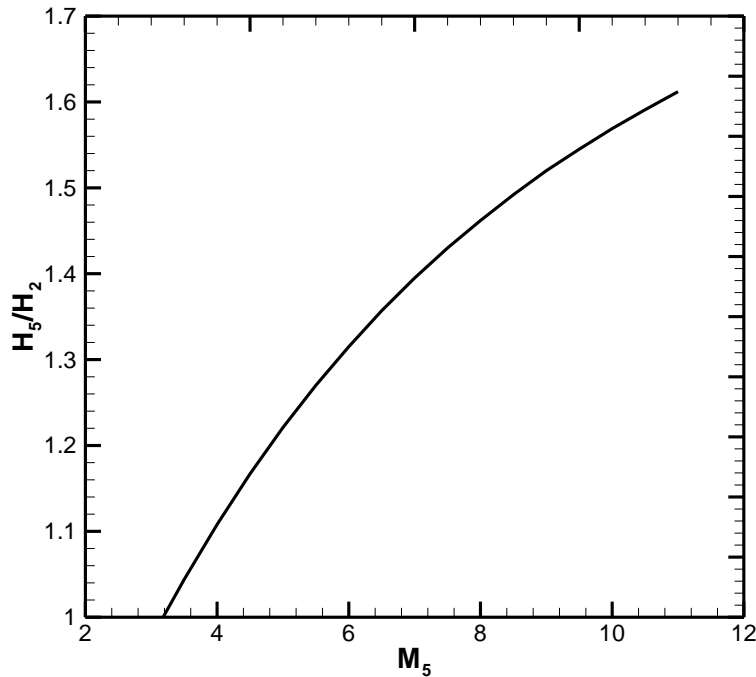
Sonuçta, $P_{20}=P_5$ ve $U_5=\text{sabit}$ olduğundan, bu kesim düşük moleküler ağırlıklı bir gaz ile doldurulmalıdır. Bu maksatla helyum gazı kullanım için uygundur. P_{10} basıncı scramjet testleri için birkaç on Pascal mertebesinde (örneğin 10 ila 100 Pascal aralığında) olacaktır.

Şekil 4 test Mach sayısı M_5 ile ikinci şok (S_2) basınç oranı P_{20}/P_{10} arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İkinci şok test gazının genişleme kesimi girişinde ince ikinci diyaframı yırtması sonucu oluşmaktadır. Bu şok dalgasının kuvveti arttıkça test Mach sayısı da o kadar fazla olmaktadır. İki parametre arasında şekilden anlaşılacağı üzere üstel bir ilişki vardır.



Şekil 4: Test Mach Sayısı ile İkinci Şok Basınç Oranı Arasındaki İlişki

Bir sonraki şekilde ise (bkz. Şekil 5) test Mach sayısı M_5 ile toplam entalpi oranı H_5/H_2 arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şok tüpü test düzeneklerinde bu oran daima bir olmaktadır ($H_5/H_2 \equiv 1$). Şok genişleme tüpünde ise genişleme kesiminde test gazının ivmelenmesi sayesinde toplam entalpi oranı birden büyük olabilmektedir. Bu test düzeneğinin avantajı böylelikle açıkça görülmektedir. Düşük test Mach sayıları için bu oran bire yakın olmakla birlikte artan Mach sayısı ile birlikte artmakta ve asimptotik olarak 1.7 civarında bir değere yaklaşmaktadır.



Şekil 5: Test Mach Sayısı ile Genişleme Tüpü Toplam Entalpi Oranı Arasındaki İlişki

Sürücü Kesim: Sürücü gazı durumunun diyafram yırtıldığı zaman 4→3 haline gelmesi izantropik kabul edilecek olursa aşağıdaki denklem vasıtasıyla sürücü kesimi için gereken doldurma basıncı hesaplanabilir [7].

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{P_4}{P_2} = \left(1 - \frac{u_2}{a_4} \frac{\gamma_4 - 1}{2}\right)^{-\frac{2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}} \quad (12)$$

Yukarıda denklemden de görüleceği üzere u_2/a_4 oranının küçük olması avantajlı bir durumdur. İşte bu yüzden sürücü kısımda ses hızının yüksek olduğu bir gaz olan helyum gazı kullanılır.

Sürücü kesimin doldurma basıncı test koşuluna göre değişmekle birlikte bu basınç ilgi duyulan çalışma koşulları için 50 barın altındadır [5]. Sürücü kesim güvenlik sebebiyle imalattan sonra 100 bar basınç altında hidrostatik testlere tabi tutulmalıdır.

Başlangıç Koşulu Basınçları

Genişleme tüpü test düzeneğinin her bir kesimi için basınç hesapları yapıldıktan sonra öngörülen başlangıç koşulları (ilk doldurma basıncı) Tablo 2'te belirtilmiştir. Bu tablodaki değerler belirtilirken hem yapılan ideal gaz hesaplamaları dikkate alınmış, hem de açık literatürdeki benzer test düzeneklerinin çalışma koşulları göz önüne alınmıştır.

Tablo 2: Genişleme Tüpü Başlangıç Koşulları Zarfı

	En Düşük Basınç	En Yüksek Basınç	Gaz Bileşimi
Sürücü Kesim	0.2 MPa	5 MPa	%100 Helyum
Sürülen Kesim	0.5 kPa	5 kPa	%100 Hava-%100 N ₂
Genişleme Kesimi	3.5 Pa	1000 Pa	%100 Helyum

Uzunluk Hesabı

Şok genişleme tüpündeki değişik kesimlerin (sürülen, sürücü, genişleme) uzunlukları test süresini belirlemektedir. Bu bölümde test süreleri belirtilirken, uzunluklar test odasındaki ses hızı a_5 ve test süresi Δt ile normalize edilmiştir. Örnek test süreleri Tablo 3'te kısaca özetlenmiş olup, bu sürenin 150 ila 1000 μs aralığında olması öngörülmektedir.

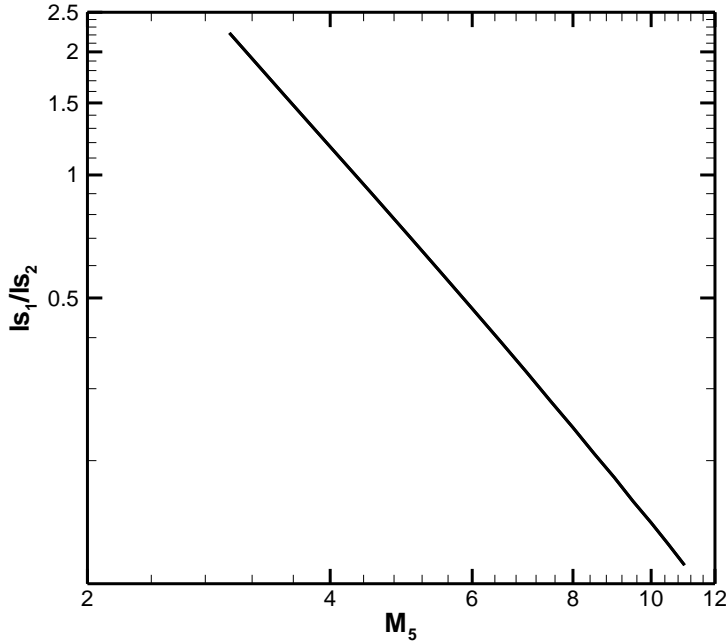
Genişleme Kesimi: Test süresini genişleme kesiminin uzunluğu belirlemektedir. Buna göre boyutsuz test süresi $a_5 \Delta t / l_{s2}$ ile genişleme kesiminin uzunluğu l_{s2} arasındaki ilişki aşağıdaki gibi (Eş. 13) ifade edilebilir [7].

$$\frac{a_5 \Delta t}{l_{s2}} \approx \frac{1}{M_5}^2 \left[1 - \frac{1}{M_5}\right]^{-1} \quad (13)$$

Sürülen Kesim: Aşağıdaki denklem (Eş. 14) ideal koşullarda sürülen kesim l_{s1} ile genişleme kesiminin l_{s2} uzunluklarının oranının l_{s1}/l_{s2} ne olması gerektiğini belirtmektedir. Bu oran aynı zamanda Şekil 6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Test Mach sayısı yaklaşık 4.5 iken bu oran 1:1 olup, artan Mach sayısı ile birlikte bu oran küçülmektedir. Dolayısı ile optimal test süresini yakalamak için Mach sayısı arttıkça sürülen kısmın uzunluğunu kısaltıp, genişleme kesiminin uzunluğunu arttırmak gerekmektedir. Şok genişleme tüpü buna imkan verecek şekilde modüler

tasarlanmalıdır. Örnek uzunluklar Tablo 3'te gösterilmiştir. Bahsi geçen trendleri bu tabloda da gözlemlemek mümkündür.

$$\frac{l_{s1}}{l_{s2}} = \frac{\gamma_1+1}{\gamma_1-1} \frac{1}{M_5-1} \left[\frac{1 + \frac{\gamma_1-1}{2} M_2}{1 + \frac{\gamma_1-1}{2} M_5} \right]^{\frac{3-\gamma_1}{2(\gamma_1-1)}} \quad (14)$$



Şekil 6: Test Mach Sayısı ile Sürülen Kesim Uzunluğu Genişleme Kesimi Uzunluğu Oranının Değişimi

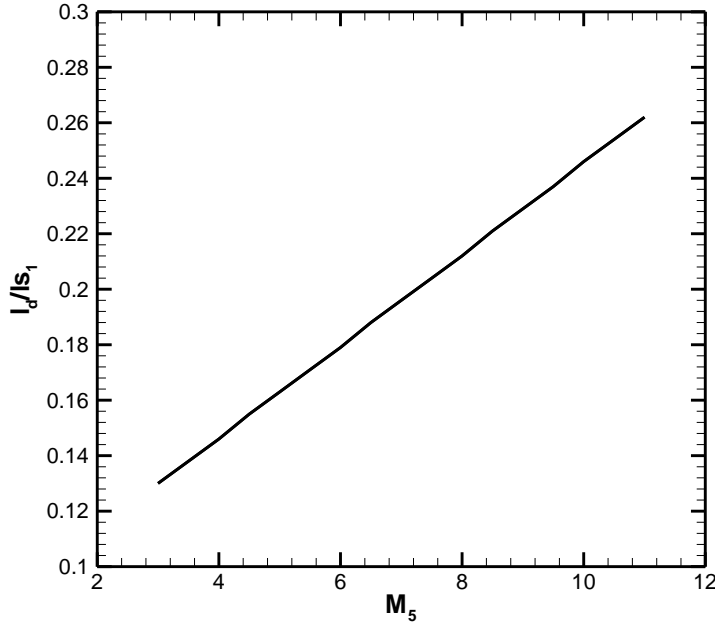
Sürücü Kesim: Sürücü kesimin uzunluğu bilindiği üzere test süresini kritik olarak etkilememektedir [1]. Bu kesimin yansıyan genişleme şokunun S₁ şokunu yakalamasını engelleyecek kadar uzun yeterlidir. Bu kritere göre sürülen kesim l_{s1}, sürücü kesim l_D uzunluk oranı aşağıdaki denklemden (Eş. 15) hesaplanabilir [7]. Sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir.

$$\frac{l_D}{l_{s1}} = \frac{1}{\gamma_1+1} \frac{1}{M_2} \frac{a_4}{a_5} \left(\frac{a_3}{a_4} \right)^{\frac{\gamma_4+1}{2(\gamma_4-1)}} \frac{\left(1 + \frac{\gamma_1-1}{2} M_2 \right)^2}{1 + \frac{\gamma_1-1}{2} M_5} \quad (15)$$

Mevcut tasarımda sürücü kesimin uzunluğu asgari 1.5 m'dir. İstenildiğinde 0.5 m'lik bir eklenti parçasıyla uzunluk 2.0 m'ye çıkartılabilir. Bu uzunluklar bütün çalışma zarfında yansıyan şokun genişleme şokunu yakalamasını rahatlıkla engelleyebilmekte ve tasarım kriterini karşılamaktadır.

Boşaltma Tankı: Boşaltma tankı için gereken uzunluğu l_{SR} bulmak üzere şu varsayımlarından yararlanılır; şok hızları U_{s10} ve U_{sR} şok dalgaları boşaltma tankı boyunca ilerlerken sabittir, bu şokların toplam geçiş süresi test odasına U_{s11} şok dalgası ile genişleme fanının arka ucunun ulaşması arasında geçen süreye eşittir. Bu durumda boşaltma tankı uzunluğu ile genişleme kesimi uzunluğu arasındaki oran matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{l_{sR}}{l_{s2}} \approx \frac{(\gamma_4-1)(\gamma_4+1)}{3\gamma_4-1} \left(\frac{\gamma_1-1}{\gamma_1+1} + \frac{1}{M_5-1} \right) \sqrt{\frac{\gamma_1+1}{1+\frac{2}{\gamma_1-1} \frac{1}{M_5^2}}} \quad (16)$$



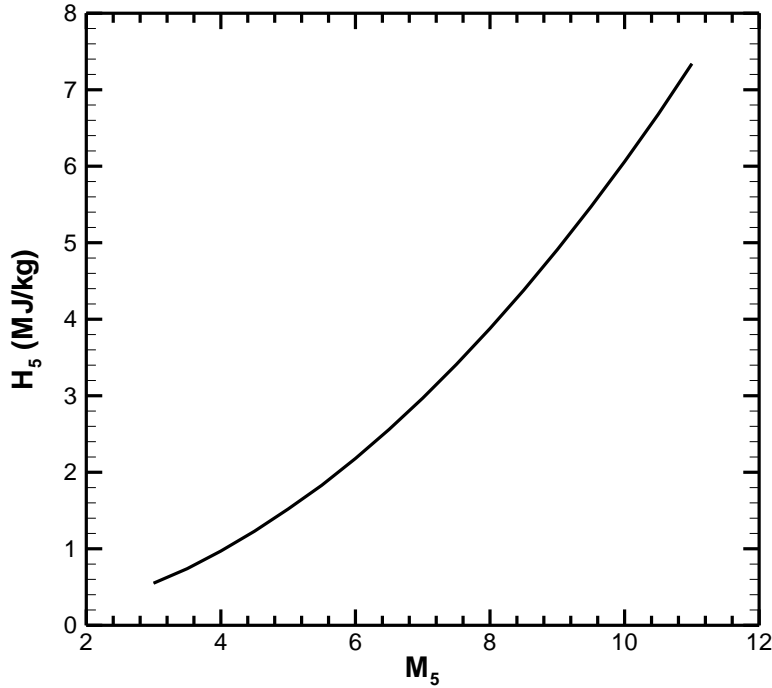
Şekil 7: Sürücü Kesim Genişleme Kesimi İdeal Uzunluk Oranı

Eş.1 ile Eş.16 arasındaki matematiksel bağıntılar kullanılarak şok genişleme tüpü test düzeneği için örnek test koşulları hesaplanabilir. Bunlardan bir kısmı Tablo 3'te listelenmiştir.

Bu kesimde son olarak test Mach sayısı M_5 ile toplam entalpi arasındaki ilişki gösterilmiştir (bkz. Şekil 8). Yüksek hızlarda toplam entalpi içerisinde hızdan kaynaklanan terim kimyasal entalpinin kendisinden çok daha büyük olmaktadır. Bu da şekildeki toplam entalpinin Mach sayısına bağlı parabolik değişimini açıklamaktadır.

Tablo 3: İdeal Gaz Varsayımı Altında Hesaplanan Örnek Test Koşulları

	$M_5=5$	$M_5=7$	$M_5=11$
P_4 , MPa	0.31	0.77	5.0
P_1 , kPa	3.1	3.1	3.1
P_{10} , Pa	39	15	3.6
P_5 , Pa	245	172	95
l_{s2} , m	5.0	5.5	6
l_{s1} , m	3.6	1.8	0.7
l_D , m	0.6	0.4	0.2
M_{S1}	3.3	4.3	5.3
M_{S2}	2.2	3.4	4.5
P_2/P_1	12.6	21.4	32.4
Δt , μs	718	376	157
U_5 , m/s	1741	2438	3830
H_5 , MJ/kg	1.5	3.9	7.3



Şekil 8: Test Mach Sayısı ile Toplam Entalpinin Değişimi

MEKANİK TASARIM

İdeal gaz varsayımı altında yapılan teorik hesaplamalar ışığında şok-genişleme tüpü test düzeneğinin mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Genişleme tüpü boyunca 150 mm (6") nominal çapta AISI 304 paslanmaz çelik, Schedule 80 dikişsiz boru kullanılması öngörülmüştür. Borunun iç çapı 146.36 mm, dış çapı ise 168.3 mm olup, buna göre et kalınlığı 10.97 mm olmaktadır. Bu et kalınlığı çalışma zarfı içerisindeki basınçlarda yeterli emniyeti sağlamaktadır. Yapısal hesaplama sonucu bu et kalınlığındaki bir borunun 50°C çalışma sıcaklığında 13.6 MPa basınca dayanabileceği bulunmuştur. Bu durumda sürücü kesim için en yüksek doldurma basıncı göz önüne alındığında emniyet faktörü 2.7 olarak hesaplanmaktadır.

Akış, test odasına girene kadar herhangi bir alan değişimi ile karşılaşmamaktadır. İstenilen test Mach sayısı M_5 tamamen ilk doldurma basınçlarını değiştirmek suretiyle ayarlanmaktadır. Yapılan mekanik tasarımın katı modeli Şekil 10'de gösterilmiştir.

Bir önceki bölümde de vurgulandığı üzere optimal test süresini yakalamak adına test düzeneğindeki kesimlerin uzunlukları ve birbirlerine olan uzunluk oranlarını istenilen test Mach sayısına M_5 göre ayarlamak gerekecektir. Bu maksatla uzunlukların 0.5 m aralıklarla ayarlanabildiği modüler bir tasarım yapılmıştır. Böylece test düzeneğindeki kesimlerin boyutları onlarca farklı kombinasyonda ayarlanabilmektedir. Pratik kısıtlamalar (sensör konumları, kablo boyları) dolayısı ile kullanılan en kısa boylar Tablo 4'de belirtilmiştir. Bunun yanı sıra eğer bütün parçalar kullanılacak olursa test düzeneğinin boyu en çok 13.5 m olmaktadır.

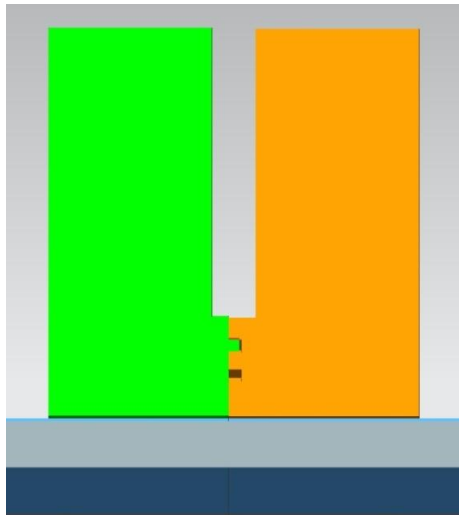
Tablo 4: Kesimlerin Asgari Boyları

Kesim	Asgari Boy, m
Sürücü	1.5
Sürülen	4.0
Genişleme	1.75

Şok dalgalarının zayıflamasını önlemek ve istenmeyen şokların oluşmasını engellemek maksadıyla genişleme tüpü test düzeneğinin iç yüzeyleri honlanmalıdır. Dinamik basınç sensörleri yüzeye mümkün olduğunca sıfır yerleştirilmelidir. Dolayısı ile bu sensörlerin yüzeylerini de borularla beraber honlamak gerekebilecektir. Honlama işlemi sürücü, sürülen ve genişleme kesimleri için ayrı yapılabilir.

Genişleme tüpü test düzeneğinde yapılan testlerin tekrarlanabilirliği sistemin sızdırmazlık seviyesinin düşük olması ile sağlanabilir. Sızdırmazlık seviyesinin 1 torr/gün seviyesinde olması tavsiye edilmektedir [1].

Flanşlarda birbirine karşılık gelen erkek ve dişi tırnak ve kanallar olacaktır (bkz. Şekil 9). Bu sayede sökme ve takma işlemleri sırasında flanşların sürekli birbirlerine karşılık gelmesi sağlanabilecektir. Sızdırmazlık ise şekilde görüldü gibi (bkz. Şekil 9) O-ring conta yardımıyla sağlanmaktadır.

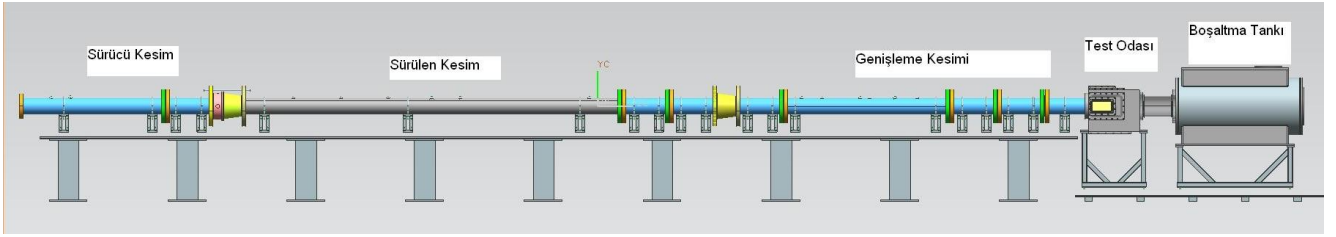


Şekil 9: Flanşlar Arasındaki Sızdırmazlık Elemanları

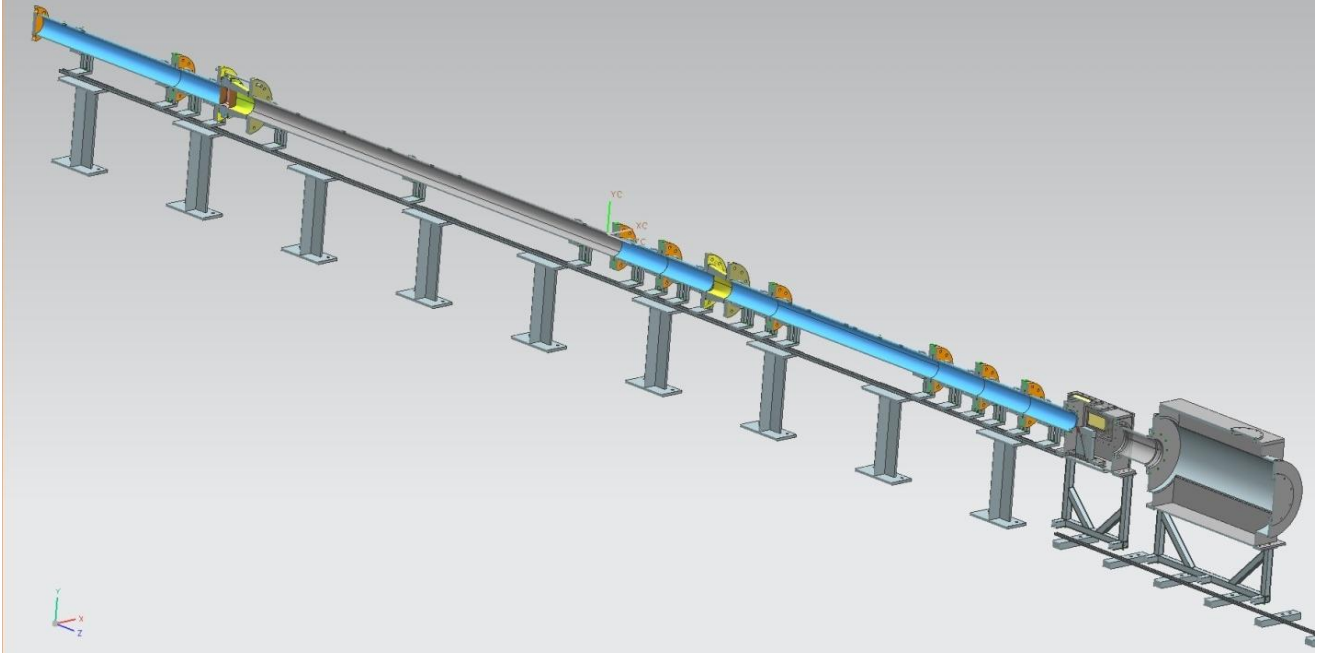
Çift Diyafram Bölümü

Sürücü kesim ile sürülen kesimi ayırmak için çift diyafram kullanılmıştır (bkz. Şekil 11). Bu kesim 30 cm uzunluğunda olup, sürekli sökülüp takılacağı için hafif olması tercih edilir. Bu sebeple Al 6061 alaşımından üretilecektir. Her bir diyafram sürücü ile sürülen kesim arasındaki basınç farkının yaklaşık yarısını karşılayabilecek kalınlıkta polikarbonat malzemeden imal edilecektir. Eğer testler büyük basınç farkı gerektirmiyorsa çift diyafram yerine tek diyafram ile de test yapmak mümkündür.

Test sırasında diyaframın dört yaprak şeklinde düzgünce açılmasını teşvik etmek için üzerine artı şeklinde çentik atılacaktır. Uçan diyafram parçaları test odasına yerleştirilen model için son derece tehlikeli olabilir. Bu yüzden diyaframın düzgün bir şekilde dört yaprak şeklinde yırtılması için diyafram üzerine artı şeklinde çentik atılır. Buna ilaveten çift diyafram kesiminin kesiti karedir ve sürülen kesime bağlantı yapılırken kare kesit daire kesite dönüşmektedir. Bu da açılan diyaframın yapraklarının takılıp kalmasını sağlamak için yapılmaktadır. Benzer tasarım hem NASA-Langley hem de Stanford Üniversitesi'ndeki şok genişleme tüplerinde kullanılmıştır [1,3].



a. Yandan Görünüş



b. İzometrik Kesit Görüntüsü

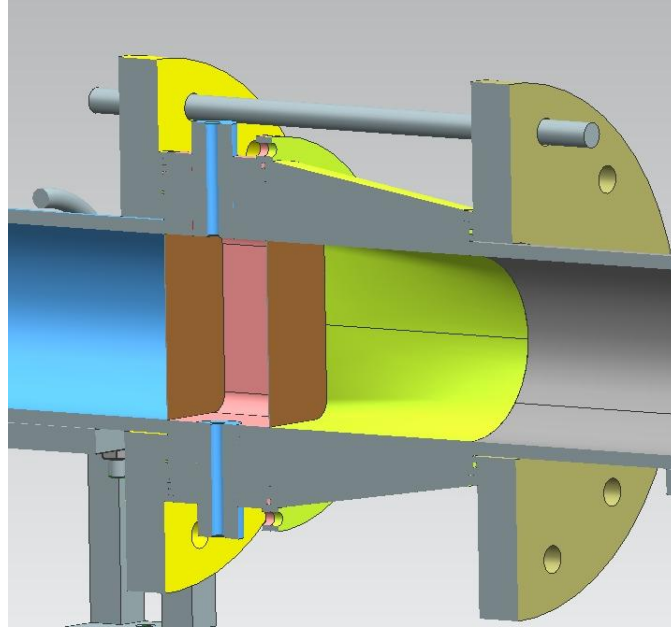
Şekil 10: 150 mm Şok Genişleme Tüpü Katı Modeli

Testi başlatmak için bir "tahliye lülesi" kullanılır. Tahliye lülesi hattına bağlı normalde kapalı konumdaki valf modülü açıldığında iki diyafram arasındaki bölmede basınç aniden azalır ve yüksek basınç farkına dayanamayan sol diyafram yırtılır, hemen arkasından sağ taraftaki yırtılarak sürücü gazın sürülen kesimdeki gazı itmesine olanak tanır.

Çift diyafram bölmesindeki iki diyafram arasında dinamik basınç ölçümü yapacak piezoelektrik bir sensör bulunmaktadır. Bu sensör ilk diyaframın yırtıldığını algılayıp gecikme üreticine test başlangıcını belirleyen bir referans sinyal gönderir.

Sürülen Kesim

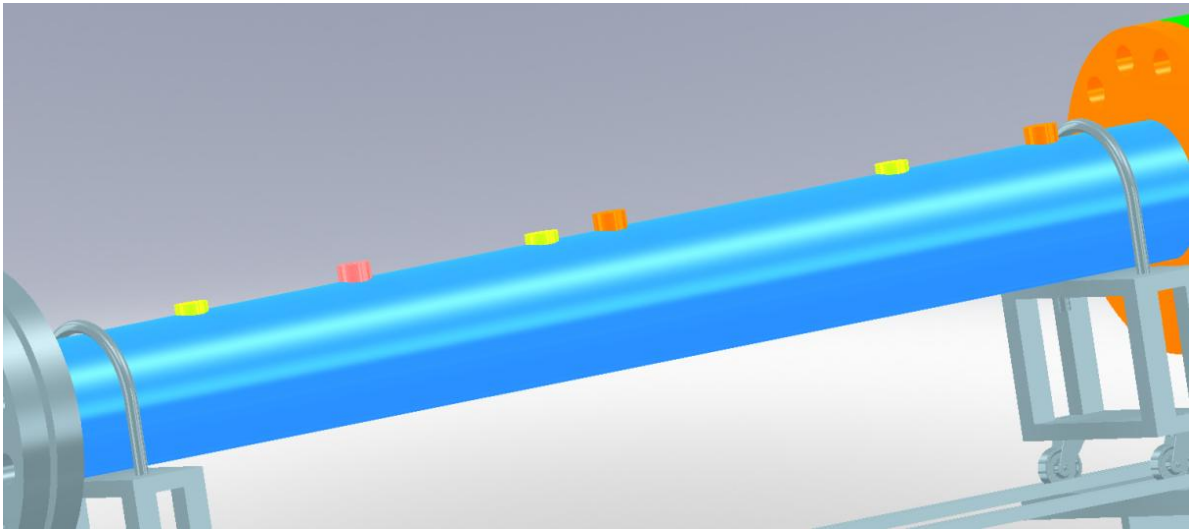
Sürülen kesim test gazının test başlangıcında bulanacağı yerdir. Mevcut tasarımda sürülen kesim 150 mm anma çapında 4 m, uzunluğunda SS-304 malzemeden imal edilmiş bir dikişsiz boru parçasından ve bu parçaya flanşlar ile bağlanmış 0.5 uzunluğunda iki adet ilave parçadan oluşmaktadır. Bu ilave parçalar sürülen kesim için kullanılabileceği gibi diğer kesimler (sürücü ve genişleme) için de kullanılabilecektir. Çünkü genişleme tüpü boyunca kesit değişmemektedir. Sürülen kesim diğer kesimlerden iki ucundaki birer diyafram bağlantısı ile ayrılmaktadır. 4m uzunluğundaki ana parçanın üzerinde birbirlerinden 0.5 m aralıkla konumlandırılmış üç adet dinamik basınç ölçüm portu bulunmaktadır. Manometre bağlantısı için de bir port bulunmaktadır. Son olarak vakum pompası ve basınçlı tüp bağlantıları için fitting elemanları da ana parça üzerinde yer almaktadır.



Şekil 11: Çift Diyafram Katı Modeli

Diyafram II (Tek Zar)

İkinci diyafram üzerinde test başlangıcında önemli bir basınç farkı yoktur. Bu sebeple $6.35 \mu\text{m}$ kalınlığında Mylar film kullanılması öngörülmektedir. Mylar film her iki tarafına yapıştırılacak 2 mm kalınlığında teflon contalar yardımıyla yerine oturtulacaktır. İkinci diyaframa ait parçalar da hafifliği sebebiyle birincisinde olduğu gibi Al 6061 alaşımından üretilecektir. Bu kesimin uzunluğu da 30 cm'dir. Doldurma esnasında ince zarın yırtılmasını önlemek için genişleme ve sürülen kesimlerdeki basınçları eşitleyen bir valf modülü bulunmaktadır.



Şekil 12: Genişleme Kesimi Üzerindeki Ölçüm ve Bağlantı Portları

Genişleme Kesimi

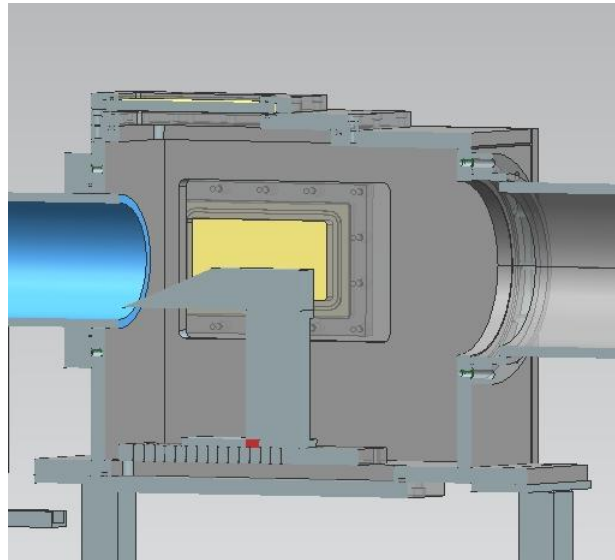
Genişleme kesimi test başlangıcında düşük basınçta (vakuma yakın) genişleme gazının bulunacağı kesimdir. Genişleme gazı olarak hafif bir gaz olan helyum kullanılacaktır. Genişleme kesimi 1.75 m uzunluğunda bir ana parçadan ve dört adet 0.5 m'lik ilave parçalardan oluşmaktadır. Modüler tasarım sayesinde genişleme kesiminin uzunluğunu istenildiğinde 5.25 m'ye çıkarmak mümkündür. Ana parça üzerinde birbirlerinden 0.5 m aralıkla konumlandırılmış üç adet dinamik basınç ölçüm portu bulunmaktadır. Ayrıca manometre bağlantısı için de bir port vardır. Benzer şekilde vakumlama ve dolun işlemleri için de bağlantı elemanları mevcuttur. Genişleme kesimi ana parçası üzerindeki portlar Şekil 12'de gösterilmiştir, benzer bağlantılar diğer kesimlerde de bulunmaktadır.

Test Odası

Şekil 13'de kesit görüntüsü verilen test odası modelin konulup ölçümün yapıldığı yer olup, 300 mm x 300 mm x 300 mm boyutlarındadır. Genişleme tüpü kısmen test odasının içerisine girmektedir. Test odasına optik erişim sağlamak amacıyla üç tarafına morötesi dalgaboylarında geçirgenliğe sahip ¼" kalınlığında quartz (fused silica) cam konulacaktır. Bu optik erişim sayesinde Schlieren görüntüleme, OH/NO PLIF gibi ölçümleri yapmak mümkün olmaktadır. Camlı bölmelerden biri hızlı bağlantı elemanları ile sökülüp takılabilecek şekilde tasarlanmıştır böylece gerektiği zaman test bölmesine kolay ve hızlı erişim sağlanabilecektir.

Test odasının alt kısmında modelin bağlanabileceği, bununla birlikte gerekli sinyal (örneğin Pitot tübünde bulunan basınçölçer), yahut gaz (örneğin yakıt gazı) bağlantılarının yapılabileceği delikli bir plaka bulunmaktadır. Şekilde (bkz. Şekil 13) bu plakaya kama şeklinde bir model bağlanmıştır.

Test odasının sızdırmazlığı tasarım açısından son derece önemlidir. Sızdırmazlık için uygun noktalara O-ring contalar yerleştirilmiştir. Test odası Şekil 13'de görüldüğü gibi bir flanş yardımıyla boşaltma tankına bağlanmaktadır.

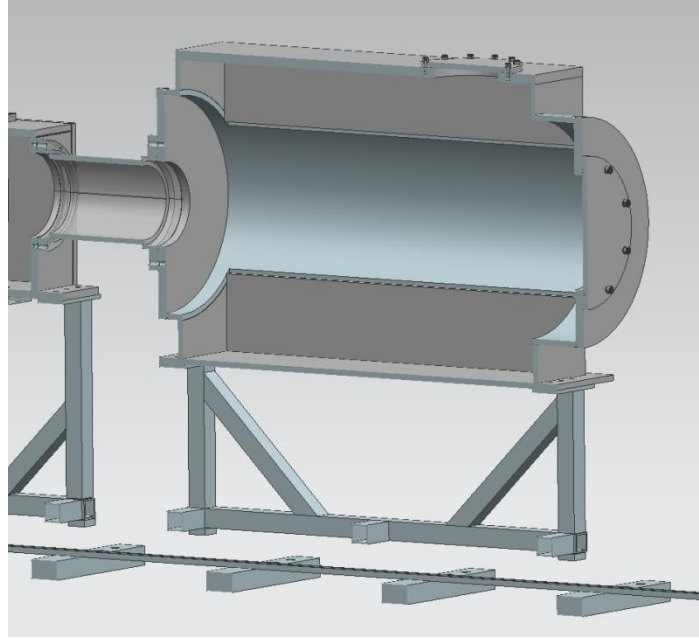


Şekil 13: Test Odası Katı Model Kesit Görüntüsü

Boşaltma Tankı

Boşaltma tankı için tasarım basıncı 10 bardır. Bu kesim sürekli olarak yüksek basınca maruz kalmamakla birlikte test esnasında anlık olarak darbe yüklerine maruz kalmaktadır.

Boşaltma tankı karbon çeliğinden imal edilecektir. Tank yere Şekil 14’de görüldüğü gibi monte edilecektir. Böylelikle tankın ağırlığı ayrı bir sistem tarafından taşınmış olacak ve borulara yüklenmeyecektir. Boşaltma tankının zaman zaman temizlenmesi gerekeceği için (diyafram artıkları v.s. nedeniyle) tankın üstünde ve arkasında civatalarla bağlanmış kapaklar bulunmaktadır.



Şekil 14: Boşaltma Tankı Katı Model Kesit Görüntüsü

Vakum Pompaları

Tasarlanan sistemde toplam üç adet vakum pompası bulunmatadır. Bu vakum pompaları sırasıyla, sürücü, sürülen ve genişleme kesimleri ile birer valf modülü ile irtibatlandırılacaklardır. Vakum pompaları boşalttıkları hacimdeki mutlak basıncı 1×10^{-4} torr seviyesine kadar düşürebilmelidirler.

Pnömatik Sistemler

Pnömatik hatlar, vakum pompaları ile test düzeneği arasındaki hatlar ile basınçlı tanklar (He, N₂, v.b.) ile test düzeneği arasındaki hatlardan ve sensörler (manometreler) ile test düzeneği arasındaki hatlardan oluşmaktadır. Sistemde 11 adet valf modülü bulunacaktır. Valf modülleri ve işlevleri Tablo 5’da özetlenmiştir. Her bir valf modülü çift etkili bir pnömatik valften, bir küresel vanadan ve bir solenoid vanadan oluşacaktır. Pnömatik valfler basınçlı azot tankları yardımıyla basınçlandırılacaktır. Valf modüllerine 0-5 V TTL dijital sinyal ile veri toplama kartı tarafından kumanda iletilecektir.

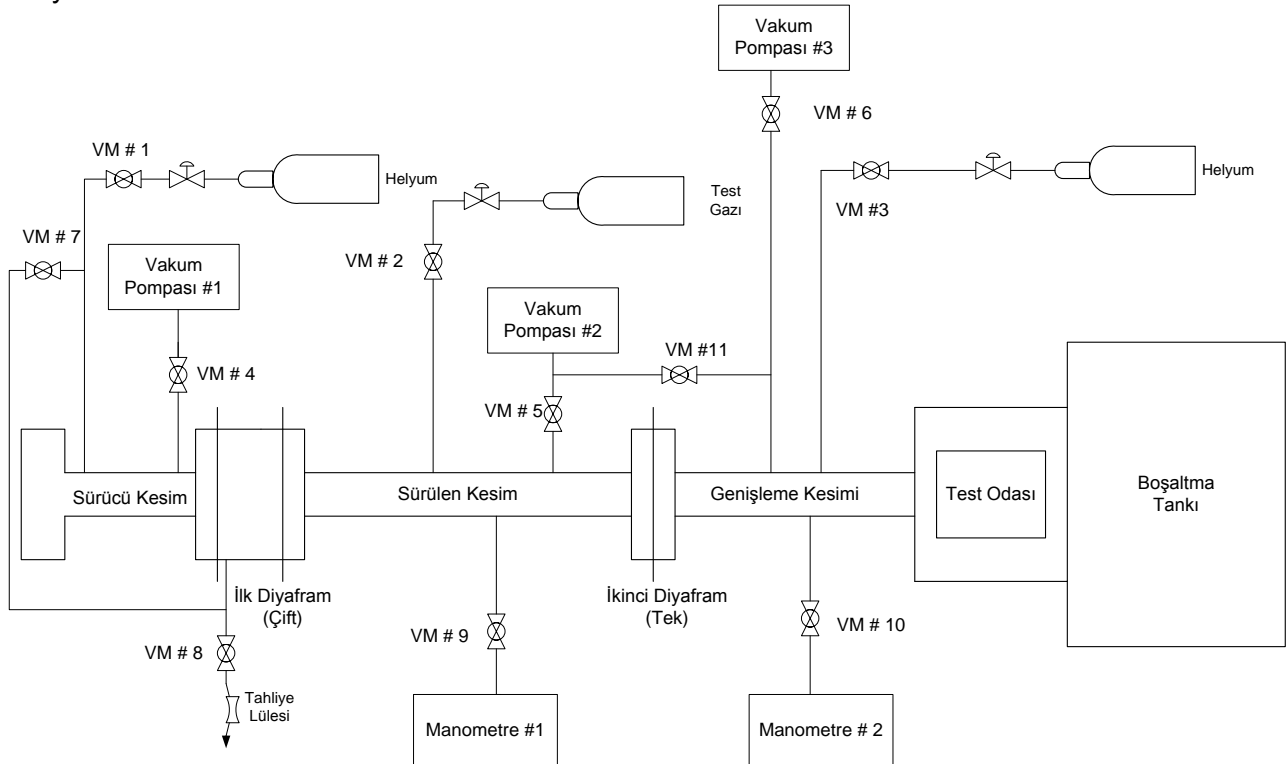
Pnömatik hatların, valf modüllerinin ve ilgili diğer elemanların konumu Şekil 15’de işaretlenmiştir. Buna göre her bir kesim bir adet vakum pompasına bağlanmaktadır. Vakum pompası ile kesimlerin irtibatları birer adet valf modülü yardımıyla kesilebilmektedir. Yine her bir kesime ilgili gazın (helyum, test gazı, v.b.) dolumunu sağlayan bağlantılar mevcuttur. Kesimlerin basınçlı tüplerle irtibatı birer valf modülü yardımıyla kapatılıp açılabilir. Tek farklılık sürücü kesim ve çift diyafram bağlantılarındadır. Çift diyaframla helyum silindiri bağlayan hat sürücü kesim hattından ayrı bir valf modülü (VM#7) ile ayrılmaktadır. Dolum esnasında her iki valf modülü (VM#1 ve VM#7) de açık olacak, fakat sürücü kesim istenilen basıncın yaklaşık yarısına ulaştığı zaman VM#7 kapanacaktır. Böylelikle test başlangıcında çift diyaframın iki tarafında da uygun miktarda basınç farkı ΔP sağlanmış olacaktır. Test başlangıcında VM#8 açılacak ve çift diyafram arasındaki gazı

tahliye etmeye başlayacaktır. Sol taraftaki diyafram aniden dayanamayacağı kadar yüksek basınç farkına maruz kalmış olacağından yırtılacaktır. Bu yırtılma buraya yerleştirilen piezoelektrik basınçölçer tarafından algılanacak ve test başlangıcını belirten bir tetik sinyali üretilecektir.

Tablo 5: Test Düzenindeki Valf Modüllerinin İşlevi

Valf Modülü No	Görevi
VM #1	Sürücü kesim ile helyum silindirinin bağlantısını açmak/kapamak
VM #2	Sürülen kesim ile test gazı silindirinin bağlantısını açmak/kapamak
VM #3	Genişleme kesimi ile helyum silindirinin bağlantısını açmak/kapamak
VM #4	Vakum pompası # 1 ile sürücü kesimin bağlantısını açmak/kapamak
VM #5	Vakum pompası # 2 ile genişleme kesiminin bağlantısını açmak/kapamak
VM #6	Vakum pompası # 3 ile genişleme kesiminin bağlantısını açmak/kapamak
VM #7	Çift diyafram arasındaki basıncı ayarlamak
VM #8	Tahliye lülesine gaz göndererek çift diyaframı patlatmak
VM #9	Manometre #1'i test sırasındaki şoktan korumak
VM #10	Manometre #2'yi test sırasındaki şoktan korumak
VM #11	Vakumlama esnasında ince diyaframın yırtılmasını engellemek

Bunların yanısıra test esnasındaki ani darbeden manometreleri korumak için kullanılan iki adet valf modülü (VM#9, VM#10) de test başlamadan evvel kapanıp manometrelerin irtibatını kesecektir. Son olarak ikinci diyafram çok ince bir Mylar zar olacağı için yüksek basınç farkına dayanamayacaktır. Vakumlama esnasında sürülen ve genişleme kesimleri arasında olası anlık bir yüksek basınç farkını engellemek için bu kesimlerin vakum hatlarını birleştiren (dolayısıyla buralardaki basınçları birbirine eşitleyen) bir valf modülü daha (VM#11) kullanılmıştır. Bu modül ilk basınçlar ayarlanırken uygun bir zamanda kapatılacak ve basınçların farklı olmasına imkan tanıyacaktır.



Şekil 15: Valf Modüllerinin ve Diğer Elemanlarının Konumları

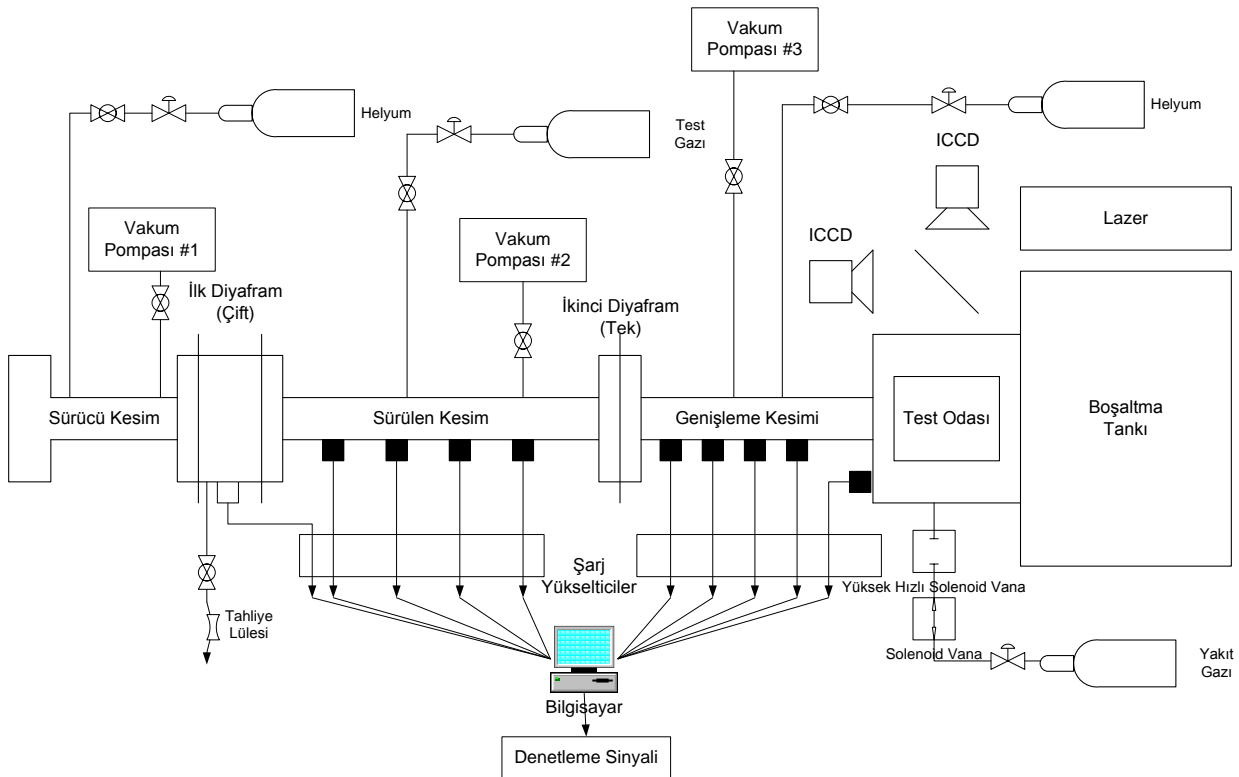
Veri Toplama ve Kontrol Sistemi

Test süresi kısa ve zamanlaması son derece kritik olduğu için ölçüm ve kontrol sisteminin gerçek zamanda çalışabilmesi gerekmektedir. Ölçüm ve kontrol sistemi sırasıyla; basınç ölçüm sistemi (statik ve dinamik), hız ölçüm sistemi, veri toplama sistemi, zamanlama sistemi, Schlieren görüntüleme sistemi ve OH/NO PLIF görüntüleme sistemi gibi bileşenlerinden oluşacaktır. Ölçüm ve kontrol sisteminin şematik görünümü Şekil 16'de verilmiştir.

Sistemdeki bütün bileşenlere (vakum pompaları, valfler v.b.) açma/kapama, tetikleme (lazer, kamera v.b.) gibi tüm analog ve dijital sinyaller bu sistem tarafından gönderilecek, sensörlerden gelen sinyaller yine bu sistem tarafından kaydedilecektir. Bütün bu alt sistemlerin LabView tabanlı bir yazılım tarafından gerçek zamanlı olarak orkestra edilmesi planlanmaktadır.

Basınç Ölçüm Sistemi: Test düzeneğinden deney sırasında toplanacak en temel veri basınç verisidir. Buna ilaveten test koşulları da doldurma basınçlarıyla doğrudan ilişkilidir. Basınç ölçüm sisteminde hem ilk basınçların belirlenmesi amacıyla statik, hem de test sırasındaki zamana bağlı basınç değişiminin ölçülmesi amacıyla dinamik basınç ölçerler kullanılmaktadır. Statik basınç ölçüm sisteminin bileşenleri Tablo 6'de, dinamik basınç ölçüm sisteminin bileşenleri ise Tablo 7'de belirtilmiştir.

Statik basınçların ölçümü test düzeneği kesimlerinin ilk doldurma basınçlarının ayarlanması açısından gereklidir. Bu maksatla sürücü kesimdeki statik basınç bir sensör yardımıyla ölçülecektir. Sürülen ve genişleme kesimindeki ilk basınçlar vakum mertebesinde olacağından bunların ölçümü için iki adet mutlak basınç manometresi kullanılacaktır (bkz. Tablo 7).



Şekil 16: Genişleme Tüpü Test Düzeneği Ölçüm ve Kontrol Sistemi [2]

Dinamik basınç ölçümü için toplam sekiz adet piezoelektrik basınçölçer kullanılacaktır (bkz. Tablo 7). Bunlardan biri çift diyafram bölmesinde iki zarın arasına, üçü sürülen kesime, diğer üçü genişleme kesimine duvara birer adaptör yardımıyla takılacaktır. Genişleme ve sürücü kesimler bu basınçölçerler ile beraber honlanacaktır. Sekizinci basınçölçer ise hız ölçüm sistemindeki Pitot tübünün içerisinde yer alacaktır. Piezoelektrik basınçölçerlerden gelen sinyaller sekiz kanallı bir şarj amfisi yardımıyla analog voltaj sinyaline çevrilecektir. Sensörlerin 1.45 mV/kPa hassasiyette olmaları öngörülmektedir. Bu analog voltaj sinyalleri veri toplama kartı tarafından en az 1 MHz sıklıkta okunup kaydedilecektir.

Tablo 6: Statik Basınç Ölçüm Sistemi Bileşenleri

Sensör	Adet	Açıklama
Statik Basınçölçer	1	Sürücü kesimdeki ilk basıncı ölçmek için
Mutlak Basınç Manometresi	2	Sürülen ve genişleme kesimlerindeki ilk basınçları ölçmek

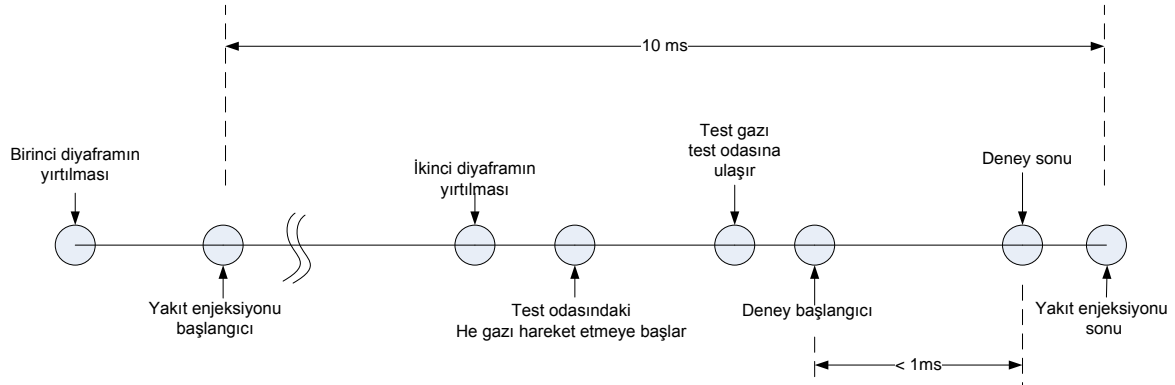
Tablo 7: Dinamik Basınç Ölçüm Sistemi Bileşenleri

Sensör	Adet	Açıklama
Piezoelektrik Basınçölçer	8	Değişik istasyonlarda anlık basınç değişimlerini kaydetmek
Şarj Amfisi	1	Yük sinyalini gerilim sinyaline dönüştürüp yükseltmek

Veri Toplama Sistemi: Veri toplama sistemi olarak PXI tabanlı bir sistem kullanılması öngörülmektedir. Bu sistem sırasıyla; şaşıden, kontrol ünitesinden, veri toplama kartından ve RS-232 haberleşme kartından oluşmaktadır. Veri toplama sisteminin tüm modülleri tek bir şasi üzerine monte edilecektir. Şasi aynı zamanda modüllere gerekli voltajı temin etmektedir. Sistemin beyni bir kontrol ünitesidir. Bu ünite üzerindeki işlemci LabView dilinde yazılmış ana programı gerçek zamanda koşturacaktır. Analog ve dijital giriş/çıkış sinyalleri ise sistemdeki veri toplama kartına bağlanacaktır. Son olarak bir RS-232 haberleşme kartı ölçüm ve kontrol sistemi üzerindeki bazı cihazlarla (örneğin vakum manometreleri) haberleşmeyi temin edecektir.

Veri toplama kartına sekiz (dinamik) artı üç (statik) olmak üzere toplam 11 adet analog basınç sinyali girecektir. Bunun yanısıra 11 adet valf modülü ve üç vakum pompasına kumanda edecek röle için toplam 14 dijital çıkış sinyali bağlanacaktır. Bunların yanısıra değişik cihazlar (örneğin kamera) için tetikleme sinyalleri de üretilebilecektir. Hem analog hem de dijital kanal sayısı gereksinimleri karşılamaktadır. Kanal sayısı kadar önemli olan bir diğer husus ta veri toplama hızıdır. Bu sistem ile test süresince 8 dinamik basınç kanalının hepsinden aynı anda asgari 1 MHz sıklıkta veri toplanacaktır.

Zamanlama Sistemi: Sinyallerin zamanlaması ve senkronizasyonu genişleme tüpündeki deneylerin yürütülmesi için en önemli zorluktur. Zamanlamanın birkaç yüz ile bin nanosaniye (10^{-7} - 10^{-6}) mertebehassasiyette olması lazımdır. Bu açıdan bakıldığında deneylerin tekrarlanabilirliği açısından güvenilir bir tetikleme sinyalinin bulunması gereklidir (Do, 2009). Tetikleme sinyali referans alınarak diğer sinyaller bir gecikme üretici (delay generator) vasıtasıyla oluşturulup diğer gerekli cihazlara dağıtılmaktadır. Deneyin zamanlaması Şekil 17'de resmedilmiştir. Referans sinyali olarak çift diyaframlı bölmede bulunan piezoelektrik basınçölçerden gelen sinyal kullanılacaktır. Bu sinyal ilk diyaframın yırtıldığı anı gösterecektir. Zamanlama için BNC 575 yahut muadili sekiz kanallı bir gecikme üretici kullanılması düşünülmektedir. Doğru zamanlamanın önemi düşünüldüğünde gecikme üreticinin her bir kanalındaki zamanlama hassasiyetinin 250 ps mertebesinde olması uygun olacaktır.



Şekil 17: Test Zamanlaması [2]

Çift zarlı ilk diyafram bölmesinde bulunan basınçölçerde hissedilen ani basınç değişimi gecikme üreticini harekete geçirmektedir. Bu noktadan sonra gecikme üreticinin her bir kanalı önceden programlanmış gecikme sürelerinde (tetik sinyali t_0 kabul edilerek) t_1, t_2, t_3, \dots v.b. istenilen cihazlara dijital tetikleme sinyalleri dağıtmaktadır. Deneylerin tekrar edilebilirliği zamanlamanın doğru yapılmasına bağlıdır.

TARTIŞMA

Yüksek hızlarda seyreden hava araçlarının aero-termodinamik tasarımlarının yapılabilmesi yahut doğrulanabilmesi için maruz kaldıkları uçuş koşullarının yerde bir takım test düzeneklerinde sağlanabilmesi ihtiyacı vardır. Bu ihtiyaçtan yola çıkarak yüksek hızlı, yüksek entalpili akışların incelenmesi amacıyla bir şok genişleme tüpü test düzeneği tasarlanmıştır. Darbe tipi kısa süreli çalışan bu düzenek 0.5 MJ/kg ile 7.3 MJ/kg toplam entalpideki, ve Mach sayısı 3 ila 11 hız aralığındaki akışların incelenmesine olanak tanımaktadır. Test süresi tipik olarak bir milisaniyenin altındadır. Böyle bir test düzeneği kullanılarak yapılabilecek testler şunlardır; Yüksek entalpili süpersonik ve hipersonik akışlar içerisinde aerodinamik testler (örneğin hava alığı tasarımı, yahut cisim etrafındaki akış), ses üstü akış içerisinde yakıt enjeksiyonu, ses üstü hızlarda tepkimeli akışların (örneğin scramjet yanma odası) incelenmesi, şok/sınır tabaka etkileşimleri, atmosfere yeniden giriş testleri, aerodinamik ısı yüklerinin incelenmesi.

Söz konusu şok genişleme tüpü test düzeneğinin kurulumu, TÜBİTAK-SAGE bünyesinde yürütülmekte olan İç Balistik Tasarım Altyapısı (İBTA) Projesi kapsamında TÜBİTAK-SAGE'de gerçekleştirilecektir.

TEŞEKKÜR

İç Balistik Tasarım Altyapısı (İBTA) konulu projeye maddi destek sağlayan Devlet Planlama Teşkilatı'na (DPT) en derin şükranlarımızı sunarız. Katı model çizimleri için teknik ressam Ayhan Özdemir'e teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Gamba, M. Kişisel iletişim, Aralık 2011.
- [2] Do. H, Plasma-Assisted Combustion in Supersonic Flow, Doktora Tezi, Stanford Üniversitesi, Haziran 2009.
- [3] Heltsley, W.N., Snyder, J.A., Houle, A.J., Davidson, D.F., Mungal, M.G., Hanson, R.K., Design and Characterization of the Stanford 6 Inch Expansion Tube, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper No: AIAA-4443, Temmuz 2006.

- [4] Stewart B.S., Morgan R.G., Jacobs P.A., Rocketdyne Hypersonic Flow Laboratory as High-Performance Expansion tube for Scramjet Testing, Journal of Propulsion and Power , 19, pp. 98-103, 2003.
- [5] Ben Yakar, A., Hanson, R.K., Characterization of Expansion Tube Flows for Hypervelocity Combustion Studies, Journal of Propulsion and Power, 18(4), s. 943-952, Temmuz 2002.
- [6] Morris, C.I., Shock Induced Combustion in High Speed Wedge Flows, Doktora Tezi, Stanford Üniversitesi, Aralık 2001.
- [7] Trimpi, R.L., Callis, L.B., A Prefect Gas Analysis of the Expansion Tunnel, a Modification to the Expansion Tube, NASA Technical Report R-223, 1965.
- [8] Trimpi, R.L., A Preliminary Theoretical Study of the Expansi-on Tube, A New Device for Producing High Enthalpy Short Duration Hypersonic Gas Flows, NASA Technical Report R-133, 1962.

Semboller

a	Ses hızı
Da	Damköhler sayısı
H	Toplam entalpi
l	Uzunluk
M	Mach sayısı
MW	Moleküler ağırlık
P	Basınç
R	Gaz sabiti
S	Şok
T	Sıcaklık
t	Zaman
U	Hız
x	Konum

Yunan Harfleri

γ	Özgül ısılar oranı
ρ	Yoğunluk

İndisler

1	Sürülen kesim (test gazı) başlangıç koşulu
10	Genişleme kesimi başlangıç koşulu
2	Test gazının birinci şoktan sonraki durumu
20	Şokun ardındaki genişleme gazı
3	Genişleyen sürücü gaz
4	Sürücü kesim başlangıç koşulu
5	Test koşulları
d	Sürücü kesim
R	Yansıyan (boşaltma tankı duvarından) şok
t	Durma noktası koşulu
u	Evrensel