

ZAMANA BAĞLI ÇALIŞAN BİR RÜZGAR TÜNELİNİN BİLGİSAYAR İKİZİNİN ÇIKARILMASI

Tolga Şanap¹
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir

Doç. Dr. Tolga Yasa²
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir

ÖZET

Havacılık uygulamalarında gaz türbinli motorların kritik alt sistemlerinden olan türbinlerin performans testleri yaygın olarak sınırlı süreli çalışan kaskad rüzgar tünelleri ile yapılmaktadır. Bu testlerde motor çalışma koşulları (Reynolds sayısı ve Mach sayısı) test sırasında birebir sağlanabilmektedir. Sınırlı süreli testlerde ölçüm süresinin kısa olması (<1s.) sebebi ile akış koşullarını kontrol eden basınç ve debi kontrol vanaları test öncesinde ayarlanmaktadır. Bu nedenle farklı test şartları için hangi konfigürasyonun kullanılacağını belirlemek için sistemin modellenmesi ihtiyacı doğmuştur. Tünelin modellenmesi ile testten önce test süresi, zamana bağlı tünel içindeki basınç, sıcaklık, hız gibi parametrelerin değişimi gibi test kritik özellikler hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada Eskişehir Teknik Üniversitesi Türbin Kaskad Test sisteminin bir boyutlu modeli hazırlanarak, test boyunca gerçekleşen akış koşullarının zamana ve konuma bağlı olarak modellenmesi yapılmıştır. Geliştirilen modelde, kütle, enerji ve momentum korunum denklemleri Matlab kullanılarak çözülmüş ve zamana bağlı akış parametreleri elde edilmiştir. Geliştirilen modelin doğrulaması Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve, ticari bir yazılım olan Ecosimpro kullanılarak yapılmıştır.

GİRİŞ

Rüzgar tünelleri ilgilenilen cisim etrafında oluşacak akışın ve akış yapılarının, cisim üzerinde oluşacak kuvvetlerin ve akışın cisim ile etkileşiminin incelenmesini mümkün kılan altyapılardır. Araştırma ve doğrulama amacı ile kullanılan test sistemleri operasyon süresine göre sürekli çalışan ve kısa süreli çalışan olmak üzere ikiye ayrılır. Sınırlı süreli çalışan tüneller maliyet avantajı sunarken çalışma koşullarının doğru şekilde sağlanabilmesi için hassas akış kontrol ve modellerine ihtiyaç duyar. Havacılık uygulamalarında gaz türbinli motorların kritik alt sistemlerinden olan türbinlerin performans testleri de yaygın olarak motor öncesi testler ile doğrulanmaktadır. Kaskad rüzgar tünelleri bu çalışmalarda kolay kurulum ve hızlı test yapılabilme özellikleri ile yaygın olarak kullanılırlar. Ülkemizde de bu konuda çalışma yapabilme kabiliyeti son dönemde Eskişehir Teknik Üniversitesinde kurulan Türbin Kaskad Test sistemi ile genişletilmiştir.

Sınırlı süreli rüzgar tünelleri temelde iki adet tank arasına yerleştirilmiş bir test odasından oluşmaktadır. Birinci tankta yüksek basınç ve sıcaklığa şartlandırılan hava, test esnasında test odası üzerinden geçerek ikinci düşük basınç tankına dolmaktadır. Test sırasında tank içerisindeki hava test odasına aktarıldığı için birinci tanktaki hava basıncı düşmektedir, bu nedenle test süresi sınırlıdır (<1 s.). Sınırlı süreli tünellerde test süresi, sistemdeki tank basınçları ve hacimleri ile testte hedeflenen Reynolds ve Mach sayıları ile ilişkilidir.

¹ Makine Mühendisi, Makine Müh. Böl., E-posta: tsanap@kalearge.com.tr

² Doç. Dr., E-posta: tyasa@eskisehir.edu.tr



Şekil 1 Estü Dairesel Kaskad Rüzgar Tüneli

ESTÜ Rüzgar Tüneli iki adet tank arasına yerleştirilmiş bir test odasından oluşan sınırlı süreli çalışan bir tüneldir. Yüksek basınç tankında 10 m^3 hacminde hava 7 bar basınca ve 380 K sıcaklığa kadar şartlandırılabilir. Öte yandan 50 m^3 hacmindeki düşük basınç tankı vakum altına alınarak 150 mbar mutlak basınç değerine ulaşabilmektedir. Şartlandırılan hava, test esnasında açılan bir vana ile test odası üzerinden geçerek düşük basınç tankına dolmaktadır. ESTÜ Rüzgar Tüneli 0,7-1,1 Mach sayıları arasında ve 600.000-1.500.000 Reynolds sayısı aralığında çalışabilmektedir. Akışı kontrol etmek için kullanılan basınç regülatörü ve sonik vana test için gerekli şartları sağlayacak şekilde test öncesi ayarlanmaktadır. Çoğunlukla rüzgar tüneline yapılan testler ile elde edilen test düzeneği karakteristik eğrileri bu vanaların ayarlanması için kullanılır. Alternatif olarak tünel modelleri de son dönemde bu işlem için sıklıkla kullanılmaktadır. Geliştirilen bu modeller hem tüneli daha önce kullanılmamış bölgelerde de kullanmaya izin vermekte hem de test koşullarının ayarlanması için gerekli süre ve test maliyetlerini azaltmaktadır. [Kuroki, Nagasawa, 2021] yüksek basınç hidrojen tankından araç tankına yakıt doldurma sistemini 1-B olarak modellemiştir. [Demos, Porreca, 2002] Belçika'da bulunan Von Karman Akışkanlar Dinamiği Enstitüsü'nde bulunan CT-3 rüzgar tüneline farklı koşullarda debisinin çıkartılması için termodinamik model yaklaşımını kullanmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışma tünelde elde edilen deneysel veriler ile doğrulanarak yüksek hassasiyet ile çalışan bir model oluşturulmuştur. Yapılan doğrulama çalışmaları sonucu iki farklı türbin konfigürasyonda 0,88 % ve 1.6 % hassasiyet ile modelin çalıştığı tespit edilmiştir. [Esirgen, 2014] hava solunmalı itki sistemlerinin yer seviyesi testlerinde kullanılan boru bağlantılı test düzeneğinin modellenmesini yapmıştır. Bu kapsamda boru bağlantılı ram jet test düzeneğinin kavramsal tasarımı yapılmıştır. Kavramsal tasarım baz alınarak zamana bağlı bir boyutlu nümerik model oluşturulmuştur. Nümerik model bir boyutlu akışkanlar dinamiği programı FLOWNEX kullanılarak oluşturulmuştur. Doğrulama çalışmaları yapılan test sonuçları ile yapılmıştır. Doğrulanmış model kullanılarak, test düzeneğinin dinamikleri ve tasarım parametreleri incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar 1B modellerin test davranışını belirlenmede yeterli hassasiyeti verdiğini göstermektedir.

Literatürden verilen [1-3] üç çalışmada temel öğeler hız, doğruluk ve verimlilik. Bilindiği gibi HAD analizleri hem insan gücü hem de hesaplama gücü olarak oldukça uzun ve maliyetlidir. Bu nedenle değişken koşullarda zamana bağlı çalışan kompleks sistemler için sürekli HAD analizi yapmak verimli değildir. Bu nedenle bu tür sistemlerin analitik yöntemlere dayalı modelleri çıkartılarak ve doğrulama süreçlerini yaparak gerçeğe en yakın sistem davranışını elde etmek amaçlanmaktadır.

YÖNTEM

1-Boyutlu modelin geliştirilmesi

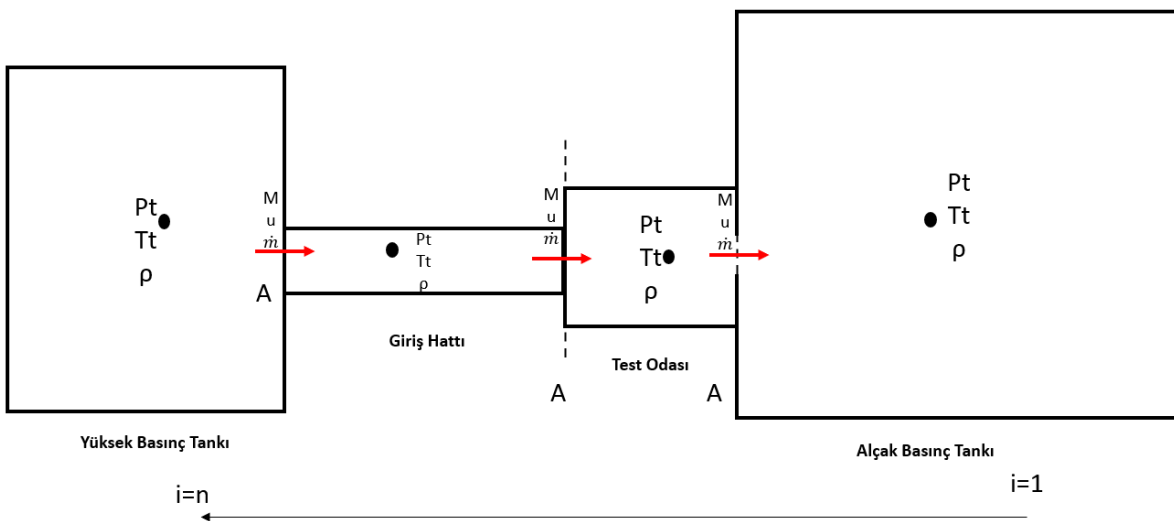
1-B model çalışması için test sistemi aksenal simetrisi sebebi ile R-Z ekseninde iki boyutlu geometriye çevrilmiş ve Şekil 2’de gösterildiği gibi bölümlere ayrılmıştır. Başlangıç durumunda ($t=0$) yüksek ve düşük basınç tanklarının Basınç ($P_{0,YB}$, $P_{0,DB}$) ve sıcaklığı ($T_{0,YB}$, $T_{0,DB}$) bilinmektedir. Hızlı açılan vananın açılması (açılış süresi 0,2 s.) ile test başlatıldığında tünel içerisinde akış sağlanmaktadır. Akışın olduğu bu süreçte korunum denklemleri (Denklem 1-3) çözülerek sıcaklık, basınç ve hız bilgilerinin elde edilmesi mümkündür. Sınır koşulları bilindiği için problem başlangıç değer problemi olarak ele alınabilir ve çözüm bu şekilde gerçekleştirilebilir. Sıcaklık ve basınç arasındaki ilişki ise sıkıştırılabilir akış denklemleri kullanılarak ilişkilendirilmiştir.

Korunum denklemleri temel olarak belirli bir kontrol hacminde özelliğin, giren ve çıkan akılar ile değişimini dikte eder. Termodinamik model olarak bilinen bu yöntem ile akışın modellenmesi için Denklem 1,2 ve 3’te sırasıyla kütle korunumu, izentropik akış denklemi ve ideal gaz denklemi görülmektedir. Bu denklemler kullanılarak her hücre için zamana bağlı olarak kütle, enerji ve momentum korunumu çözülmektedir. Bu nedenle denklemler zaman ve boyutsal ayrıklaştırma ile tekrarlı olarak çözülmektedir. Bu yöntem ile akış analizi yüksek hesaplama gücü (ing. Computational power) gerektirmeden yapılabilmektedir.

$$d(m) = mg - m\dot{c} \quad (1)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \frac{T_2^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}{T_1^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3)$$



Şekil 2 Temel akış yolunun ayrılaştırılmış ağ yapısı

Şekil 2' de temel akış yolu yani temel komponentlerden oluşan model verilmiştir. Bu model yüksek basınç tankı, alçak basınç tankı, giriş hattı ve test odası bölümünden oluşmaktadır. Şekil 2' de görülebileceği gibi 1-boyutlu aşamalı (ing. staggered) ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ yapısında basınç, sıcaklık, yoğunluk, kütle parametreleri hücrenin merkezinde, Mach sayısı, hız ve debi değişkenleri hücre yüzeylerinde tanımlanmıştır. İlk olarak hesaplama adımları anlatılmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen iki modelde aynı hesaplama adımları ile çalışmakla birlikte yaklaşım farklılıkları içermektedir. Hesaplamalar her bir zaman adımı için sanki dengeli hal kabulü ile yapılmış zaman adımı içerisinde yakınsama sağlandıktan sonra bir sonraki zaman adımına geçilmiştir. Başlangıç durumunda sistemdeki P_0 ve T_0 koşulları bilindiğinden çözüme yüksek basınç tankı çıkışından başlanmıştır. Belirli bir zaman adımında her sınır bölgesinden giren ve çıkan debi ve o zamana ait basınç ve sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Hesaplama adımlarında "i" hücreleri "j" zaman adımını temsil etmektedir. Hücre arayüzlerindeki Mach sayısı izentropik akış denklemi Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_i^j = \sqrt{\left[\left(\frac{P_{i+1}^j}{P_i^j} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \frac{2}{\gamma-1}} \quad (4)$$

Mach sayısı hesaplandıktan sonra Denklem 5 kullanılarak ile statik sıcaklık bulunmaktadır.

$$Ts_i^j = \frac{Tt_i^j}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_j^{j2} \right)} \quad (5)$$

Denklem 6 ve Denklem 7 ile ses hızı ve akışkan hızı bulunmaktadır.

$$\alpha_i^j = \sqrt{\gamma RTs_i^j} \quad (6)$$

$$u_i^j = M_i^j \alpha_i^j \quad (7)$$

Hücreden çıkan debinin hesaplanabilmesi için yoğunluğun hesaplanması gerekmektedir. İdeal gaz denklemi (denklem 8) ile yoğunluk değeri bulunduğundan sonra sistemden çıkan debi denklem 9 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_i^j = \frac{Pt_i^j}{RTt_i^j} \quad (8)$$

$$\dot{m}_i^j = \rho_i^j A_i u_i^j \quad (9)$$

Debi hesaplandıktan sonra birim zaman aralığında (dt) taşınan kütle hesaplanabiliriz.

$$m_{i,(g,\zeta)}^j = \dot{m}_i^j dt \quad (10)$$

Yüzeylerde taşınan kütle ile kütle korunumunu kullanarak bir sonraki zaman adımındaki kütle denklem 11 ile bulunmaktadır.

$$m_i^{j+1} = m_i^j + m_{i,g}^j - m_{i,\zeta}^j \quad (11)$$

Bir sonraki zaman adımındaki kütle ile yeni yoğunluk denklem 12 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_i^{j+1} = \frac{m_i^{j+1}}{V_i} \quad (12)$$

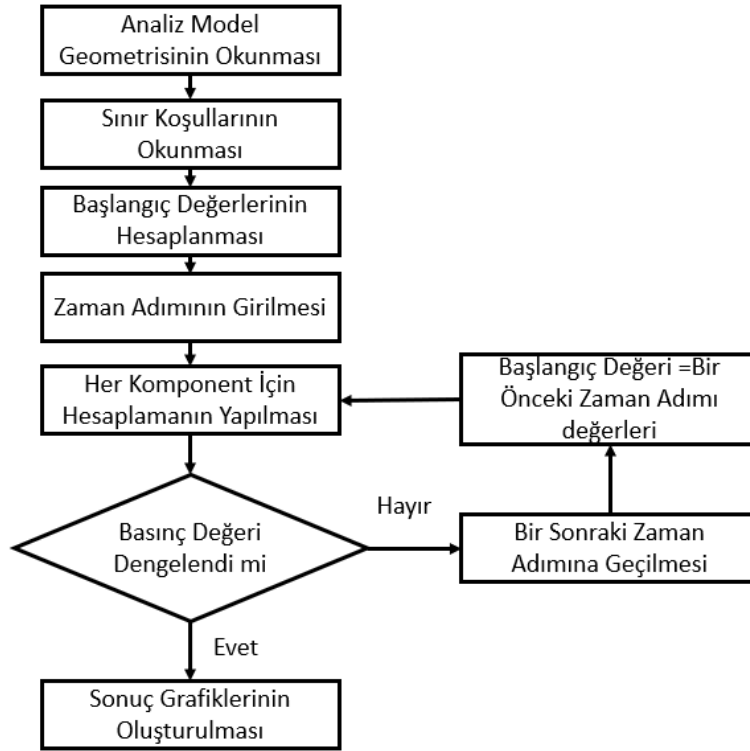
Yeni zaman adımıdaki yoğunluğu hesapladıktan sonra sırası ile sıcaklık ve basınç hesaplanmaktadır. Basınç ve sıcaklık izentropik akış denklemi ve ideal gaz denklemi ile birbirine bağlıdır. Bu iki denklem kullanılarak elde edilen denklem 13 ile yeni sıcaklık ve denklem 14 ile yeni basınç hesaplanmaktadır.

$$Tt_i^{j+1} = \left[\frac{\rho_i^{j+1} R T t_i^j / \gamma - 1}{P t_i^j} \right]^{\gamma - 1} \quad (13)$$

$$P t_i^{j+1} = \rho_i^{j+1} R T t_i^{j+1} \quad (14)$$

Görülebildiği gibi belirli bir zaman adımında bir sonraki zaman adımındaki parametreler hesaplanarak bir sonraki adımın başlangıç koşullarını oluşturmaktadır. Verilen yaklaşım tekrarlı olarak her hücre ve sırası ile her zaman adımı için yapılarak sonuç elde edilmektedir.

Doğrulama modelinin geliştirilmesi: Doğrulama modeli (DM) tüneli oluşturan şekil 2 de görülen temel komponentler kullanılarak, açıklanan yöntem ile geliştirilen kodu HAD ve Ekosimpro modeli ile karşılaştırma amacı ile geliştirilmiştir. Bu model ile yüksek basınçlı sistemin ani boşalması analiz edilmektedir. Doğrulama modeli için kullanılan hesaplama adımları sırası ile Şekil 3' te verilmiştir.

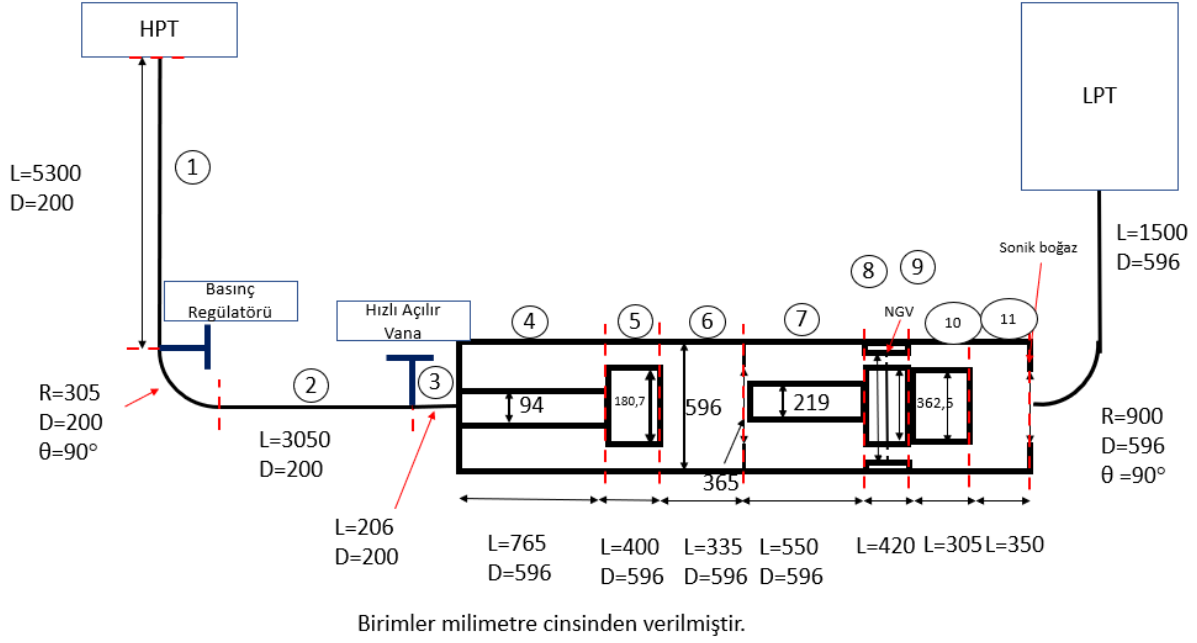


Şekil 3 DM 1-B Kod Hesaplama adımları

Nihai tünel modelinin geliştirilmesi: Bu kısımda aynı hesaplama adımları ile farklı bir yaklaşım kullanılmıştır. Nihai model (NM) daha kompleks olup tüneldeki tüm bileşenleri barındırmaktadır. Burada yaklaşım farkı tünelde kullanılan basınç regülatörü de olmak üzere tüm komponentlerin modellenmiş olmasıdır. Tünelin tüm komponentleri ve akış yolu şekil 4' te verilmiştir. Şekil 4' te verilen basınç regülatörü test başlangıcında belirli bir değere ayarlanmaktadır. Daha sonra akış yukarı (ing. Upstream) basınçtan bağımsız regülatörü (BR) akış aşağı hattı belirlenen basınçta tutmaktadır. Oluşturulan kod bir boyutlu olduğu için içi dolu kesitlerin de bir boyutlu olarak

yansıtılması gerekmektedir. Bu nedenle denklem 15 kullanılarak Şekil 4’te verilen 4, 5, 7, 8, 9 ve 10 bölgele bir boyutlu boruya benzetilerek efektif çapları hesaplanmıştır.

$$A = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4} D_{ef}^2 \quad (15)$$



Şekil 4 Nihai tünel modeli akış alanı

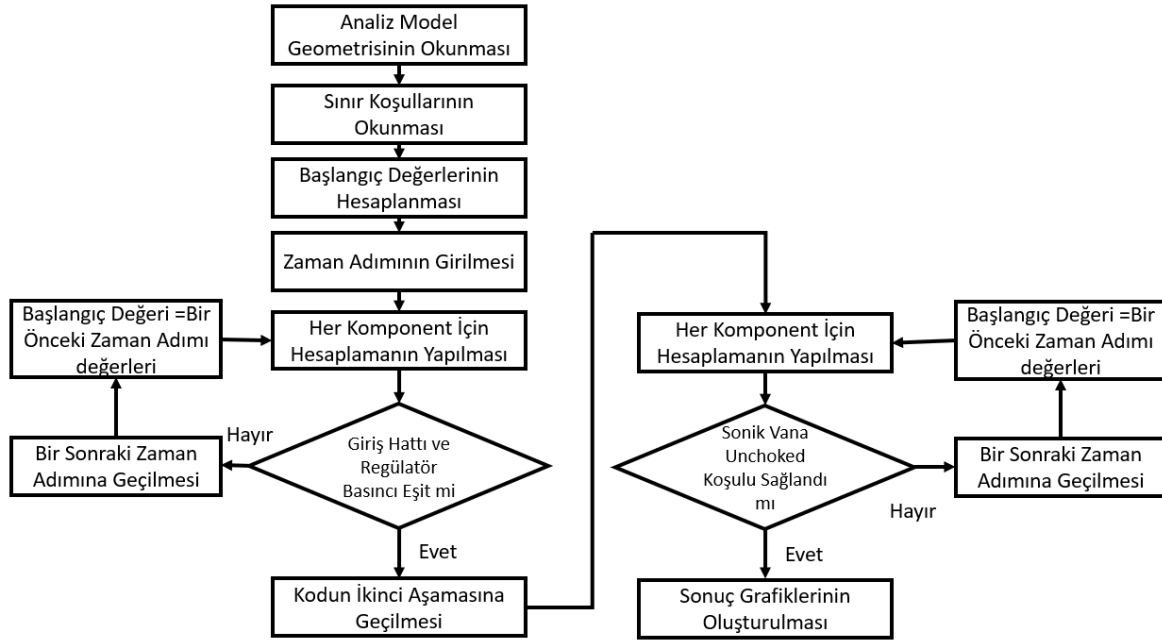
Nihai tünelin geometrik detayları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 Tünel geometri ve akış alanı

Hücre	L[mm]	D1[mm]	D2[m]	A[mm ²]	Deff2	İstasyon	D_arayuz[m]	A_arayuz	Hacim[m ³]	Hpt-1 & LPT-0
Hpt								0	10	1
1	5300	200,0	[-]	31415,9	0,200	1	0,200	0,0314	0,167	1
2	3050	200,0	[-]	31415,9	0,200	12	0,200	0,0314	0,111	1
3	206	200,0	[-]	31415,9	0,200	23	0,200	0,0314	0,006	0
4	765	94,0	596	272046,2	0,589	34	0,200	0,0314	0,208	0
5	400	180,7	596	253340,8	0,568	45	0,568	0,2533	0,101	0
6	335	596,0	[-]	278986,0	0,596	56	0,568	0,2533	0,093	0
7	550	219,0	596	241317,5	0,554	67	0,554	0,2413	0,133	0
8	210	368,7	456	56545,8	0,300	78	0,300	0,0707	0,015	0
9	210	368,7	456	56545,8	0,300	89	0,300	0,0707	0,015	0
10	305	362,5	596	175779,8	0,473	90	0,300	0,0707	0,054	0
11	350	596,0	[-]	278986,0	0,596	111	0,473	0,1758	0,098	0
Lpt	0	0,0	0	0,0	0,000	121	0,150	0,0177	50,813	0

Nihai tünel modelleme yaklaşımı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada hızlı açılır vananın açılması ile akış başlamakta ve BR ayar basıncına kadar tepki vermemektedir. İlk kısımdaki ani boşalmayı takiben Şekil 4’te 2. bölgenin basıncı ayar basıncına düştükten sonra BR hattı belirlenen

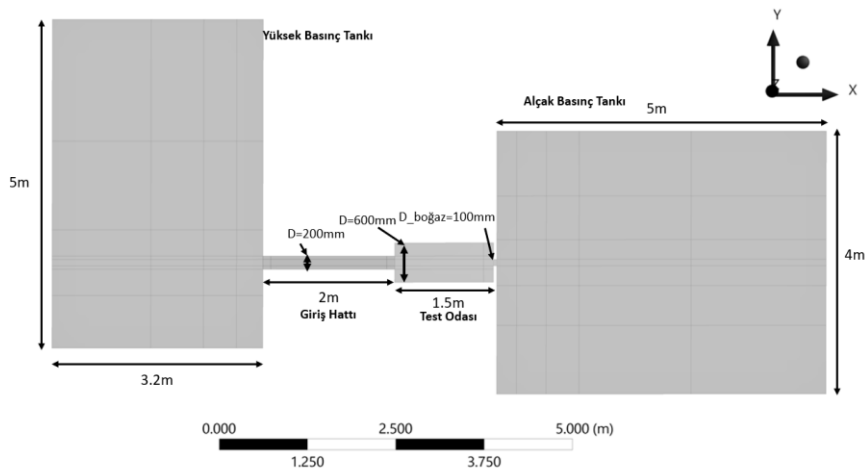
basınçta tutacak şekilde pozisyonunu ayarlamaktadır. Test süresi bu aşamada başlamakta ve sonik vana boğulmamış (ing.unchoked) duruma gelene kadar devam etmektedir. Bu şekilde test süresince sabit Reynolds ve Mach sayısı koşulu sağlanmaktadır. Şekil 5’ te nihai tünel modeli için oluşturulan çözüm algoritması görülebilmektedir.



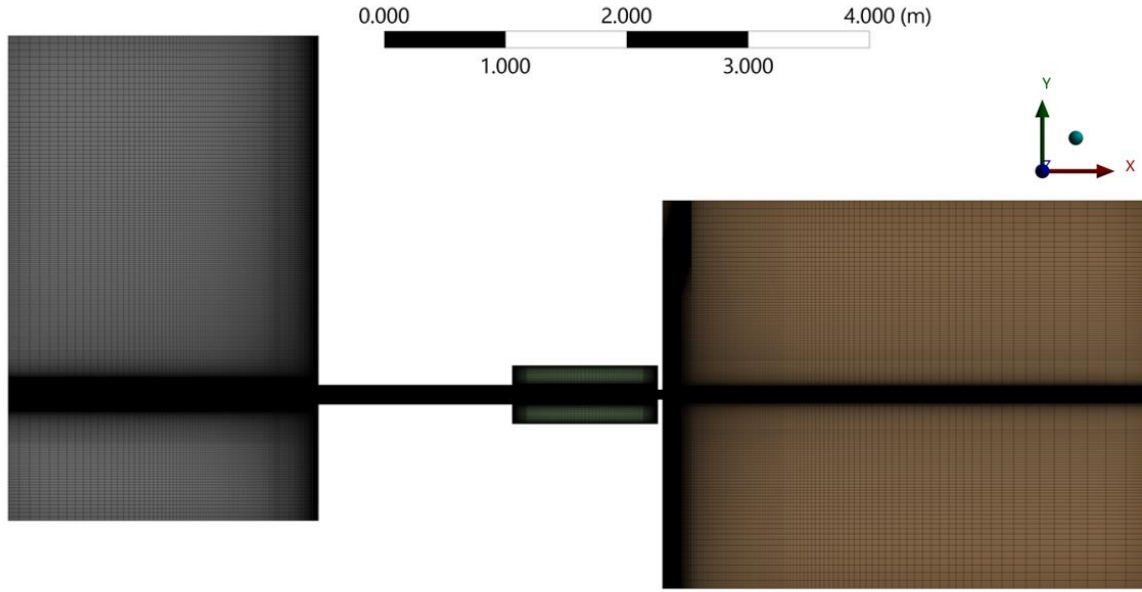
Şekil 5 NM 1-B Kod çözüm algoritması

2-Boyutlu nümerik doğrulama modelinin oluşturulması

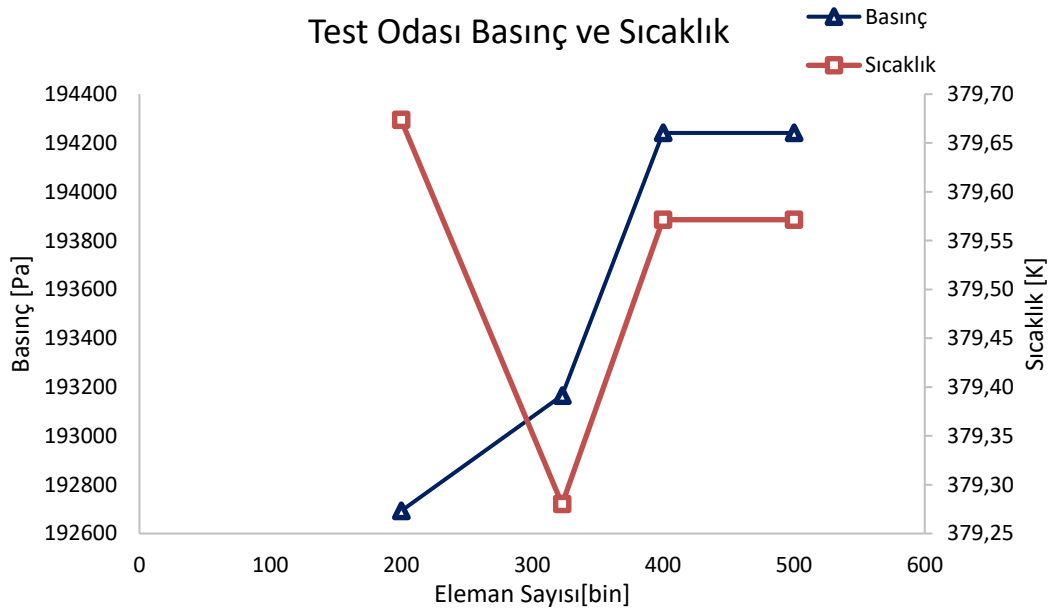
Geliştirilen 1-B kodu doğrulamak için 2-Boyutlu HAD analizi yapılmıştır. Yöntem kısmında anlatılan doğrulama modelinde olduğu gibi tüneldeki temel bileşenler kullanılarak oluşturulan akış alanı şekil 6’da görülmektedir. Kararlı halde yapılan ağ bağımsızlığı çalışması sonuçları şekil 8’de görülmektedir. Analiz sonucunda 400 bin elemandan sonra sonuçların değişmediği görülmüş ve zamana bağlı analizler şekil 7’de görülen nihai ağ yapısı ile yapılmıştır. Analizler Ansys Fluent 2021 R1 programında farklı sınır koşullarında yapılmıştır. Yapılan analizlerde belirlenen kontrol noktalarından zamana bağlı veri toplanmıştır. Ayrıca zamana bağlı hız ve basınç konturları kaydedilerek temel akış alanı ile ilgili bilgi sahibi olmak hedeflenmiştir. Toplanan veriler 1-B modelin doğrulanmasında kullanılmıştır.



Şekil 6 HAD analizi nümerik model



Şekil 7 Nümerik model Ağ yapısı



Şekil 8 Ağ bağımsızlığı çalışması basınç ve sıcaklık

Analiz modeli ile ilgili bilgiler tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2 Analiz Modeli

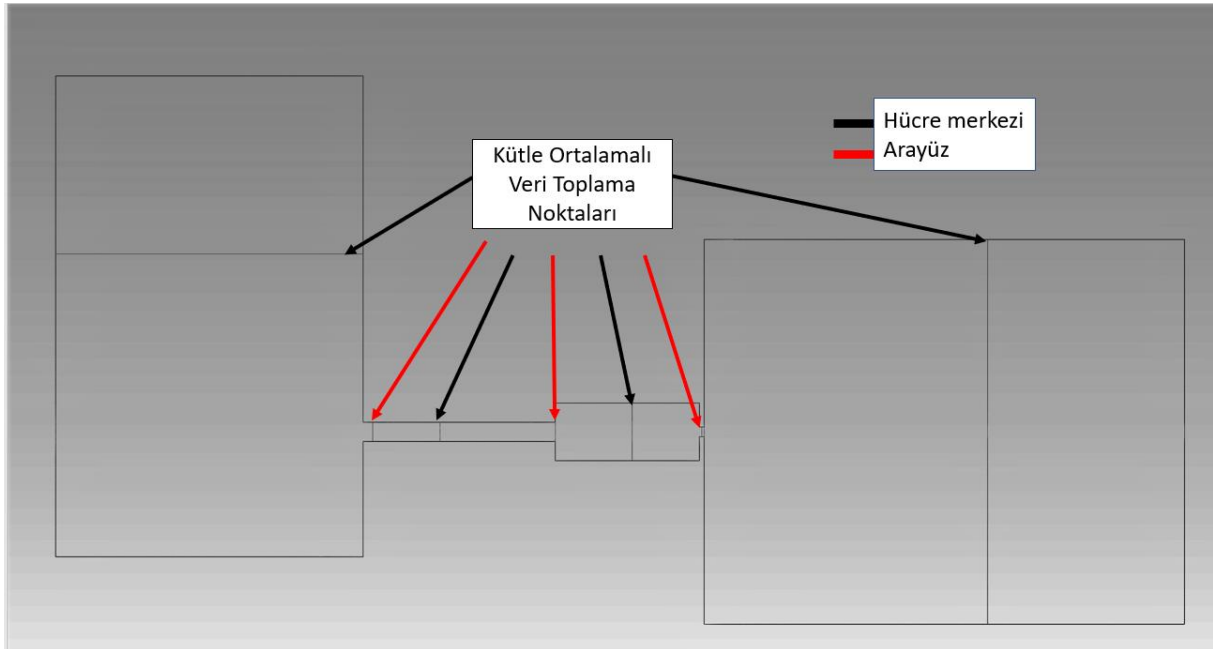
Analiz modeli	
Pressure based	
Türbulans Modeli	k-epsilon,realizable model
Duvar Fonksiyonu	Scalable Wall Function
Basınç-Hız metodu	Coupled
Second Order Discretization	
Zaman Adımı[s]	0,002

Zamana bağlı analizler üç farklı vakum basıncı için yapılmıştır. Tablo 3 'te başlatma ile ilgili değerler görülebilmektedir.

Tablo 3 Analiz başlangıç koşulları

Başlangıç koşulları	
Patch	Yüksek Basınç Bölgesi
	P=200 kPa, T=380K
	Alçak Basınç Bölgesi
	P=60-10-5 kPa, T=300K

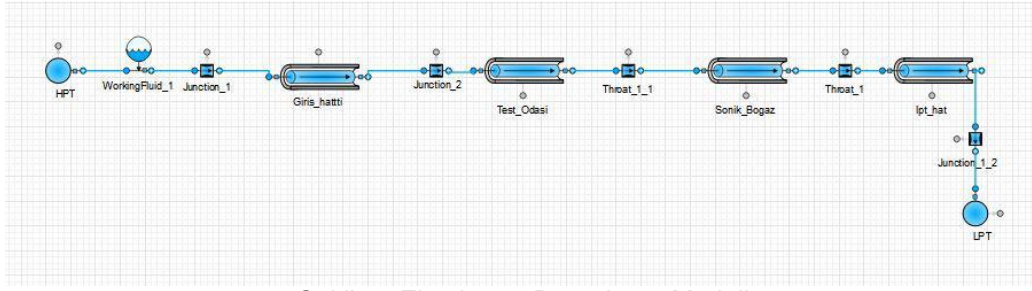
Zamana bağlı analiz süresi boyunca şekil 9' da verilen kontrol noktalarından kütle ortalamalı veri toplanmıştır. 1-B kodun ağ yapısı referans alınarak belirlenen noktalardan toplam basınç, toplam sıcaklık, yoğunluk, kütleli debi, toplam hız, eksenel hız değerleri ile hız ve basınç konturları her zaman adımında kaydedilmiştir.



Şekil 9 HAD analizi veri toplama noktaları

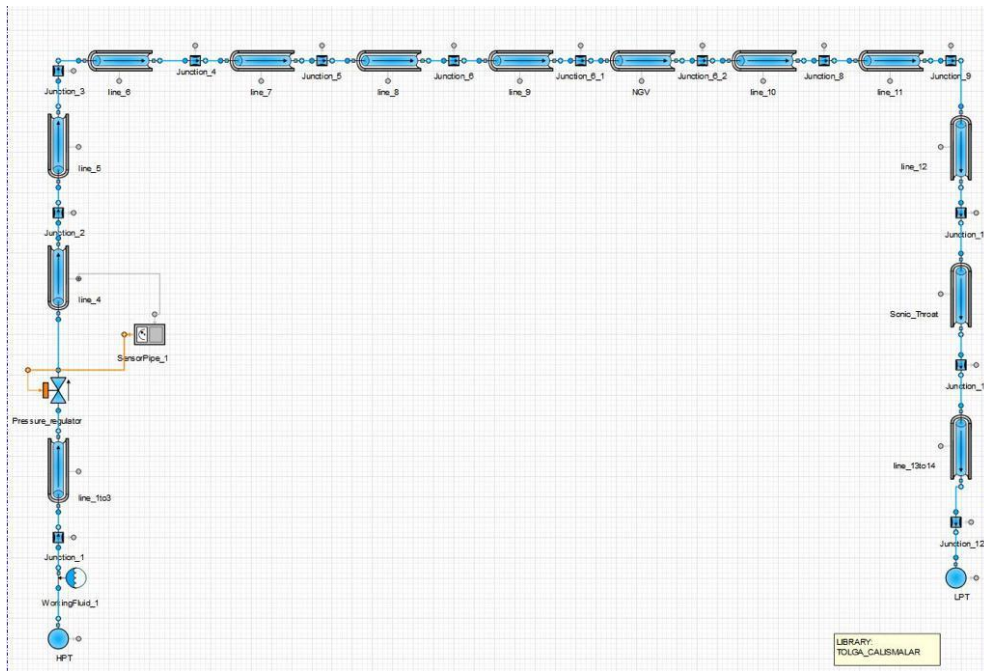
Ekosimpro Yazılımı ile Akış Modellemesi

Ekosimpro 0-Boyutlu ve 1-Boyutlu disiplinler arası sistemlerin modellenmesini ve analizini mümkün kılan bir yazılımdır. Bu çalışma kapsamında akış ağının zamana bağlı çözülmesi için Ekosimpro'nun Fluidapro kütüphanesi kullanılarak geliştirilen model ile 1-Boyutlu kodun doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Modelleme doğrulama ve nihai tünel modeli için yapılmıştır. Ayrıca doğrulama çalışmalarının yanı sıra nihai tünel modeli için aktif olarak tünel çalışma süresince kullanılmak üzere tünelin bire bir modeli bir program oluşturulmuştur. Literatürde zamana bağlı çalışan benzer sistemler Ekosimpro ve benzeri yazılımlar [Esirgen,2014] ile modellenmektedir.



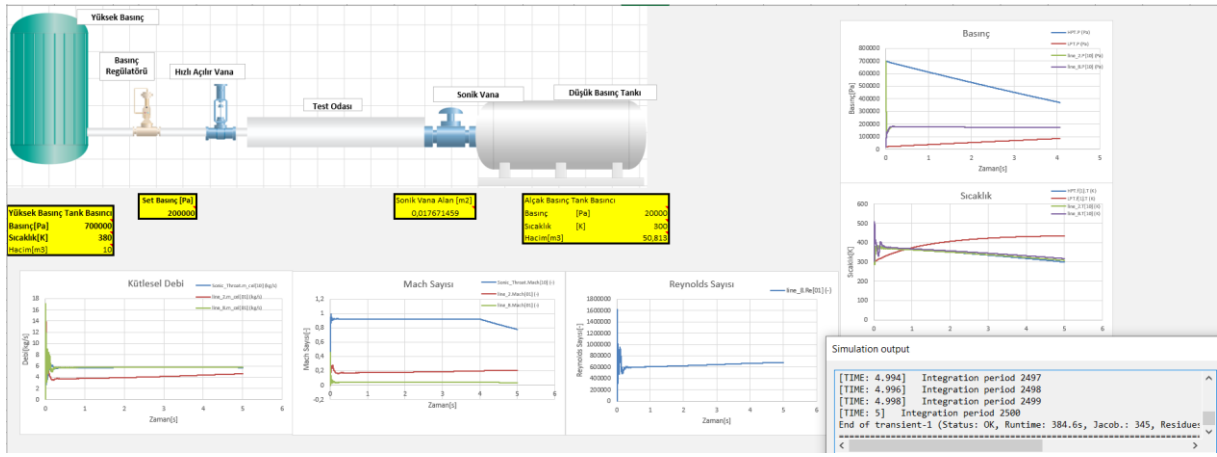
Şekil 10 Ekosimpro Doğrulama Modeli

Doğrulama modeli şekil 10'da görülmektedir. Nihai tünel modelinde ise şekil 11'de görülebileceği gibi tünel tüm akış alanı ve komponentler ile modellenmiştir. Tünelin kritik operasyon komponenti olan basınç regülatörü de modellenmiştir. Bu modelde BR ideale yakın olarak modellenmiştir. Halbuki BR'nün karakterini belirleyen kontrolcü katsayıları tepki süresini belirlemektedir. Kontrolcü katsayıları bilinmediği için bu yaklaşım kullanılmıştır.



Şekil 11 Ekosimpro Nihai Tünel Modeli

Geliştirilen program arayüzü şekil 12'de görülebilmektedir. Geliştirilen program ile test öncesinde sarı renkle belirtilen program girdileri doldurularak zaman bağımlı akış analizi yapılabilmektedir. Eş zamanlı olarak da yüksek basınç tankı, giriş hattı, test odası ve alçak basınç tankı ve ara yüzlerdeki basınç, sıcaklık Mach ve Reynolds sayısı ile debi değerleri anlık olarak takip edilebilmektedir.

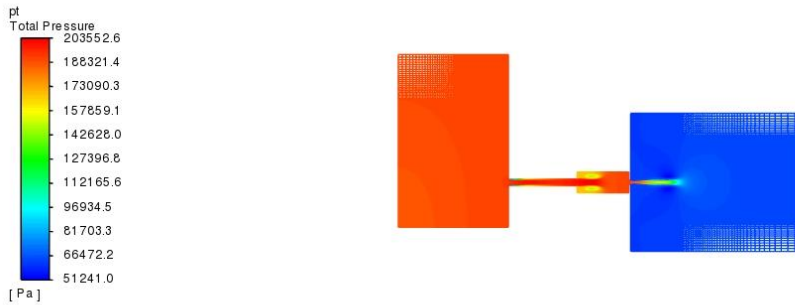


Şekil 12 Ekosimpro Geliştirilen Programın Arayüzü

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

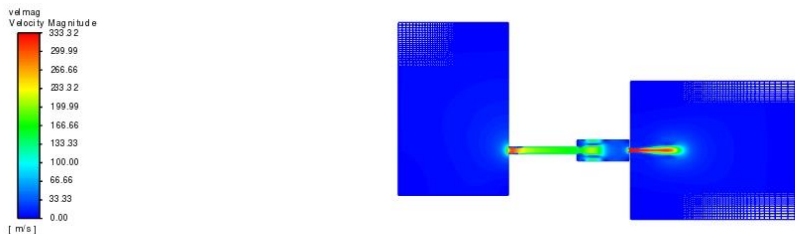
Yapılan çalışmalar sonucunda temel akış alanı ve nihai tünel modeli için geliştirilen 1-B Matlab kodu, Ekosimpro modeli, HAD çalışması çıktıları incelenmiştir. Sonuçlar doğrulama modeli ve nihai tünel modeli olacak şekilde iki kısımda incelenmiştir. Zamana Bağlı toplanan veriler karşılaştırılmış ve görülen farklılıklar incelenmiş ve nedenleri tartışılmıştır.

2-B HAD analizi sonuçları



Şekil 13 Toplam Basınç kontur t=20ms

Analizin başlaması ile test odasının ani şekilde basınçlandığı görülmektedir. Benzer şekilde de sonic vanadan alçak basınç tankına hava akmaya başlamaktadır.



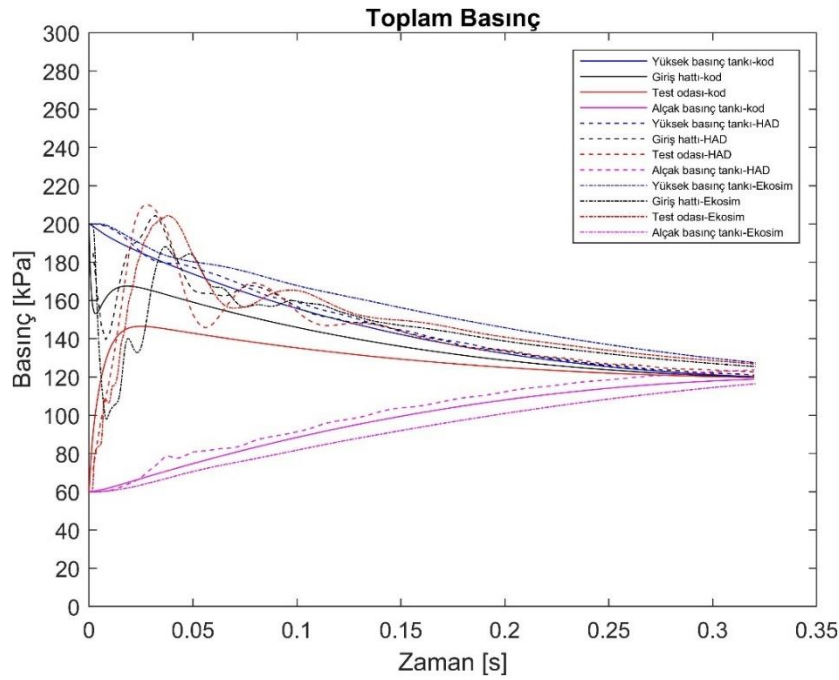
Şekil 14 Toplam Hız kontur t=20ms

Şekil 14' te görülebileceği gibi giriş hattının basıncının aniden düşmesi giriş hattı arayüzünde de yüksek hızlar görülmektedir.

Temel Tünel Modeli Doğrulama Çalışmaları

Bu kısımda tüneli oluşturan 4 temel komponent kullanılarak oluşturulan modelin karşılaştırmaları yapılmıştır. Daha sonra toplanan veriler işlenerek karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır. Burada belirtilmesi gereken bir konu vardır. Had analizi verilerinin toplanma yaklaşımı metot kısmında anlatıldığı gibi belirli bir yüzeyden alınmaktadır. Ekosimpro verileri ise aynı şekilde hattan alınmakta ve kullanılan komponentin kendi içerisinde de ayrılaştırılmış olması nedeniyle merkez hücreden veri toplanmıştır. Dolayısıyla hem had analizi hem verileri için toplanan verinin komponent ortalamasını ne derece yansıttığı ile ilgili belirsizlik vardır. Bunun yanın sıra geliştirilen 1-B Kodda komponentlerin kendi içerisinde homojen olduğu kabulü yapıldığı için elde edilen sonuçların ve hata yüzdelerinin iyi bir nokta olduğu söylenebilir.

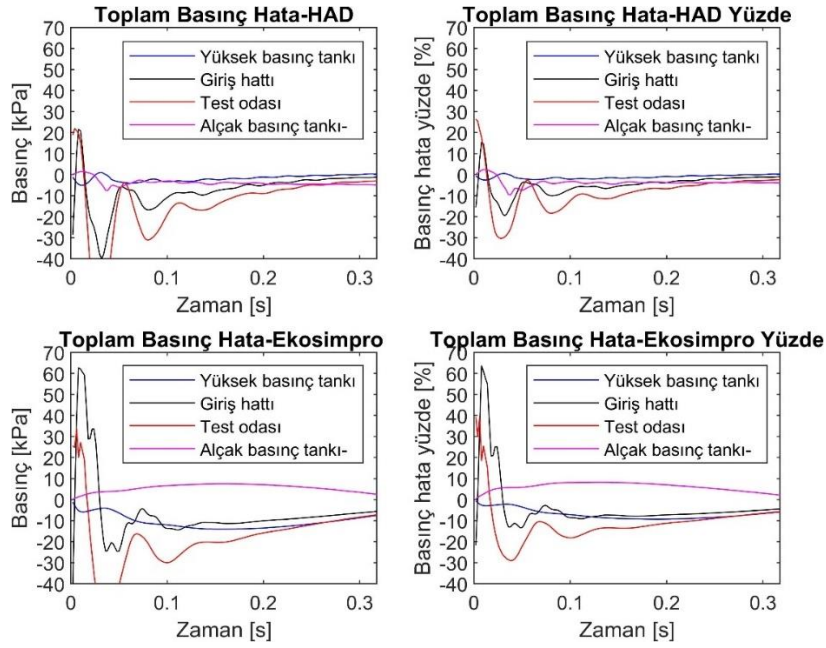
Yapılan karşılaştırma çalışmalarında Had analizi 2-B Navier Stokes denklemini çözdüğü için doğru kabul edilerek hata hesaplaması yapılmıştır. Benzer şekilde Ekosimpro modeli de Euler denklemini ile basınç kaybı korelasyonlarını çözdüğü için 1-B Matlab koduna göre doğru kabul edilerek hata analizi yapılmıştır. Doğrulama modeli Matlab 1-B Kodu ,2-B HAD analizi ve geliştirilen Ekosimpro modeli ile çözülmüştür. Analiz sonuçları farklı parametreler için incelenmiştir.



Şekil 15 Doğrulama Modeli Toplam Basınç karşılaştırma

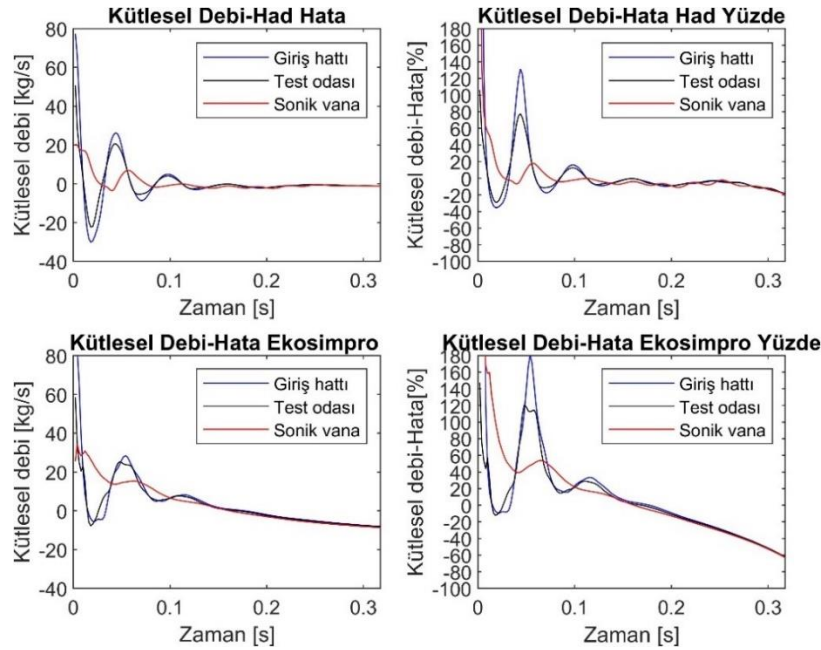
Şekil 15' de 3 farklı metot ile yapılan çözüm sonuçlarına göre tüneldeki komponentlerdeki basıncın zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Had ve ekosimpro sonuçlarına göre test başlangıcındaki 0.1 saniyelik süreçte güçlü dalgalanmalar görülmektedir. 1-B Kodda ise bu dalgalanmalar görülmemiştir. Test başlangıcında görülen güçlü zaman bağlı (ing. Transient) etkilerin azalması ile sonuçların birbiri ile daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 16' da basınç sonuçlarının hata karşılaştırılması görülmüştür. Görülebileceği gibi Had analizi karşılaştırılmasında test başlangıcında hata yüzdesi $\pm\%30$ maksimum olacak şekilde azalan bir yönelim göstermiştir. Daha sonra sonuçlar daha tutarlı hale gelerek $\pm\%10$ 'luk hata görülmüş ve azalarak devam etmiştir.



Şekil 146 Doğrulama Modeli Toplam Basınç Hata

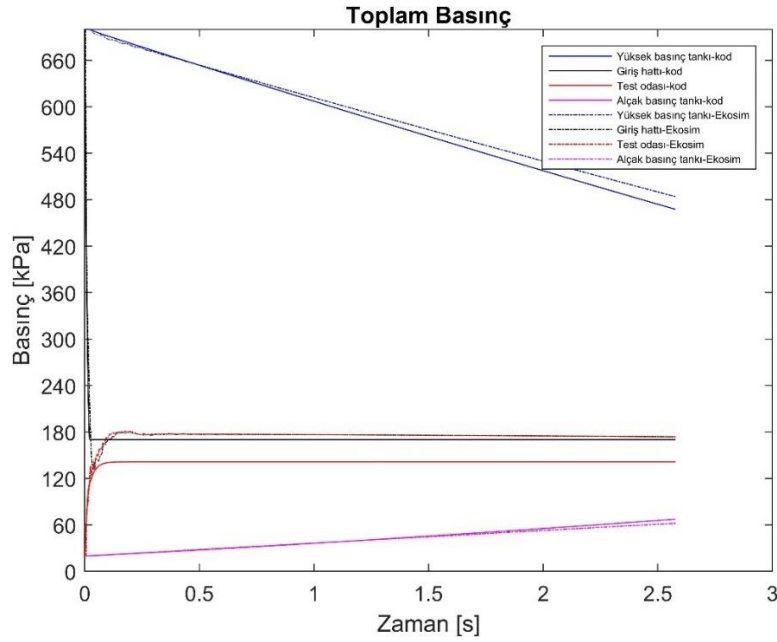
Şekil 17' de kütleli debi hata karşılaştırılması görülmektedir. Görülebileceği gibi Had analizi karşılaştırılmasında test başlangıcında görülen dalgalanmalardan sonra sonuçların tutarlı hale gelerek $\pm \%10$ 'luk hata görülmüştür.



Şekil 17 Doğrulama Modeli Kütleli Debi Hata

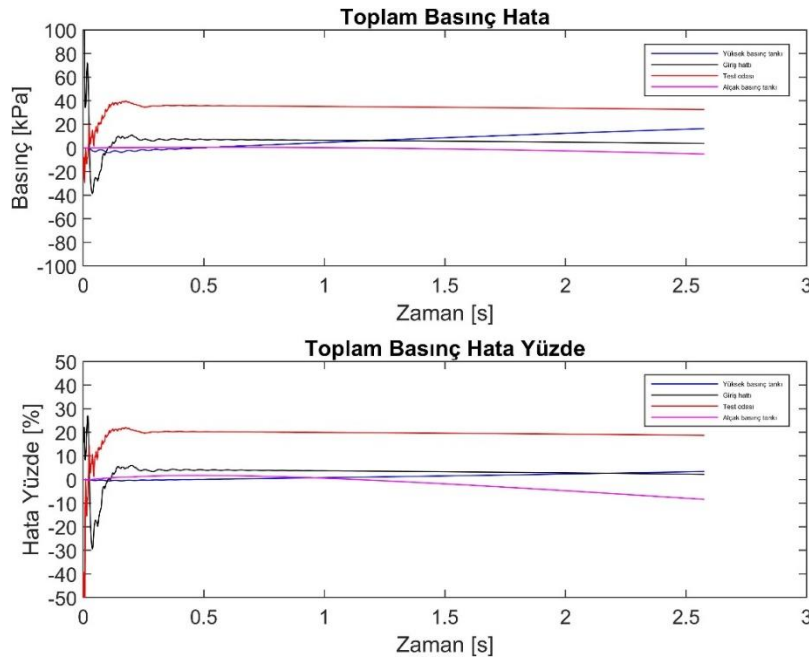
Nihai Tünel Modeli Sonuçlarının Karşılaştırılması

Nihai tünel modeli 1-B Kod ve Ekosimpro modeli için karşılaştırılmıştır. Geliştirilen iki modelin birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Sırasıyla yapılan analiz çıktıları farklı parametreler için incelenmiştir. Test süresince tüneldeki farklı komponentlerdeki basıncın değişimi şekil 18' de verilmiştir. Görülebileceği gibi sonuçlar özellikle yüksek ve alçak basınç tankları için birbiriyle oldukça uyumludur. Ayrıca Basınç regülatörü çıkışındaki giriş hattı basıncı da uyumludur.



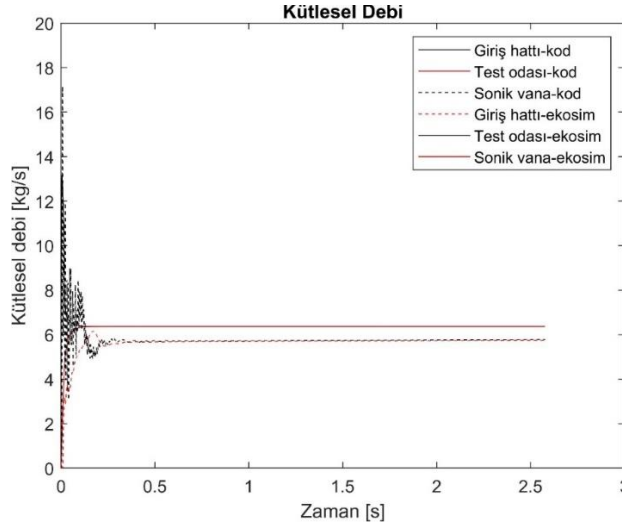
Burada iki farklı modelin algoritma farkı vardır. Yöntem kısmında açıklandığı gibi ekosimpro modelinde kullanılan basınç regülatörü vana açılma ve kapanma basıncına göre ideale yakın çalışmaktadır. Bir diğer taraftan 1-B Matlab kodunda basıncı ayarlamak için kullanılan yaklaşım doğrudan regülatörü çıkışını ayar basıncında tutacak şekilde tamamen ideal modellenmiştir. Giriş hattı ve test odası basınçları arasındaki farkın nedeni bu yaklaşım farklarıdır.

Şekil 19' da toplam basınç hata sonuçları verilmiştir. Görülebileceği gibi başlangıçtaki 0.2 saniyelik basınç regülatörünün dengeleme süresi sonunda hatadaki sapma stabil devam etmiştir. Hata oranına bakıldığında yüksek basınç tankı ve alçak basınç tankı için %2,5'lik hata ile çok iyi bir noktada olduğu söylenebilir. Giriş hattı için %5'lik, test odası için ise %20'lik hata gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen kodun Endüstriyel Ekosimpro yazılımı ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 20' de kütleli debinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Test başlangıcında görülen basınç regülasyon süresinde görülen dalgalanmalardan sonra debi değeri stabil hale gelmiştir. Burada

değerlerin stabil hale geldikten sonra görülen farkın nedeni belirtildiği gibi basınç regülatörünün modelleme yaklaşımıdır. Hata oranına bakıldığında ise %10'luk sabit hata ile çalıştığı görülmüştür. Bu kapsamda debi hesaplama için geliştirilen kodun iyi bir noktada olduğu ve geliştirilebileceği görülmüştür.



Şekil 20 Nihai Tünel Modeli Kütleli Debi Karşılaştırma

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Eskişehir Teknik Üniversitesinde kurulan Türbin Kaskad Test sisteminin modellenmesi yapılmıştır. Modelleme Matlabda geliştirilen 1-B kod ile yapılmıştır. Ayrıca Endüstriyel Ekosimpro programı ile de tünel modellenerek program geliştirilmiştir. Ayrıca tünelin temel akış alanının 2-B HAD analizleri yapılarak zaman bağlı veri toplanmıştır. Yapılan çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Doğrulama çalışmaları sonucunda geliştirilen modelin iyi bir noktada olduğu görülmektedir. Farklı belirsizlik ve hata kaynakları göz önünde bulundurulduğunda geleceğe yönelik çalışmalar ile modelin doğruluğunun %10'un altında olduğu ve %5'in altına indirilebileceği düşünülmektedir. Tünelde kullanılan basınç regülatörün kontrol karakteristiği elde edilemediği için deneysel veriler ile doğrulama çalışması yapılamamıştır. Gelecek çalışmalar kapsamında tünelden toplanan deneysel veriler ile kontrolcü tasarlanacaktır. Tasarlanan kontrolcü 1-B Matlab koduna ve Ekosimpro modeline eklenerek tünelin bilgisayar ikizi çalışmasının doğruluğunu yükseltmek hedeflenmektedir.

Kaynaklar

Esirgen, B. (2014). Boru bağlantılı ramjet test düzeneğinin nümerik ve deneysel incelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Kuroki, T., Kurtz, J., Leighton, D., Nagasawa, K., Peters, M., Sakoda, N. et al. (2021). Thermodynamic modeling of hydrogen fueling process from high-pressure storage tank to vehicle tank. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 46(42), 22004-22017.

Dénos, R., Porreca, L. (2002). Determination of the efficiency of a cooled turbine stage Tested in a compression tube facility.