

Tali Havalandırma Tasarımı Üzerine Bir Yazılım Geliştirilmesi

Sefa SÜLÜNBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2025

Developing a Software on Auxiliary Ventilation Desing

Sefa SÜLÜNBAŞ

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

June 2025

Tali Havalandırma Tasarımı Üzerine Bir Yazılım Geliştirilmesi

Sefa SÜLÜNBAŞ

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden İşletme Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof.Dr. Mustafa ÖNDER

Haziran 2025

ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Sefa SÜLÜNBAŞ'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Tali Havalandırma Tasarımı Üzerine Bir Yazılım Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof.Dr. Mustafa ÖNDER

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Mustafa ÖNDER

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Ece KUNDAK

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Şahin YUVKA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih
ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof.Dr. Mustafa ÖNDER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Tali Havalandırma Tasarımı Üzerine Bir Yazılım Geliştirilmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 02/06/2025

Sefa SÜLÜNBAŞ
İmza

ÖZET

Mühendislik faaliyetlerinden biri olan yeraltı madenciliği, zorlu ve tehlikeli koşullar altında yapılır. Bu faaliyetler yürütülürken hava kalitesinin sağlanması, madenin daha güvenli ve daha verimli çalışabilmesi için hayati önem taşır. Havalandırma sistemlerinin tasarlanma amacı, yeraltı ocağının her noktasına yeterli ve temiz hava ulaştırmak, kirli ve zararlı gazları uzaklaştırmak, oksijen seviyesini dengelemek ve patlayıcı ortamın oluşumunu engellemektir.

Tali havalandırma sistemleri, yeraltı ocaklarında ana hava akımının erişemediği, bir ucu kör olan yolların havalandırılmasında kullanılır. Bu havalandırma sistemleri, genel havalandırmanın bir parçasıdır ve madenin daha dar bölgelerinde hava akışını sağlamada önemli ve etkin bir rol oynar.

Klasik yöntemlerle tali havalandırma hesaplamaları, genellikle manuel olarak yapılan matematiksel çözümler ve krokilerden oluşur. Bu yöntemler hem zaman kaybına neden olur, hem de hatalara oldukça açıktır. Bu bağlamda, bilgisayar destekli simülasyonlar ve modellemeler gelişen teknoloji ile birlikte havalandırma sistemlerinin optimum ve daha verimli bir şekilde hesaplanmasına olanak tanır. İnsan hatalarının en aza indirilmesine, zaman ve iş gücünden tasarrufa ve farklı senaryoların hızla test edilmesine imkan sağlar.

Bu çalışmada, yeraltı madenlerinde tali havalandırma sistemlerinin hesaplanmasını seri-paralel bağlı devreler yöntemiyle gerçekleştiren bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Yazılım, farklı havalandırma senaryolarının oluşturulmasına olanak sağlamakta ve bu senaryolar üzerinde hesaplamalar yapılmasına imkân tanımaktadır. Kullanıcı dostu bir arayüze sahip olan program, tali havalandırma düzenlemelerinin daha sistematik ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesini amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Maden Havalandırma, Tali Havalandırma, Bilgisayar Programı ve Simülasyonu

SUMMARY

Underground mining, one of the key activities in engineering, is carried out under challenging and hazardous conditions. Ensuring air quality during such operations is vital for the safety and efficiency of mining activities. The primary objective of ventilation systems is to deliver adequate and clean air to all areas of the underground mine, remove contaminated and harmful gases, maintain appropriate oxygen levels, and prevent the formation of explosive environments.

Auxiliary ventilation systems are used in blind headings where the main airflow of the mine cannot reach. These systems are integral parts of the overall ventilation network and play a significant and effective role in maintaining airflow in narrower areas of the mine.

Traditional methods of auxiliary ventilation design typically rely on manual mathematical analyses and sketches, which are time-consuming and prone to errors. In this context, computer-aided simulations and modeling, enabled by advancing technology, allow for more efficient and optimized calculations of ventilation systems. Moreover, such simulations help minimize human errors, save time and labor, and allow for rapid testing of various scenarios.

This study aims to develop a computer program that performs auxiliary ventilation calculations in underground mines using the series-parallel network method. The developed program models auxiliary ventilation systems and performs rapid and reliable calculations to ensure optimal airflow. With a user-friendly interface, the program allows users to create and simulate different ventilation scenarios for various sections of the mine.

Keywords: Mine Ventilation, Auxiliary Ventilation, Computer Program, Simulation

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında bilgi birikimi, akademik desteği ve yol göstericiliğiyle bana büyük katkı sağlayan, her aşamada sabırla rehberlik eden değerli tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa ÖNDER'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmamın sağlıklı bir şekilde ilerlemesinde büyük rol oynayan Prof. Dr. Seyhan ÖNDER'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez sürecimin farklı aşamalarında değerlendirmeleriyle katkıda bulunan, yönlendirici görüşleriyle çalışmamın gelişmesine yardımcı olan saygıdeğer jüri üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Ece KUNDAK ve Dr. Öğr.Üyesi Şahin YUVKA 'ya teşekkür ederim. Bilimsel yaklaşımlarıyla düşünce ufkumu genişletmişlerdir.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi bu akademik süreçte de yanımda olan, sevgisi ve desteğiyle beni her zaman ayakta tutan annem Halide SÜLÜNBAŞ' a ve her zaman güven veren varlığıyla güç aldığım babam Ekrem Zeki SÜLÜNBAŞ' a gönülden teşekkür ederim.

Mesleki yolculuğumda beni cesaretlendiren, sabır ve desteğiyle katkı sağlayan, ağabeyim Abdülkadir SÜLÜNBAŞ' a; her zaman yanımda olan ve desteğini hissettiren kardeşim Salih SÜLÜNBAŞ' a ve neşeleriyle hayatımı renklendiren sevgili yeğenlerim Yiğit Ali SÜLÜNBAŞ ve Mihra SÜLÜNBAŞ' a minnettarım.

Bu sürecin her anında sabırla, anlayışıyla ve sevgisiyle en büyük destekçim olan sevgili eşim Nazlıcan SÜLÜNBAŞ' a, ve eşimin ailesine bana inandığı ve yanımda olduğu için teşekkür ederim. Varlığıyla bana güç veren ailem, bu yolculuğun en kıymetli parçası olmuştur.

Tüm bu yolculukta emeği geçen, katkı sunan ve destek olan herkese içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. YERALTI MADENLERİNDE TALİ HAVALANDIRMA	11
3.1. Tali Havalandırma Bileşenleri	13
3.1.1. Tali havalandırma fanları	13
3.1.2. Tali havalandırma boruları	14
3.2. Tali Havalandırma Sistemleri	14
3.2.1. Basit üfleyici veya emici sistemler	15
3.2.2. Birleşik havalandırma sistemleri	19
4. YÖNTEM VE TEORİK BİLGİ	22
4.1. Vantüpte Hava Akışına Etki Eden Faktörler	22
4.2. Kaçaklı Vantüplerde Hava Akışının İncelenmesi	25
4.3. Uzun Yeraltı Galerilerinde Tali Havalandırma Tasarım Kriterleri	28
5. TALİ HAVALANDIRMA TASARIMI VE SİMÜLASYONU YAZILIMI	32
5.1. Yazılımın Algoritmaları	32
5.1.1. Birinci modülün algoritması	32
5.1.2. İkinci modülün algoritması	33
5.1.3. Üçüncü modülün algoritması	34
5.1.4. Dördüncü modülün algoritması	35
5.2. Yazılımın Tanıtımı ve Kullanımı	36
5.2.1. Ana form ekranı	37

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
5.2.2. Birinci modül ekranı	38
5.2.3. İkinci modül ekranı	43
5.2.4. Üçüncü modül ekranı	46
5.2.5. Dördüncü modül ekranı	50
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Üfleyici havalandırma sistemi (Güyağüler, 1991).	15
3.2. Emici havalandırma sistemi (Güyağüler, 1991).	17
3.3. Galeri dışı çoklu fanlı havalandırma (Vutukuri, 1986).	18
3.4. Galeri içerisinde aralıklı fanların düzeni (Vutukuri, 1986).	18
3.5. Ana üfleyici – yardımcı emici sistem.	20
3.6. Ana emici – yardımcı üfleyici sistem.	21
4.1. Vantüpteki seri – paralel bağlantılar (Vutukuri, 1983).	26
5.1. Birinci modülün algoritması	33
5.2. İkinci modülün algoritması	34
5.3. Üçüncü modülün algoritması	35
5.4. Dördüncü modülün algoritması	36
5.5. Açılış ekranı	37
5.6. Ana form ekranı	38
5.7. Birinci modül ekranı	39
5.8. Birinci modül vantüp detayları ekranı	39
5.9. Birinci modül dizayn tablosu ekranı	40
5.10. Birinci modül geometrik verilerden ekranı	41
5.11. Birinci modül 3D ortamı	41
5.12. Birinci modül simülasyon ortamı	42
5.13. Birinci modül raporlama ekranı	43
5.14. İkinci modül ekranı	43
5.15. İkinci modül vantüp detayları ekranı	44
5.16. İkinci modül 3D ortamı	45
5.17. İkinci modül simülasyon ortamı	45
5.18. İkinci modül raporlama ekranı	46
5.19. Üçüncü modül ekranı	47
5.20. Üçüncü modül fan ve vantüp detayları ekranı	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.21. Üçüncü modül 3D ortamı	48
5.22. Üçüncü modül simülasyon ortamı	49
5.23. Üçüncü modül raporlama ekranı	49
5.24. Dördüncü modül ekranı	50
5.25. Dördüncü modül fan ve vantüp detayları ekranı	51
5.26. Dördüncü modül 3D ortamı	51
5.27. Dördüncü modül simülasyon ortamı	52
5.28. Dördüncü modül raporlama ekranı	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Kaçak katsayısı ve kaçak yolu direnç katsayısı (Vutukuri, 1983).	24
4.2. Vantüp karakteristikleri (Vutukuri, 1983).	25



1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yüksek risk içeren sektörler arasında yer alan yeraltı madenciliği, sınırlı doğal havalandırma, ağır çalışma şartları ve kapalı ortamlarda yürütülen faaliyetler sebebiyle çeşitli mühendislik çözümleri gerektirir. Bu nedenle, iş güvenliğinin sağlanması, üretim verimliliğinin artması ve çalışan sağlığının korunması açısından en önemli unsurlardan biri havalandırma sistemleridir. Yeraltı ocaklarında havalandırma sistemleri; temiz ve yeterli miktarda havayı çalışma bölgesine iletmek, zararlı ve patlayıcı gazları seyreltmek, oksijen seviyesini dengelemek ve sıcaklık kontrolünü sağlamak için tasarlanır. Tali havalandırma sistemleri ise, ana hava akımının erişmediği, bir ucu kör olan galerilerde bu görevleri üstlenmektedir.

Genel havalandırma sisteminin bir parçası olan tali havalandırma, madenin dar bölümlerine bölgesel hava akışını sağlamak amacıyla kullanılır. Bu sistemlerin optimum bir şekilde tasarlanması, enerji kullanımının azaltılmasına, iş güvenliğinin artırılmasına ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine imkan sağlar. Genel olarak tali havalandırma hesaplamaları elle yapılan bir takım çözümler ve teknik çizimlerden oluşmaktadır. Ancak, bu klasik yöntemler hem zaman kaybına yol açar hem de hata payı yüksektir. Bilhassa karmaşık yeraltı ağlarında, farklı olasılıkların hızlı test edilememesi verim ve para kaybına neden olabilmektedir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle ortaya çıkan bilgisayar destekli mühendislik uygulamaları, bu tür kompleks hesaplamaların daha hızlı, güvenilir ve değişken bir şekilde yapılmasına imkan sağlamaktadır. Bununla birlikte, havalandırma şebekesini oluşturan hava akım yollarının elektrik devre analiz yöntemlerinden biri olan seri-paralel bağlı devreler yöntemi ile hesaplanarak modellenmesi en etkili ve en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde şebeke elemanlarından biri olan hava yolları direnç olarak ve akışlar ise elektrik akımı gibi kabul edilir ve bu sayede sistemin genel davranışı matematiksel olarak çözülebilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, yeraltı madenlerinde tali havalandırma sistemlerinin tasarımı ve hesaplamaları için bilgisayar tabanlı bir yazılım geliştirilmesidir. Tez kapsamında tasarlanan program, sade ve basit bir arayüze sahip olup, bir ucu kör olan yolların havalandırılmasına imkan sağlayan tali havalandırma elemanlarının ve ortamının farklı senaryolar ile oluşturulmasına ve bu senaryoların analiz edilerek en uygun hava akışının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca bu yazılım, mühendislerin karar verme süreçlerini hızlandırarak zamandan ve iş gücünden tasarruf sağlamaktadır.

Literatürde yazılım ile yapılan çalışmalar ya yalnızca ana havalandırma sistemleri üzerinde durmakta ya da tali havalandırma sistemleri için sınırlı ve basit fonksiyonlar sunmaktadır. Ayrıca kullanıcı arayüzlerinin yetersizliği ve değişken olmaması, güncelliğini yitirmesi farklı senaryolar üzerinde akıcı ve detaylı bir şekilde analiz yapılmasını güçleştirmektedir. Bununla birlikte, sunulan çalışma, hesaplama doğruluğu, kullanıcı deneyimi, gerçekçi modelleme ve simülasyon oluşturma açısından literatürdeki mevcut eksiklikleri gidermeyi hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında, tali havalandırma sistemlerinin teorik temelleri açıklanmış, seri-paralel devre modeliyle hava akımı analizleri yapılmış ve geliştirilen yazılım farklı senaryolar üzerinde test edilerek sonuçları değerlendirilmiştir. Kullanılan yöntemler arasında, hava akış yollarının direnç olarak modellenmesi, C# dili ile yazılım geliştirilmesi ve görsel bir kullanıcı arayüzü aracılığıyla senaryo analizlerinin kolaylaştırılması yer almaktadır. Elde edilen bulgular, bu tür yazılımların yeraltı madenlerinde güvenli ve verimli havalandırma tasarımı için ne denli önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Menéndez vd. (2023), yeraltı ocaklarında kullanılan tali havalandırma sistemlerini, farklı nitelikteki havalandırma kanallarını göz önünde bulundurarak analiz etmişlerdir. 0,6 m çapında ve 200 m uzunluğunda bir kanal üzerinden yapılan incelemelerde, kanal hattı boyunca hava kaçağı ve basınç kaybını incelemişlerdir. Analitik ve CFD modelleme teknikleri ile yapılan çalışmalarda, fan gücü ve enerji tüketimi de değerlendirilmiş ve daha geniş çaplı kanalların (%74'e kadar) enerji tasarrufu sağlayabileceğini bulmuşlardır. Ayrıca, sistem tasarımını basitleştirmek ve enerji tüketimini tahmin etmek amacıyla nomogramlar geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, bu nomogramların 600–2400 mm çaplarındaki kanallar ve 4000 m'ye kadar tünel uzunlukları için geçerli olduğunu açıklamışlardır.

Zhang vd. (2023), derin yeraltı ocaklarında meydana gelen zorlu termal şartlar ve dizel egzozu problemlerini incelemek amacıyla tali havalandırma sistemlerinin üç boyutlu sayısal modellemeyle değerlendirmesini yapmışlardır. Gerçek bir çalışma bölgesi örnek alınarak geliştirilen modelde, CFD simülasyonlarıyla hava akımı, sıcaklık, nem ve egzoz dağılımlarını araştırmışlardır. Söz konusu araştırmada, entalpi farkı yönteminin hava hacmini istenildiği derecede tahmin edemediğini ve ısı sınır şartlarının doğru belirlenmesinin tasarımda kritik olduğunu gözlemlemişlerdir. Diğer bir seçenek olarak, sigma ısı farkı metodu ve dizel ekipman gücünü önceleyen bir yaklaşım önerilmiş ve böylece hem hava kalitesi hem de termal konforu artıran bir yol izlemişlerdir.

Geng vd. (2020), yeraltı kömür madenlerinde tali havalandırma altında tozun dağılımını analiz ederek özellikle farklı boyutlardaki parçacıkların davranışını incelemişlerdir. Euler tabanlı metotlarla yapılan simülasyonlar, ince toz parçacıkların (<20 μm) daha çok askıda kaldığını ve PM10'un askıda tozun büyük kısmını oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. İri taneli toz parçacıklarının (>40–60 μm) ise daha çok çökme eğiliminde olduğunu ve başlangıçtaki hava hızı arttıkça tozların tabakalı bir şekilde dağılım gösterdiğini belirlemişlerdir. Asılı ve çöken toz miktarları zamanla uyumlu olarak değişmekte ve bu sonuçlar, kapalı alanlarda toz kontrolünü sağlamak için önemli bilgiler sunmuşlardır.

Li vd. (2021), derin yeraltı ocaklarında ısı kontrolünü sağlamak amacıyla termal performansı irdelemişler ve kazı ilerledikçe oluşan ısı değişimlerini incelemişlerdir. Hareketli ağ yöntemiyle oluşturdukları modeli, farklı tali havalandırma ortamlarında test etmişlerdir. Sonuçlara bakarak, sadece havalandırma hacmini arttırmanın belirli bir soğutma etkisi sağladığını bildirmişlerdir. Hava kanalı çapının küçülmesi veya çıkışının çalışma yüzeyine çok yaklaşması ile birlikte, ısı miktarının da arttırdığını görmüşlerdir. Bu duruma ilave olarak, kazı ilerleme hızı ve yol kesit alanının büyümesiyle duvarlardan yayılan ısının da arttığını bildirmişlerdir. Ortalama sıcaklık ve ısı birikimini etkileyen faktörler ortogonal deneyle değerlendirmişlerdir.

Gonen (2021), yeraltı madenlerinde tali havalandırma fanlarına değişken devirli sürücüler monte edilerek isteğe bağlı havalandırma uygulamasının enerji verimliliğine katkısını incelemiştir. Sistem, elektrik tüketimini %53 azaltarak yılda 324.300 kW tasarruf ve 155,6 ton CO₂ emisyonunu azalttığını ileri sürmüştür. Düşük tamir-bakım gerektiren bu çözüm, 5 ay 220 gün gibi kısa bir geri ödeme süresine sahip olduğunu görmüştür.

Dang vd. (2021), Vietnam'daki yeraltı kömür madenlerinde kullanılan tali havalandırma kanallarında hava kaçağı ve direnç parametrelerini irdelemiş, galeri ilerledikçe hava kaçağının arttığını tespit etmişlerdir. Hali hazırda kullanılan sistemlerin, yabancı kaynaklara dayalı ve güncelliğini yitirmiş verilerle tasarlandığını belirten araştırmacılar, kendi yaptıkları ölçümlerle kanal özelliklerini belirlemiş ve bu sayede havalandırma sisteminin daha verimli tasarlanmasına katkıda bulunmuşlardır. Sonuç olarak bu çalışma ile birlikte, yerel koşullara uygun verilerin kullanımının önemine dikkat çekmişlerdir.

Li vd. (2024), derin yeraltı ocaklarındaki tünellerde yüksek ısı sorununu en aza indirmek amacıyla tali havalandırma ile bölgesel ısı yalıtımının bir arada kullanıldığı soğutma yöntemini irdelemişlerdir. 1:10 ölçekli fiziksel model ve ortogonal deneyler sonucunda yapılan analizler, yalıtımın ve uygun kanal yerleşiminin çalışma ortamındaki sıcaklığı anlamlı biçimde azalttığını gözlemlemişlerdir. En etkili soğutma, havalandırma kanalının yalıtım tabakasının ortasına yerleştirilmesi ile elde etmişlerdir.

Salami vd. (2025), yeraltı maden ocaklarında kör galeri açma işlemi sırasında oluşabilecek ekipman yangınlarında duman ve ısı yayılımını CFD ve FDS yöntemleriyle irdelemişlerdir. Farklı havalandırma hızları ve tali kanal çıkışı ile yüzey arasındaki uzaklıklar için yapılan simülasyonlar, kanal çıkışının yüzeye olan uzaklığının, duman tabakalaşması ve türbülans oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca çıkışın yüzeye yakın olması, dumanın dağılımını hafifleterek yangın anında sorunsuz ve güvenli tahliye olanağını artırdığını ifade etmişlerdir. Ana hava yolundaki havalandırma hızı ise dumanın geri doğru yayılım uzunluğunu etkilerken, sıcaklık dağılımına sınırlı etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, tali havalandırma sistemlerinin yangın güvenliği bakımından etkin tasarımı için önemli bilgiler vermişlerdir.

Sahu ve Mishra (2022), sürekli olarak kazıcı kullanılan bir maden galerisinde orataya çıkan kömür tozunun beş farklı tali havalandırma sistemiyle nasıl yayılım gösterdiğini hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonlarıyla irdelemişlerdir. Gerçek veri kullanılarak $k-\epsilon$ türbülans modeliyle yapılan 3D simülasyonlarına ilave olarak, Grimm aerosol spektrometresiyle toz ölçümleri yapmışlardır. Ölçüm sonuçlarına göre, çizgisel hava perdesi (line brattice) sistemi, tozun güvenli seviyelere ilerlemesinde en etkili yöntem olarak saptamışlar; özellikle yan duvardan 0,75 m ve 1,0 m uzaklıkta yerleştirildiğinde daha homojen ve düşük konsantrasyonlu toz dağılımı oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Dang (2023), Vietnam'daki yeraltı kömür madenlerinde artan galeri uzunlukları sebebiyle havalandırma ihtiyacının giderek arttığını ileri sürmüştür. Çalışmada, tali havalandırma sistemlerinin tasarımında en temel kriter olan havalandırma kanallarının maksimum uzunluğu belirlenmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar, galeri sürülmesi esnasında gerek duyulan hava miktarını oluşturabilecek uygun fan seçiminin yapılmasını sağlamakta ve aynı zamanda daha az maliyetli, daha verimli tali havalandırma sistemlerinin tasarlanmasına yardımcı olmuştur. Sonuç olarak bu analiz ile havalandırmanın galeri ilerleme hızı üzerindeki etkisini de dolaylı olarak değerlendirme fırsatı sunmuştur.

Mishra vd. (2023), yeraltı kömür ocaklarında uzun kör galerilerin güvenli şekilde sürülmesi için ihtiyaç duyulan tali havalandırma sistemlerinin detaylı olarak planlama sürecini araştırmışlardır. Kanal direnci, kaçak, fan seçimi ve şok kayıpları gibi faktörlerin

sistem performansını kompleksliğini vurgulamışlar; hali hazırdaki literatürü tarayarak modern simülasyon araçlarıyla tasarımlar geliştirmişlerdir. Bu yöntem ve sonuçlar, Ultratech Pvt. LTD.'ye ait bir madende başarıyla uygulayıp pratik geçerliliğini ortaya koymuşlardır. Söz konusu çalışma ile etkin tali havalandırma planlamasının yeraltı üretim güvenliği ve verimliliği üzerinde önemli rol oynadığını ileri sürmüşlerdir.

Dang ve Bui (2020), yeraltı maden ocaklarında galeri açımı esnasında, havanın kanal boyunca çalışma bölgesine ulaştırılmasında meydana gelen hava kaçakları, havalandırma verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir faktör olduğunu ileri sürmüşlerdir. Havalandırma kanallarındaki kaçakların çoğunlukla çalışma bölgesine yeterince hava miktarının ulaşmasını engellediğini bildirmişlerdir. Söz konusu çalışmada, Ha Lam Kömür Madeni'nde galeri sürülmesi esnasında yapılan deneysel sızıntı ölçümleri esas alınarak, kanal sızıntı katsayısı ile aerodinamik ve geometrik faktörler arasında bir ilişkiyi olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca, belirli tali havalandırma ekipmanlarıyla karşılanabilecek optimum havalandırma kanal uzunluğu da belirlemişlerdir. Söz konusu çalışma ile yeraltı tali havalandırma sistemlerinin tasarımı ve performans değerlendirmesi açısından önemli teknik veriler sunmuşlardır.

Martynenko (2020), tali havalandırma fanının elektrik tahrik sistemiyle birlikte güvenilirliğini detaylı bir şekilde ele almışlardır. Bu araştırma kapsamında, fanın statik yapısal dayanımı incelenmiş, rezonanssız çalışma koşullarını karşılayabilmek amacıyla titreşimsel karakteristikleri saptanmış ve elektrik tahrik sisteminin taşıma kapasitesini hesaplamıştır. Ortaya konulan bulgular, fan çarkının dayanım sınırı ile birlikte, rulmanların uzun süreli dayanımı ve rotor taşıma kapasitesi bakımından fanın güvenli çalışma süresinin tahmininde bulunulması hususunda öngörüler sağlamıştır. Yaptığı analizler ile tali havalandırma fanının yapısal güvenliğini analiz eden kapalı bir mühendislik döngüsü sunmuştur.

Morla vd. (2022), dizel motorlu araçların çalıştığı kör galerilerde hava geri dönüşümünü (resirkülasyon) kontrol altında tutmak amacıyla tali fanların optimum konumlarını araştırmışlardır. Farklı tali fan konumlarının ve değişen temiz hava debilerinin, 30 m³/s kapasiteli çift 75 kW ve 45 m³/s kapasiteli çift 110 kW tali fanlarda hava geri dönüşümü ve dizel partikül madde (DPM) kontrolü üzerindeki etkileri analiz etmişlerdir.

Ortaya konulan bulgulara göre, temiz hava debisi fan kapasitesiyle eşleştğinde, fan girişten 10 metre mesafede yer alsa dahi hava geri dönüşümü yarattığını söylemişlerdir. Bununla birlikte, temiz hava miktarının fan kapasitesinin en az %150'si kadar olması sonucunda; 75 kW'lık fan için en az 5 metre, 110 kW'lık fan içinse en az 10 metre mesafede yerleştirildiğinde geri dönüşüm sağlamadığını bildirmişlerdir. Söz konusu çalışmayla, kör galeri havalandırmasında fan yerleşiminin ve hava debisinin ayarlanması, DPM maruziyetini azaltmada önemli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Chang vd. (2020), bir yeraltı maden ocağında yapılan saha deneyine göre, DPM'in yayılımı ve konsantrasyon dağılımı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) metoduyla incelemişlerdir. Üfleyici tali havalandırma sistemi altında çalışan bir yükleyiciden çıkan DPM simüle edilmiş; yükle-taşı-boşalt (LHD) ekipmanının galeri içindeki hareketi dinamik ağ yöntemiyle modeller oluşturmuşlardır. DPM davranışları, tür taşınımı yaklaşımıyla analiz etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarıyla, yüksek DPM yoğunluklu bölgeler tespit edilmiş ve bu bulgular, iş güvenliği çalışmaları ile yer altı havalandırma sistemlerinin daha sağlıklı tasarlanmasına yönelik faydalı veriler sunmuşlardır.

Tutak ve Brodny (2018), yeraltı taşkömürü madenlerinde iş güvenliğini olumsuz etkileyen metan gazının etkilerini en aza indirmek ve riskli bölgelerdeki gaz birikimlerini kontrol etmek için, tali havalandırma ekipmanlarının etkinliğini irdelemişlerdir. Özellikle uzun ayak üretim yöntemi kullanılan bölgelerde, arka yol ile uzun ayak kesişim bölgesinde oluşan metan konsantrasyonu dağılımları, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yönteminden faydalanarak üç boyutlu olarak modellemeler oluşturmuşlardır. Gerçek saha ölçümleri ve metan salınım bilgilerine dayalı yapılan analizlerde, hem kömürden hem de göçük alanının sebep olduğu metan emisyonlarını dikkate almışlardır. Tali havalandırma sisteminin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda farklı hava akımı hızları kıyaslanmış, bu sayede sistemlerin performansı analiz edilmiştir. Ortaya çıkan bulgular, tali ekipmanların özellikle metan birikiminin yoğunlaştığı alanlarda hava sirkülasyonuna fayda sağladığını ve metan konsantrasyonlarını büyük ölçüde en aza indirdiğini göstermişlerdir. Sonuçlarla birlikte araştırmacılar, bu tür havalandırma sistemlerinin yer altı kömür işletmelerinde daha yaygın ve sistematik şekilde uygulanmasının, iş güvenliği bakımından anlamlı faydalar sağlayacağını ortaya koymuşlardır.

Hasheminasab vd. (2019), metan gazının etkisi altında kalan yer altı kömür madeninin üretim yapılan ayak kesimindeki tali havalandırma sisteminin havalandırma performansını sayısal olarak analiz etmişlerdir. Tali havalandırma sistemi, hava perdesi (branda) ve bir fandan meydana gelmektedir. Ticari bir yazılım paketi olan ANSYS kullanılarak sağlaması yapılmış bir hesaplamalı model geliştirilmiş ve değerlendirme yapılırken kullanılmıştır. Sayısal modellemelerden; akış alanı, hava hızı ve metan konsantrasyonuna ilişkin detaylı bilgi elde etmişlerdir. Söz konusu çalışma ile üretim yapılan arından sabit metan salınımı varsayımı altında farklı havalandırma senaryolarını incelemişlerdir. Ortaya konulan sonuçlar, çeşitli hava akışı şartları ve tali havalandırma sistemi tasarımları altında metan dağılımını göstermişlerdir. Bununla birlikte kanal girişinin üretim yüzeyine olan uzaklığının, hava perdesi (brattice) konfigürasyonlarının ve hava hızının havalandırma performansı üzerindeki etkileri de ortaya koymuşlardır. Çalışma sonuçları metan patlama riski fazla olan, üretim yüzeyi gibi kör noktalar ve kirli hava alanlarından gaz ve kirleticilerin uzaklaştırılması amacıyla gerekli olan tali havalandırma sistemlerinin karakterlerini daha iyi idrak etmede önemli faydalar sağlamışlardır.

Chang vd. (2019), DPM kirliliğini en aza indirmek ve tali havalandırma sistemini iyileştirmek amacıyla Batı Avustralya'da bulunan bir yer altı madenindeki hazırlık galerisi fiziksel model olarak seçilmiş ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) metodu kullanılarak hava akımı karakteristikleri ile DPM konsantrasyon dağılımları değerlendirmişlerdir. Ayrı kanal uzunluklarına ait üç senaryoda toplanan DPM konsantrasyon dağılımları, Avustralya Endüstriyel Hijyenistler Derneği'nin (AIOH) belirlemiş olduğu DPM sınır değeri olan 0.1 mg/m^3 ile karşılaştırma yapmışlardır. Ortaya konulan sonuçlar, hali hazırdaki tali havalandırma sisteminin DPM konsantrasyonunu yeterli düzeyde indirgenmediğini; buna karşın, hali hazırdaki kanal uzunluğuna ilaveten 5 metre daha uzun bir kanal kullanıldığında DPM seyreltme performansının önemli ölçüde iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Dragoescu vd. (2025), tali havalandırma sistemlerinin detaylı olarak analizine yönelik yenilikçi bir metodolojik yaklaşım ile bu sistemlerin çalışma biçimlerinin iyileştirilmesi ve iş sağlığı ile güvenliği bakımından kararlı ve aktif bir rol oynamasını sağlamışlardır. Çalışmanın ana hedefi endüstriyel havalandırma sistemlerinin etkin çalışmasını sağlayacak tasarımların oluşturulmasıdır. Bununla birlikte, tek ya da çok

kanallı havalandırma kanallarına özgü optimum akış düzenlerinin, geometrik ve aerodinamik özelliklerin saptanması için gerekli matematiksel enstrümanların kullanılması ve fan-motor gruplarına özgü en uygun çalışma şartları ile geometrik şekil ve aerodinamik özellikler itibariyle ortaya konulmasını amaçlamışlardır. Bu amaçlar doğrultusunda tasarlanan bir örnek olay çalışması üzerinden değerlendirmeler yapmışlardır.

Obracaj vd. (2021), Sayısal analiz ile örtüşme bölgesi uzunluğunun metan dağılımı üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Detaylı bir biçimde Sayısal Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemiyle tasarlanan ve sağlaması yapılan model vasıtasıyla, metan gazının örtüşme bölgesindeki davranışını analiz etmişlerdir. Karşılaşılan araştırma sonuçları itibariyle toz bastırıcı çıkışından gelen hava akımının oluşturduğu etkinin, örtüşme bölgesi bitiminde metan birikimine sebebiyet verdiğini ifade etmişlerdir. Bahsi geçen durumun örtüşme uzunluğu arttıkça tehlikeli gaz konsantrasyonlarının yükselmesine neden olabileceğini göstermişlerdir. Çalışma ile varılan sonuçlar neticesinde, örtüşme bölgesinin 5-10 metre arasındaki bir uzunlukta tutulmasının metan gazının seyreltilmesi açısından önemli olduğu sonucuna varmışlardır.

Torno ve Toraño (2020), patlatma neticesinde ortaya çıkan kirleticilerin çalışma ortamından uzaklaştırılması sürecini daha doğru analiz edebilmek amacıyla deneysel verilere dayalı özgün matematiksel algoritmalar geliştirmişler ve bu algoritmalara galeri kesit alanı, patlayıcı miktarı, havalandırma kanalı ile kazı yüzü arasındaki mesafe ve tali havalandırma debisi gibi temel değişkenleri de ilave etmişlerdir. Farklı olasılıklara göre yeniden giriş sürelerinin önemli anlamda değiştiği gözlemlenmiş ve bazı modellerin 5 ila 32 dakika arasında sonuçlar verdiği neticesine varmışlardır. Bununla beraber tasarlanan algoritmalar ile gazların zamana bağlı dağılımını üç boyutlu olarak Sayısal Akışkanlar Dinamiği (CFD) modelleriyle desteklemişlerdir.

Qureshi vd. (2025), yer altı madenlerinde kullanılan çift kanallı zorlamalı tali havalandırma sistemlerinin tasarımını iyileştirilmesini hedeflemişlerdir. Çalışma kapsamında özellikle dizel ekipmanların yükleme (S1) ve boşaltma (S2) işlemleri sırasında oluşan partikül madde (PM) dağılımını irdelemişlerdir. Dört farklı havalandırma tasarımı (AVS 1-4), Ansys-Fluent ile sayısal olarak simüle etmişlerdir. Hava akış tasarımlarının PM taşınması üzerinde büyük etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. S2 senaryosu, operatörler

için daha yüksek risk oluşturduğunu ifade etmişlerdir. AVS 2 ve AVS 3 tasarımları daha basit hava akımı ve daha düşük PM yoğunluğu oluşturduğu kanısına varmışlardır. S1’de AVS 2 ve 3, PM yayılımını %15,66 ve %7,83 azaltmıştır. S2’de ise bu oranlar %27 ve %46 olmuştur. Araştırma neticesinde ortaya çıkan bulgular daha güvenli ve temiz bir maden ortamı için rehber niteliği taşıdığını belirtmişlerdir.

Xin vd. (2021), yer altı madenciliğinde sıklıkla kullanılan örtüşmeli tali havalandırma sistemlerinin (AVS) soğutma performansını araştırmışlardır. Özellikle uzak-itmeli/yakın-emişli (FFNE) ve yakın-itmeli/uzak-emişli (NFFE) olmak üzere iki farklı konfigürasyon, hem saha ölçümleri hem de sayısal simülasyonlarla incelemeler yapmışlardır. Hava hızı, sıcaklık, bağıl nem dağılımı ve ısı transferi karşılaştırmaları, NFFE sisteminin FFNE’ye göre üstün soğutma performansı sağladığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte termal konfor ve havalandırma verimliliği değerlendirme indeksleri kullanılarak farklı hava debisi oranları (Re/f) ve kanal konumlarının etkisi irdelemişlerdir. Sayısal simülasyonlar neticesinde, optimum Re/f oranı 1,5 olarak saptamışlardır. En uygun kanal konumlandırılması, üfleyici bitimindeki kazı cephesine 3 m, emici girişinin ise 12 m mesafeye konumlandırılmasıyla bulmuşlardır. NFFE sisteminin, sıcaklık kontrolü gibi ısı kaynaklı riskleri yönetmede daha etkili olduğu görmüşlerdir. Araştırmayla birlikte kör galerilerdeki havalandırma ve soğutma sistemlerinin tasarlanmasına önemli katkılar sunmuşlardır. Havalandırma sisteminin, hali hazırdaki tehlikelere karşı tasarlanması gerektiğini vurgulanmaktadır.

3. YERALTI MADENLERİNDE TALİ HAVALANDIRMA

Ana hava akımının doğrudan ilemediği, hava giriş ve çıkış yollarının bulunmadığı galeri sürme, kuyu açma ve bazı üretim yöntemlerinde arın ilerlemesi gibi çalışmalar, tali havalandırma kapsamına girer. Bu süreçlerde, çalışma alanına yeterli miktarda temiz hava ulaştırılması ve delme-patlatma işlemleri ile galeri açma makinelerinin çalışması sonucu oluşan toz ve zararlı gazların ortamdaki hızlı şekilde uzaklaştırılması, iş sağlığı ve güvenliği açısından büyük önem taşır (Önce ve Saraç, 1986).

Tali havalandırma sisteminin belirlenmesinde, çalışma süresince ortaya çıkabilecek yanıcı gazlar, toz konsantrasyonu, metan (grizu) varlığı ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin dikkate alınması gereklidir.

Tali havalandırma uygulanan bir galeride arınına yeterli miktarda hava iletilmediğinde, hem güvenlik hem de işletme maliyetleri açısından ciddi problemler ortaya çıkabilir. Havalandırma sistemlerinde meydana gelen sızıntıları dengeleyebilmek için daha yüksek debide ve basınçta hava gönderilmesi gerekebilir; ancak bu durum, hava kayıplarını artırarak çalışma ortamındaki hava kalitesini düşürebilir ve çalışanların performansını olumsuz yönde etkileyebilir (Auld, 2002). Bu nedenle, tali havalandırma sistemlerinin etkinliğini artırmak amacıyla, boru çapının büyütülmesi ve sızdırmazlık şartlarının iyileştirilmesi gibi önlemlerin alınması önerilmektedir (Auld, 2004).

Metan düzeyi düşük olan galerilerde, delme-patlatma ve galeri ilerletme çalışmalarında tali havalandırmanın temel amacı, bu işlemler sırasında oluşan gaz ve tozların etkin biçimde ortamdaki uzaklaştırılmasıdır (Çetin, 1995). Toz oluşumunu en aza indirmek için, delik delme işleminin su kullanılarak yapılması, deliklerin su ya da jel içerikli malzemelerle sıvanması ve patlatma sonrası oluşan pasa yüklemmeden önce sulanması önerilmektedir. Ayrıca, uygulanacak delme deseni ve her bir delik için kullanılacak patlayıcı miktarı, mümkün olan en düşük toz üretimini sağlayacak şekilde planlanmalıdır.

Patlatma sırasında oluşan tozun kontrol altına alınmasında, çok küçük boyutta su damlacıkları üreten püskürtücülerin galeri kesiti boyunca yerleştirilerek patlamadan hemen önce devreye alınması etkili bir yöntemdir. Benzer şekilde, galerinin kesitine konumlandırılan su perdeleriyle de toz oluşumu önemli ölçüde azaltılabilir. Patlatma sonrası ortaya çıkan pasa malzemesinin ıslatılarak yüklenmesi, özellikle büyük hacimli kazı alanlarında yeterli olmayabilir. Bu gibi durumlarda, yükleyici ekipmanların gövdesine monte edilen su püskürtme sistemleri, hem yükleme hem de nakliye sürecinde daha verimli bir toz bastırma sağlamaktadır (Şensöğüt, 1994).

Mekanize galeri açma makineleriyle yapılan çalışmalarda oluşan yoğun tozun kontrol altına alınabilmesi için, yalnızca su püskürtme sistemleri yeterli olmayabilir. Bu nedenle ilave toz bastırma yöntemlerinin de uygulanması gerekmektedir. Kesici başlık tarafından üretilen toz, döner parçaların oluşturduğu hava akımıyla çevreye yayılır. Bazı makinelerde, kesici başlıklara verilen suyun kendisi de hava hareketine katkı sağlayarak tozun dağılmasına neden olabilir. Su başlıklarının konumlarının uygun şekilde belirlenmemesi durumunda, toz bulutu arından makinelerin arka tarafına taşınabilir ve bu da operatörün yoğun toza maruz kalmasına yol açar. Bu sorunun giderilmesinde temel yaklaşım; tozun yüksek yoğunlukta olduğu bölgeleri sınırlı hacimlerde tutmak ve aynı zamanda zararlı gazların tehlikesiz seviyelere kadar seyrelmesini sağlayacak hava akışını oluşturmaktır (Şensöğüt, 1994).

Yeraltı kömür madenciliğinde grizu, özellikle uzun ve derin galerilerde ciddi bir tehlike kaynağıdır. Çalışma alanlarının daha derin seviyelere inmesi, metan gazının arın çevresinde birikme riskini arttırmaktadır. Modern madencilikte daha geniş galerilere duyulan ihtiyaç, yeterli hava sağlanamadığında metan konsantrasyonunun tehlikeli düzeylere ulaşmasına neden olabilir. Bu nedenle, havalandırmanın temel amacı yalnızca grizunun güvenli seviyelere kadar seyreltilmesini sağlamak değil, aynı zamanda tavan kısımlarında metan birikimini engellemektir. Madencilik faaliyetlerinin daha derin koddara inmesi, ana havalandırma kaynağından uzaklaşılması, hızlı galeri ilerlemeleri ve yüksek güçlü ekipmanların kullanımı ile birlikte, ısı birikimi de önemli bir sorun hâline gelmiştir. Bu yüksek performanslı sistemler, kullanılan enerjinin büyük bölümünü ısıya dönüştürmekte ve bu da yeraltında ciddi bir iklimlendirme ihtiyacı doğurmaktadır. Tüm bu ihtiyaçları karşılayacak şekilde tali havalandırma tasarımlarının planlanması gerekmektedir.

3.1. Tali Havalandırma Bileşenleri

Tali havalandırmada hava akışı; ana fanların oluşturduğu negatif basınç, tali fanların desteği ya da basınçlı hava enjektörlerinin kullanımıyla sağlanabilir. Üretilen bu havanın çalışma alanına iletimi ise; hava perdeleri, paralel galeriler veya boru sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilir (Önce ve Saraç, 1986). Özellikle uzun galeri ve tünel çalışmalarında, bir yada birden fazla tali fan yardımıyla oluşturulan basınç sayesinde hava, vantüp boyunca iletilerek yeterli havalandırma sağlanması en sık tercih edilen yöntemdir.

3.1.1. Tali havlandırma fanları

Fanlar, yer altı hava yollarında hava akışını sağlamak amacıyla giriş ve çıkış noktaları arasında basınç farkı oluşturan makinelerdir. Yeraltı operasyonlarında kullanılan tali havalandırma genellikle santrifüj ve aksiyal tip fanlarla gerçekleştirilir. Bu iki ana fan türü genellikle elektrikle çalışsa da, bazı özel durumlarda basınçlı hava, buhar veya dizel motorları ile çalışan modeller de kullanılabilir (Güyağüler, 1991).

Aksiyal fanlar, kompakt yapıları, taşınabilirlikleri ve montaj kolaylıkları nedeniyle tali havalandırma uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu fanlar, düşük kayıp oranları ve değişken çalışma koşullarına uyum sağlayabilme özellikleri sayesinde daha verimli bir kullanım sunar. Elektrik enerjisiyle çalıştıkları gibi, bazı durumlarda basınçlı hava ile de işletilebilmektedirler. Seri bağlantıya elverişli olmaları nedeniyle, uzun galerilerde hava taşıma hattındaki yüksek dirençlerin aşılmasında etkili bir çözüm sunarlar (Önce ve Saraç, 1986; Güyağüler, 1991). Gelişen teknoloji ile birlikte aksiyal fanlar önemli ölçüde geliştirilmiş ve yeraltı madenciliğinde daha yaygın hale gelmiştir.

Özellikle aynı tip ve boyuttaki ünitelerin kullanımı önerilmektedir. Hava kaçaklarının fazla olduğu veya galerilerin çok uzun olduğu durumlarda, fanların vantüp boyunca aralıklı yerleştirilmesi faydalıdır (Güyağüler, 1991).

3.1.2. Tali hava boruları

Galeri sürme çalışmalarında, fanlarla sağlanan havanın çalışma yüzeyine iletilmesi amacıyla genellikle ahşap, kumaş esaslı veya metal sacdan imal edilmiş hava boruları kullanılmaktadır. Ahşap borular, düşük akış direncine ve hafifliğe sahip olmaları ile öne çıkmakla birlikte, ek yerlerinden hava sızdırmaları ve yangınlık riskleri nedeniyle sınırlı bir kullanım alanına sahiptir. Kauçuk kaplı çadır bezi veya plastik malzemelerden üretilen ve “vantüp” olarak adlandırılan esnek borular ise, katlanabilir yapıları sayesinde kolay taşınabilir, kurulabilir ve dar alanlara uyum sağlayabilir özelliktedir. Ancak bu borular, yüksek sürtünme direnci ve delinmeye karşı hassasiyetleri nedeniyle çoğunlukla yalnızca üfleyici sistemlerde kullanılmaktadır.

Vantüplerin emici sistemlerde kullanılması gerektiğinde, yapısal dayanımı artırmak amacıyla dış yüzeylerine spiral formda çelik çemberler sarılmaktadır. Bu tür vantüpler, uzunlamasına katlanabilir özellikte olmalarına rağmen, ağır yapıları, yüksek maliyetleri ve hava akışına karşı gösterdikleri yüksek direnç nedeniyle sınırlı tercih edilmektedir (Önce ve Saraç, 1986; Güyagüler, 1991). Saç borular ise genellikle ana galeri açma işlemlerinde kullanılmakta olup, yüksek maliyetli ve ağır olmalarının yanı sıra asidik yer altı sularına karşı dayanıklılıkları düşüktür. Ancak, mekanik sağlamlıkları ve düşük hava direnci özellikleriyle de öne çıkmaktadırlar.

Hava borularının birbirine bağlantısı genellikle geçme sistem, manşon veya flanş kullanılarak sağlanmaktadır. Vantüp, tavan tahkimatına hafif zincir ya da tellerle sabitlenen askı çengelleri aracılığıyla asılır. Daha dayanıklı olan demir borular ise çoğunlukla zemin üzerine yerleştirilerek uzun süreli kullanım amaçlanır (Önce ve Saraç, 1986).

3.2. Tali Havalandırma Sistemleri

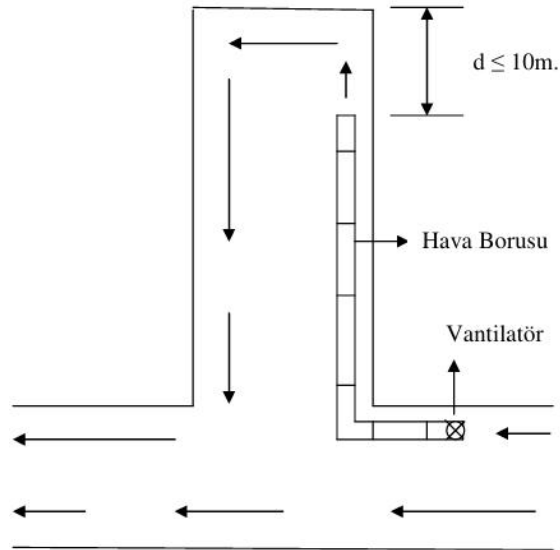
Tali havalandırma sistemleri temel olarak üfleyici ve emici prensiplere dayanmaktadır. Uygulamada karşılaşılan diğer havalandırma düzenlemeleri, bu iki temel yöntemin çeşitli biçimlerde uyarlanmasıyla geliştirilmiştir. Bu kapsamda tali havalandırma sistemleri; basit üfleyici veya emici sistemler, birden fazla fanın galeri dışında kullanılması, uzun galerilerde fanların belirli aralıklarla yerleştirilmesi gibi uygulamaları içermektedir.

Ayrıca, ana üfleyiciyle birlikte yardımcı bir emici sistemin veya ana emiciyle birlikte destekleyici bir üfleyici sistemin kullanılması da yaygın yöntemler arasında yer almaktadır (Vutukuri, 1986).

Etkili bir tali havalandırma sağlanabilmesi için fanların yerleştirilmesi ve kullanımı sırasında bazı teknik hususlara dikkat edilmelidir. Öncelikle, tali havalandırılacak galeri ile ana galeri arasında hava akımının kısa devre yapmasını engelleyecek önlemler alınmalıdır. Üfleyici fanların taze hava tarafında, emici fanlar ise dönüş havası tarafında konumlandırılmalı ve galeri ağzından en az 5 metre uzaklıkta olmalıdır (Önce ve Saraç, 1986). Ayrıca fanlar, ana galeride kullanılmış havanın yeniden sisteme girmesini önleyecek biçimde yerleştirilmelidir. Son olarak, tali havalandırma sistemi ile galeriye gönderilen hava miktarının, ana galeriden taşınan toplam hava debisinin üçte birini aşmaması gerekmektedir (Önce ve Saraç, 1986).

3.2.1. Basit üfleyici veya emici sistemler

Üfleyici havalandırma sisteminde, taze hava üfleyici bir fanlar yardımıyla hava boruları boyunca çalışma alanına iletilirken, kirli hava ise tüm galeri boyunca geri akışla dış ortama taşınır. Bu sistem Şekil 3.1' de verilmiştir.

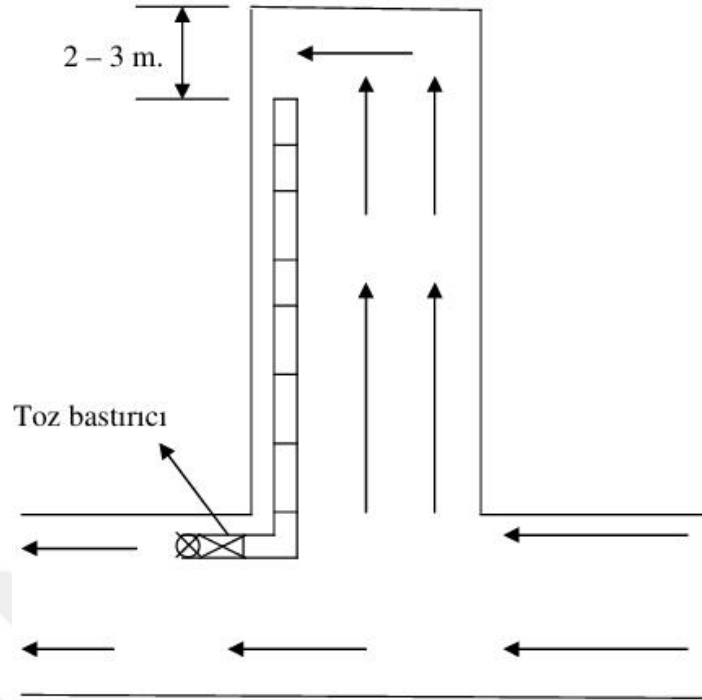


Şekil 3.1. Üfleyici havalandırma sistemi (Güyağüler, 1991).

Üfleyici havalandırma sisteminin en önemli avantajı, temiz havanın doğrudan çalışma alanına ulaştırılmasıdır. Hava borusundan çıkan akımın yüksek hızı, çalışma ortamındaki gazların hızlı şekilde seyreltilmesini ve gaz tabakalaşmasının engellenmesini sağlar. Bu sistemde, metan gazı çalışma alanından dış ortama doğru itildiği için, gazın tutuşma riski yüksek olan bölgelerde birikmesi önlenmiş olur. Ayrıca, arına ulaşan hava daha serin ve kuru olduğundan, çalışma ortamı sıcaklık ve nem açısından daha elverişli hale gelir. Özellikle uzun galerilerde bu durum, emici sistemlere kıyasla önemli bir avantaj sunar. Üfleyici sistem, formasyon kaynaklı zararlı gazların arına taşınmasını da engeller. Bunun yanı sıra, fanlar temiz hava akımı içerisinde çalışması, cihazın verimliliğini ve ömrünü artırır. Hafif, taşınabilir ve maliyeti düşük olan bez vantüplerin bu sistemde kullanılabilmesi de ekonomik ve pratik bir çözüm sunar.

Üfleyici havalandırma sisteminin bazı önemli sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu sistemde temiz hava yalnızca arına yönlendirildiğinden, arın gerisi ve galeri boyunca etkin bir havalandırma sağlanamamaktadır. Galeri içerisindeki hava hızının düşük olması, patlatma sonrası oluşan zararlı gazların ortamdan yeterince hızlı uzaklaştırılamamasına ve bu gazların galeri boyunca taşınmasına neden olmaktadır. Ayrıca, çalışma ortamında bulunan işçiler ve makine operatörleri, geri dönen kirli havadaki yüksek toz ve gaz konsantrasyonuna uzun süre maruz kalabilmektedir. Bu durum özellikle mekanize kazı yapılan galerilerde, toz yükünün fazla olması nedeniyle, üfleyici sistemin tek başına kullanılmasını sakıncalı hale getirir. Üstelik, galeriden dönen hava ana havalandırma sistemine karışarak diğer üretim bölgelerinin hava kalitesini de olumsuz etkileyebilir. Arındaki yüksek hava hızı ise tozun yeniden havalanmasına yol açarak işçi sağlığını tehdit edebilir. Buna rağmen, toz seviyesinin düşük olduğu alanlarda, serin ve kuru hava sağlaması nedeniyle tercih edilebilir; ancak tozun yoğun olduğu ortamlarda ek toz bastırma ekipmanlarıyla birlikte kullanılması gerekir.

Emici havalandırma sisteminde, hava çalışma alanından hava boruları aracılığıyla emilerek dış ortama taşınır. Bu işlem sırasında sistemde oluşan düşük basınç nedeniyle temiz hava, galeri boyunca ilerleyerek arına ulaşır. Bu yöntem, hava akışının doğal olarak kirli alandan temiz alana yönlendirilmesini sağlar. Bu sistem Şekil 3.2’de yer almaktadır.

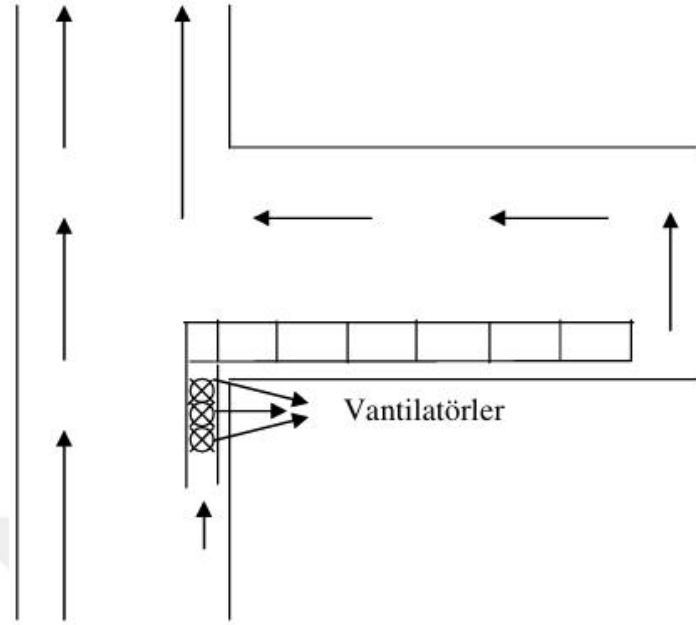


Şekil 3.2. Emici havalandırma sistemi (Güyağüler, 1991).

Emici havalandırma sistemleri, çalışma alanındaki toz ve gazların hızlı şekilde ortamdaki uzaklaştırılmasını sağlayarak, arın gerisi ve galeri içindeki hava kalitesinin korunmasına katkı sunar. Atım işlemi sonrası oluşan zararlı gazların vakit kaybetmeden emilmesi, çalışma ortamında daha sağlıklı ve güvenli bir hava sirkülasyonu sağlar (Güyağüler, 1991).

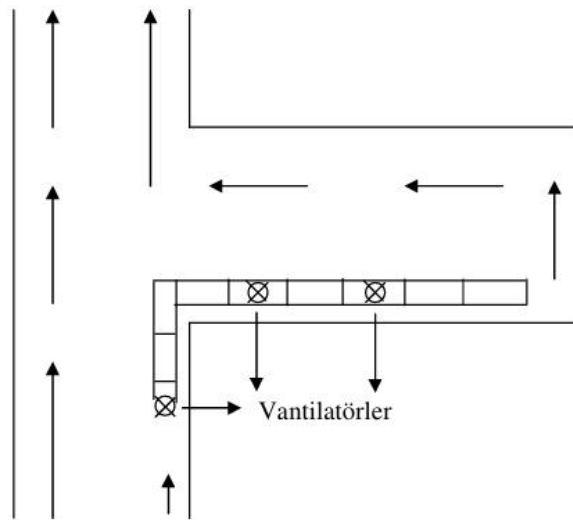
Ancak bu sistemin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Emici sistemlerin etkin çalışabilmesi için kullanılan boruların, fanın oluşturduğu yüksek emiş kuvvetine dayanıklı olması gerekir. Bu nedenle genellikle çelik ya da spiral destekli vantüpler tercih edilmektedir. Fakat bu tür malzemelerin yer altı koşullarında taşınması ve kurulumu, özellikle hızlı ilerleyen galerilerde ciddi zorluklar yaratmakta ve sistemin esnekliğini azaltmaktadır (Vutukuri, 1986).

Galeri dışı çoklu fanlı havalandırma sistemi, tali galerilerin dışında konumlandırılmış birden fazla fan birlikte çalıştırılmaktadır. Fanlar genellikle seri bağlantı şeklinde düzenlenir ve sistem, hem emici hem de üfleyici havalandırma prensibine göre işletilebilmektedir. Bu yöntem, uzun ve dirençli hava yollarında etkili hava akımı sağlamak amacıyla tercih edilmektedir. Bu sistem Şekil 3.3'te yer almaktadır.



Şekil 3.3. Galeri dışı çoklu fanlı havalandırma (Vutukuri, 1986).

Galeri içerisinde aralıklı fan düzeni, tali havalandırma sistemi; galeri içerisinde fanların belirli aralıklarla ve seri bağlantılı şekilde yerleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Fanların bu düzenlemesi, hava akımının uzun mesafelerde etkin bir şekilde iletilmesini amaçlar. Sistem, ihtiyaca göre üfleyci ya da emici havalandırma şeklinde kullanılabilir. Bu düzen Şekil 3.4'te yer almaktadır.



Şekil 3.4. Galeri içerisinde aralıklı fanların düzeni (Vutukuri, 1986).

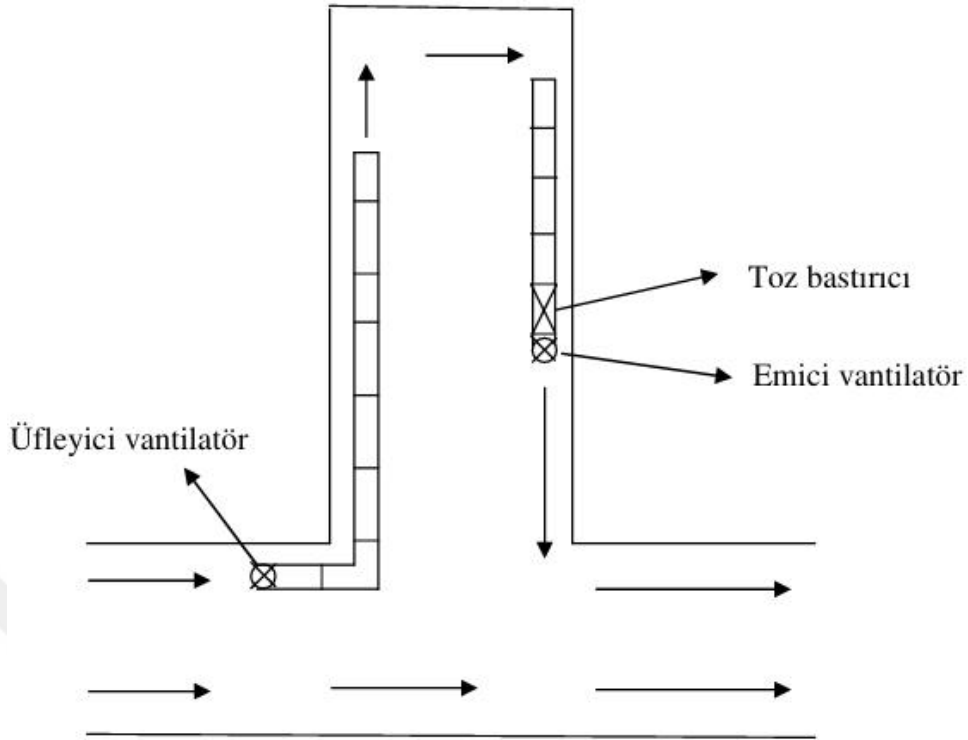
3.2.2. Birleşik havalandırma sistemleri

Bileşik havalandırma sistemleri, üfleyici ve emici yöntemlerin avantajlarını bir araya getirerek daha etkili bir hava kontrolü sağlamayı amaçlamaktadır. Üfleyici fanlar, ortamdaki zararlı gazların seyreltmesini sağlarken; emici fanlar, özellikle yüksek toz yoğunluğunun olduğu ortamlarda hava kalitesini iyileştirmede etkilidir. Bu sayede, çalışma ortamında hem gaz hem de toz konsantrasyonları kontrol altında tutulabilir.

Bileşik havalandırma sistemlerinde biri “ana fan”, diğeri ise “yardımcı fan” olarak adlandırılan iki ayrı fan, iki farklı hava borusu hattına bağlı şekilde çalıştırılmaktadır. Bu sistemde, her iki fanın aynı enerji kaynağından beslenmesi ve karşılıklı olarak senkronize çalışması esastır. Böylece, ana fanda meydana gelebilecek bir arıza durumunda, yardımcı fanın da otomatik olarak durması sağlanarak sistem güvenliği artırılmış olur (Önce ve Saraç, 1986).

Ana üfleyici – yardımcı emici sistem, bilhassa galeri açma makinesinin çalıştığı ortamlarda tercih edilen bir tali havalandırma yöntemidir. Bu sistem, çalışma ortamına temiz hava sağlamanın yanı sıra, makinenin oluşturduğu ısıyı tahliye etmek ve yüksek seviyelerde oluşabilecek toz konsantrasyonunu azaltmak amacıyla kullanılır (Güyağüler, 1991).

Bu yöntem, ateşlemeli çalışmaların yapılmadığı, dolayısıyla patlayıcı gazların söz konusu olmadığı durumlarda etkili bir çözüm sunar. Üfleyici fan aracılığıyla temiz hava doğrudan arına ulaştırılırken, yardımcı emici fan ise bir toz filtresiyle birlikte çalışarak ortam havasındaki toz miktarını kontrol altında tutar (Vutukuri, 1986).Yöntem Şekil 3.5’te yer almaktadır.



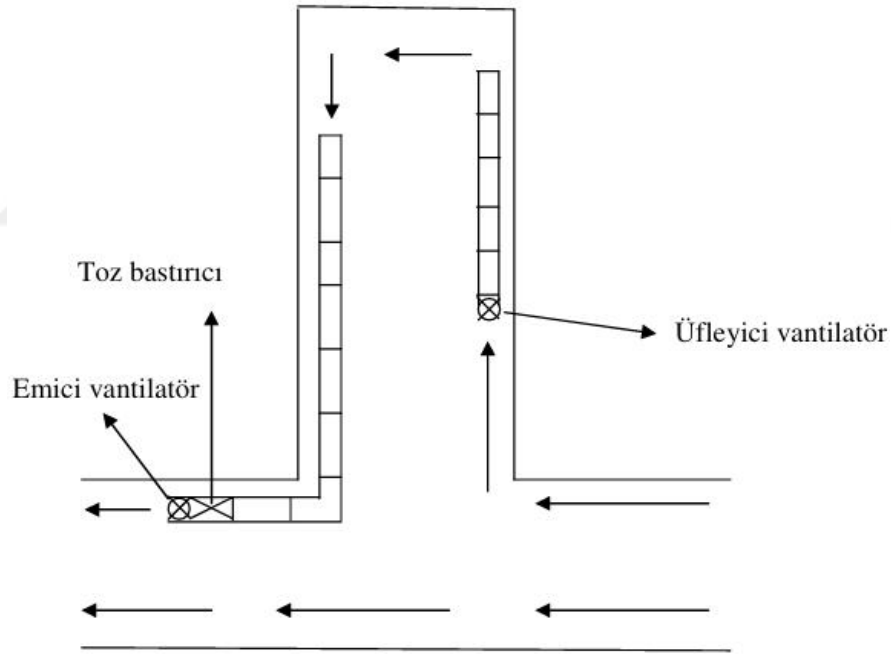
Şekil 3.5. Ana üfleyici – yardımcı emici sistem.

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, ana üfleyici-yardımcı emici sistemler galerinin iki ayrı tarafına yerleştirilerek çalıştırılır. Üfleyici sistem genellikle operatörün bulunduğu tarafa konumlandırılırken, toz bastırıcı işlevi gören emici sistem karşı tarafa yerleştirilir. Bu düzenleme sayesinde, arında etkili bir hava süpürme hareketi sağlanır ve oluşan toz, çalışma yönüne doğru sürüklenerek uzaklaştırılır. Üfleyici sistemin arına olan mesafesi kritik öneme sahiptir; hava çıkışının arına çok yakın olması hâlinde, geri tepen tozun operatörün bulunduğu bölgeye ulaşması ve çalışma koşullarını olumsuz etkilemesi mümkündür. Bu nedenle, üfleyici uygun bir mesafede yerleştirilmelidir. Aynı şekilde, tozun yayılmadan ortamdan uzaklaştırılabilmesi için emici fana bağlı vantüp ucu, galeri arınının yaklaşık 2–3 metre gerisinde konumlandırılmalıdır (Çetin, 1995).

Hızlı ilerleyen bacalarda, yardımcı fanın, vantüp hattının ve toz bastırıcı sistemlerin düzenli olarak ilerletilmesi operasyonel açıdan önemli zorluklar yaratmaktadır. Bu sorunun çözümü olarak, havalandırma sistemi doğrudan galeri açma makinesine entegre edilerek makine ile birlikte hareket etmesi sağlanabilir. Bu yaklaşımla, özellikle emici vantüp hattının galeride geride kalması sorunu ortadan kaldırılmış olur. Ayrıca vantüp doğrudan kesici kafaya entegre edildiğinde, toz oluşumunun başladığı noktada etkili bir şekilde

müdahale edilerek tozun ortamda yayılmadan kontrol altına alınması mümkün hale gelir. Bu yöntem, özellikle mekanize kazı yapılan ortamlarda tozla mücadelede etkinliği artırmaktadır.

Ana emici-yardımcı üfleyici sistemde, delme-patlatma yöntemiyle ilerletilen galerilerde, patlatma sonrası oluşan zararlı gazların ortamdaki hızlı şekilde uzaklaştırılması amacıyla emici havalandırma sistemi tercih edilmektedir. Ancak metan birikiminin risk oluşturduğu durumlarda, ilave olarak bir üfleyici fan sistemi devreye alınmaktadır. Bu sistem düzeninde, emici sistem ana havalandırma görevini üstlenirken, yardımcı üfleyici sistem arın çevresindeki temiz havanın emici hatta yönlendirilmesine destek olur. Böylece hem gazların etkin biçimde tahliyesi sağlanmakta hem de arında metan birikiminin önüne geçilmektedir. Sistemin genel yerleşimi Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Ana emici – yardımcı üfleyici sistem.

Birleşik havalandırma sistemlerinin en önemli dezavantajı, üfleyici ve emici vantüplerin birlikte bulunduğu bölgede hava miktarının azalmasına bağlı olarak hava hızında düşüş yaşanmasıdır. Bu durum, söz konusu bölgede metan gazının tabakalaşmasına neden olabilmektedir. Bu riski en aza indirmek amacıyla, yardımcı fanın taşıdığı hava debisi, sistemde mevcut bulunan toplam hava miktarının %50’sini aşmamalıdır (Vutukuri, 1986).

4. YÖNTEM VE TEORİK BİLGİ

Tali havalandırma sistemleri, giriş veya dönüş havasının vantüpler aracılığıyla taşınması esasına dayanır. Ancak bu vantüpler, yapılarındaki çok sayıda bağlantı noktası ve malzeme özellikleri nedeniyle belirli oranda hava kaçağına neden olmaktadır. Bu kaçakların, hattın içinden dışarıya ya da dış ortamdan içeriye doğru olması mümkündür ve bunların tamamen engellenmesi pratik koşullarda mümkün değildir (Vutukuri, 1984). Bu nedenle, etkin bir tali havalandırma sistemi tasarlanabilmesi için, hava taşıma süreci detaylı bir şekilde analiz edilmeli ve oluşabilecek hava kaçakları mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

4.1. Vantüpte Hava Akışına Etki Eden Faktörler

Kaçaksız bir vantüp üzerinden taşınan hava debisi, Atkinson eşitliği yardımıyla hesaplanabilir (Vutukuri, 1983). Bu yöntemle göre, vantüp boyunca meydana gelen basınç kaybı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$p = \frac{k \times C \times L \times Q^2}{A^3} \quad 4.1$$

$$Q = \sqrt{\frac{p \times A^3}{k \times C \times L}} \quad 4.2$$

Bu eşitlikte, hattaki basınç düşüşü (p), hava akışına karşı oluşan dirençle ilişkilidir ve hat boyunca enerji kaybını temsil eder. Elde edilen formülden hava debisi (Q) çekildiğinde, bu debinin hattın kesit alanı (A), çevresi (C), uzunluğu (L) ve sürtünme katsayısı (k) gibi parametrelere bağlı olduğu görülür.

Söz konusu eşitliklerde; Q hava debisini (m^3/s), p basınç düşüşünü (Pa), A hattın kesit alanını (m^2), k sürtünme katsayısını (Ns^2/m^4), L vantüp uzunluğunu (m) ve C hattın çevresini (m) ifade etmektedir.

Belirli bir vantüp uzunluğu için, $(k \times L \times C) / A^3$ ifadesi sabit kabul edilir ve bu sabit, genellikle R sembolü ile gösterilen vantüp direnç katsayısı olarak tanımlanır. Bu katsayının birimi Ns^2/m^8 olup, sistemdeki direnç hesaplamalarında temel bir parametre olarak kullanılır. Bu tanımlamaya göre, aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$R = \frac{k \times L \times C}{A^3} \quad 4.3$$

Böylece, hava debisinin hesaplanmasına yönelik denklem daha sade bir biçime dönüştürülerek aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Q = \sqrt{\frac{\bar{p}}{R}} \quad 4.4$$

Kaçaklı havalandırma hatlarında, yalnızca basınç değişimi değil, aynı zamanda kaçak noktalarından dolayı hat boyunca taşınan hava miktarında da değişiklik meydana gelir. Bu durum, hesaplamaların basit ve tek aşamalı olmasını engellediğinden, sistemin analizinde hem vantüpün direnç katsayısı hem de kaçak yollarının direnç katsayısı ayrı ayrı dikkate alınmalıdır (Browning, 1983).

Vantüp sürtünme katsayısı, belirli bir uzunluktaki hat içerisinde belirli bir hava debisiyle meydana gelen basınç kaybını tanımlamak için kullanılır. Uygulamada bu katsayı, $1 \text{ m}^3/\text{s}$ hava debisinin 100 metre uzunluğundaki bir vantüpte 1 Pa 'lık basınç düşüşü oluşturması durumu esas alınarak tanımlanır. Direnç katsayısının birimi $\text{Ns}^2/\text{m}^8/100 \text{ m}$ şeklindedir (Browning, 1983).

Kaçak yollarının direnç katsayısı, tesisin kalitesini gösteren bir ölçüttür (Vutukuri, 1984). Kaçak katsayısı, belirli bir vantüp uzunluğunda, belirli bir basınç farkı etkisiyle kaçan hava miktarını ifade eder. Genellikle, 1 kPa basınç farkı altında, 100 metre uzunluğundaki bir borudan kaçan hava debisi (m^3/s) olarak ifade edilir (Browning, 1983; Vutukuri, 1983).

Bir vantüpe giren hava miktarı ile hattın çıkışında ölçülen hava miktarı karşılaştırılarak, fan basıncıyla birlikte kaçak katsayısı hesaplanabilir. Bu katsayı, hattaki hava kaçaklarını gösterir ve hattın uzunluğu ile uygulanan basınç değerine bağlıdır. Böylece, belli özelliklerdeki bir vantüpte ve fan sisteminde oluşabilecek hava kaçakları önceden tahmin edilebilir.

100 metre uzunluğundaki vantüp için kaçak yollarının direnç katsayısı Ns^2/m^8 birimiyle ifade edilirse, bu katsayı ile kaçak katsayısı arasındaki ilişki Çizelge 4.1'de detaylandırılmıştır (Vutukuri, 1983).

$$\text{Direnç Katsayısı} = \frac{1000}{\text{Kaçak Katsayısı}^2} \quad 4.5$$

Çizelge 4.1. Kaçak katsayısı ve kaçak yolu direnç katsayısı (Vutukuri, 1983).

Kaçak katsayısı $m^3/s/100m$ 1 Kpa'da	Kaçak yolları direnç katsayısı/100 m Ns^2/m^8
0,158	40000
0,316	10000
0,474	4444
0,632	2500

Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere, kaçak yollarının direnç katsayısı, boru çapının karesine bağlı olarak ters orantılı bir değişim gösterir. Kaçak yollarının direnç katsayısı, hattın çapı (R) ile ters orantılıdır. Aşağıda verilen ifadelerde, farklı tesis kalitelerine göre bu katsayılar; $40000/R^2$ ile "iyi", $10000/R^2$ ile "orta", $4444/R^2$ ile "zayıf" ve $2500/R^2$ ile "kötü" olarak nitelendirilmektedir. Farklı çaplara ve tesis kalitelerine göre, vantüp sürtünme katsayısı ile kaçak yollarının direnç katsayısı değerleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur (Vutukuri, 1983).

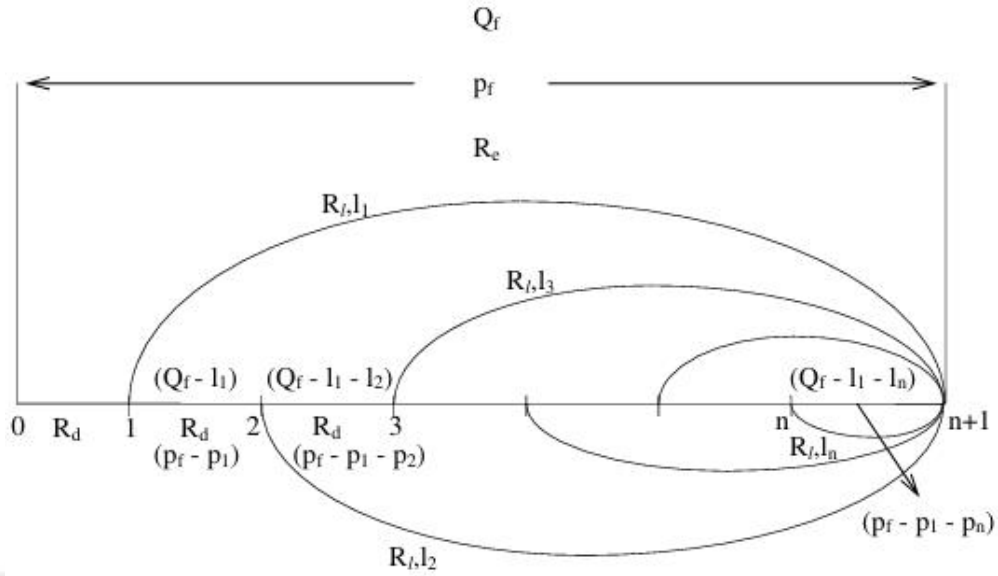
Çizelge 4.2. Vantüp karakteristikleri (Vutukuri, 1983).

Çap (mm)	Tesis Kalitesi	Sürtünme Katsayısı Ns^2/m^4	Kaçak Yolların Direnç Katsayısı/100m Ns^2/m^8
480	İyi	0.0038	173600
	Orta	0.0038	43400
	Zayıf	0.0038	19300
	Kötü	0.0038	10900
610	İyi	0.0038	107500
	Orta	0.0038	26900
	Zayıf	0.0038	11900
	Kötü	0.0038	6700
760	İyi	0.0038	69300
	Orta	0.0038	17300
	Zayıf	0.0038	7700
	Kötü	0.0038	4300

4.2. Kaçaklı Vantüplerde Hava Akışının İncelenmesi

Uygulamada, tüm hava taşıyan vantüpler belirli oranlarda hava kaçağına neden olmaktadır ve bu kaçak noktaları birer ikincil hava yolu olarak değerlendirilebilir. Hat uzunluğu arttıkça kaçak miktarı da artmakta, bu durum ise arına ulaşan hava miktarının azalmasına yol açmaktadır. Bir başka ifadeyle, hattın sonunda sağlanan hava miktarı, hat boyunca meydana gelen toplam hava kaçağına bağlıdır. Bu nedenle, arına gönderilecek hava debisinin belirlenmesinde sadece fanın kapasitesi değil, aynı zamanda vantüpün yapısal özellikleri de belirleyici olmaktadır.

Kaçaklı borularda hava akışının analizine yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, vantüpteki kaçak yolları, seri-paralel bağlı devre modeliyle ele alınmış ve bu yaklaşım Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmiştir (Vutukuri, 1983).



Şekil 4.1. Vantüpteki seri – paralel bağlantılar (Vutukuri, 1983).

Bu sistemde kullanılan terimler şu şekilde açıklanabilir: Fanın kullandığı hava debisi Q_f ile fanın oluşturduğu basınç ise p_f ile gösterilir. Vantüpün eşdeğer direnç katsayısı R_e olarak tanımlanırken, birim uzunluk başına düşen vantüp sürtünme katsayısı R_d , kaçak yollarının direnç katsayısı ise R_i ile ifade edilir. Vantüp üzerindeki birim uzunluk başına oluşan kaçak miktarları l_1, l_2 gibi sembollerle gösterilirken, bu noktalarda meydana gelen basınç kayıpları p_1, p_2 gibi işaretlenir. Toplam kaçak yolu sayısı n olup, vantüp boyunca bulunan kaçak noktaları ise 1'den n 'ye kadar numaralandırılır.

Hava, vantüpe 0 noktasından girerken, $(n + 1)$ noktasında hat boyunca ilerleyip çıkar. Boru üzerindeki 1, 2, ..., n numaralı eklem noktalarında ise kaçaklar oluşur. Eklem türüne bağlı olarak kaçak yolları belirli bir direnç gösterir ve bu değer kaçak yollarının direnç katsayısı olarak adlandırılır. Eğer eklem aralıklarının eşit olduğu varsayılırsa, vantüpün tüm kısımlarının direnç katsayıları aynı (R_d) kabul edilir. Benzer şekilde, tüm eklemlerin yapısı benzer sayılırsa, kaçak yollarının direnç katsayıları da (R_i) birbirine eşittir. Bu varsayımlar altında hesaplamalar yapılmakta olup, işlem öncelikle sistemin eşdeğer direncinin belirlenmesiyle başlar ve ilk parça için eşdeğer direnç hesaplanarak devam eder (Vutukuri, 1984).

$$\frac{1}{\sqrt{R_{n-(n+1)}}} = \frac{1}{\sqrt{R_d}} + \frac{1}{\sqrt{R_l}} \quad 4.6$$

$$R_{n-(n+1)} = \frac{R_d \times R_l}{(\sqrt{R_d} + \sqrt{R_l})^2} \quad 4.7$$

$$\frac{1}{\sqrt{R_{(n-1)-n}}} = \frac{1}{\sqrt{R_d + \frac{R_d \times R_l}{(\sqrt{R_d} + \sqrt{R_l})^2}}} + \frac{1}{\sqrt{R_l}} \quad 4.8$$

Eşitlik kullanılarak, sistemin eşdeğer direnci adım adım hesaplanabilir. Bu süreçte aynı hesaplama yöntemi ardışık olarak uygulanarak, vantüpün başlangıcından sonuna kadar olan eşdeğer direnç ($R_{0-(n+1)}$) bulunur. Fan basıncı (p_f) bilindiğinde ise, sistemin eşdeğer direnci kullanılarak hatta giren hava miktarı (Q_{0-1}) aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$Q_{0-1} = \sqrt{\frac{p_f}{R_{0-(n+1)}}} \quad 4.9$$

Eğer fan vantüpün 0 noktasına yerleştirilmişse, hattın karakteristik eğrisi fanın p-Q karakteristik eğrisi ile aynı koordinat sisteminde gösterilir. Bu iki eğrinin kesişim noktası, fanın çalışma şartlarını belirler ve bu noktadan Q_{0-1} ile p_f değerleri elde edilir. Bu sonuç, matematiksel hesaplamalarla da doğrulanabilir. Hesaplanan Q_{0-1} hava debisi, 1 numaralı kavşakta iki kola ayrılır: Q_{1-2} ve $Q_{1-(n+1)}$.

$$Q_{0-1} = Q_{1-(n+1)} + Q_{1-2} \quad 4.10$$

1-2-3.....(n+1) kolu ile 1-(n+1) kolu paralel bağlıdır ve bu ilişki 4.11 numaralı eşitlik ile ifade edilir. Bu eşitliklerden yararlanılarak, birinci eklem noktasından kaçan hava miktarı 4.12 numaralı eşitlik ile, 1-2 kolundan geçen hava ise 4.13 numaralı eşitlik ile hesaplanabilir. Aynı yöntem kullanılarak, diğer eklem noktalarındaki hava kaçakları ve hatta devam eden hava miktarları (Q_{2-3} , $Q_{2-(n+1)}$, Q_{3-4} , $Q_{3-(n+1)}$... $Q_{n-(n+1)}$) de belirlenebilir.

$$R_1 \times Q_{1-(n+1)}^2 = R_{1-(n+1)} \times Q_{1-2}^2 \quad 4.11$$

$$Q_{1-(n+1)} = \frac{Q_{0-1} \times \sqrt{\frac{R_{1-(n+1)}}{R_1}}}{\left[1 + \sqrt{\frac{R_{1-(n+1)}}{R_1}} \right]} \quad 4.12$$

$$Q_{1-2} = \frac{Q_{0-1} \times \sqrt{\frac{R_1}{R_{1-(n+1)}}}}{\left[1 + \sqrt{\frac{R_1}{R_{1-(n+1)}}} \right]} \quad 4.13$$

4.3. Uzun Yeraltı Galerilerinde Tali Havalandırma Tasarım Kriterleri

Günümüzde madencilik sektöründe, galeri açma makinelerinin yaygın kullanımı sayesinde açılan galeri ve taban yollarının uzunlukları artmaktadır. Uzun galerilerin tali havalandırma sistemlerinin tasarımında üç farklı yöntem uygulanabilir. Birincisi, tek bir fan kullanarak havalandırma yapılmasıdır. İkincisi, birden fazla fanın galeri başlangıcına birlikte monte edilerek havalandırma sağlanmasıdır. Üçüncü yöntem ise, birden çok fanın galeri hattı boyunca belirli aralıklarla yerleştirilerek havalandırmanın gerçekleştirilmesidir. Yeraltı ortamında fanların boyutlarının sınırlı olması ve ekonomik faktörler nedeniyle, özellikle uzun galerilerde çoklu fanların kullanımı daha çok tercih edilmektedir.

Uzun galerilerin havalandırılmasında, galeri arının ilerlemesiyle birlikte vantüp de arına doğru uzatılır. Ancak vantüpün direncinin ve kaçaklarının artması nedeniyle arına ulaşan hava miktarı giderek azalır. Arına ulaşan hava, kabul edilebilir minimum seviyeye düştüğünde hatta ikinci bir fan eklenir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir konu vardır: İkinci fanın, birincisinin hemen yanına mı yoksa vantüp üzerinde birinciden belirli bir uzaklığa mı yerleştirilmesi gerektiğidir.

Eğer ikinci fan, birincisinin hemen yanına yani galerinin başlangıcına yerleştirilirse, bu durum yüksek basınç oluşumuna yol açar ve bu da kaçak miktarını artırarak sistemin verimliliğini düşürür. Bu yüzden, genellikle ikinci fan birinciden belirli bir mesafede konumlandırılır. Böylelikle vantüp boyunca aralıklı olarak birden fazla fan kullanılarak daha etkin bir havalandırma sağlanır (Vutukuri, 1984; Calizaya ve Jones, 1993).

Bu uygulamada en büyük problem, ikinci fanın konumunun doğru belirlenmesidir. Eğer ikinci fan vantüp üzerinde rastgele bir yere yerleştirilirse, kontrol dışı kısa devreler oluşabilir ve bu durum, fanların yan yana yerleştirildiği duruma kıyasla daha olumsuz sonuçlar doğurabilir (Vutukuri, 1984). Buradaki temel gereklilik, çevre havası ile vantüpteki hava akımı arasında kısa devre oluşmamasıdır (Vutukuri, 1983).

Çok uzun vantüplerde birden fazla fan kullanmak gerekebilir. Bu durumda, aralıklarla seri bağlı çoklu fanların her biri, kendisi ile bir sonraki fan arasındaki vantüp bölümünün direncini aşacak güçte olmalı ve hava akışını sağlayabilmelidir. Sabit uzunluktaki bir hatta bu soruna iki şekilde yaklaşılabilir: Birincisi, mevcut fanların karakteristikleri göz önünde bulundurularak en uygun yerlerin belirlenmesi; ikincisi ise, fan yerleri önceden belirlenip, bu yerlere uygun karakteristiklere sahip fanların seçilmesidir.

Bir tali havalandırma sisteminin tasarımında öncelikle hattın maksimum uzunluğu bilinmelidir. Ayrıca, arında gerekli olan hava miktarının belirlenmesi önem taşır. Son olarak, vantüp çapı, sürtünme faktörü ve kaçak yollarının direnç katsayısı gibi hat karakteristiklerinin detaylı olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Bu üç temel veri sağlandıktan sonra, sistem için gerekli hesaplamalar yapılabilir.

Hesaplamalar, belirli uzunlukların katları için deneme-yanılma yöntemiyle yapılır ve arına gereken hava debisinin altında kalan debi elde edilen ilk hat uzunluğu (L_1) bulunana kadar devam ettirilir. Bu aşamada, L_1 uzunluğundaki vantüpün eşdeğer direnci, fanın sağladığı debi ve arına ulaşan hava miktarı belirlenir. Ardından, bulunan bu değerler kullanılarak, L_1 uzunluğundaki hattın son noktasına arının ihtiyacı olan debiyi sağlayabilmek için fanın kullanması gereken hava debisi hesaplanır. Ancak, çoğu durumda bu debi fan kapasitesini aşar. Bu yüzden, hattın direncini azaltmak amacıyla hattın uzunluğunu kısaltmak gerekir. Bu durumda, hattın uzunluğundan çıkarılması gereken mesafe aşağıdaki şekilde hesaplanır.

Fanın karakteristik eğrisi $P_f = aQ_f^2 + bQ_f + c$ şeklinde ikinci dereceden bir polinomla ifade edilirken, hattın karakteristik eğrisi ise $p=R_e \times Q_f^2$ formülüyle gösterilir.

Hat direncine, tasarım parametresi olarak kabul edilen yapay bir direnç olan R_a eklenerek analizler gerçekleştirilir. Fanın yeterli performans gösterebileceği maksimum hat uzunluğu, R_a 'nın sıfıra eşit olduğu noktada belirlenir (Calizaya ve Jones, 1993). Bu durumda, hattın eşdeğer direnci R_e , sabit bir hava debisini korumak için eklenen yapay direnç R_a ve fanın kullandığı hava debisi Q_f arasındaki ilişki belirtilen eşitlik ile ifade edilir.

$$(R_e + R_a) \times Q_f^2 = aQ_f^2 + bQ_f + c \quad 4.14$$

Elde edilen R_a değerinin negatif çıkması, vantüpün direncinin yüksek olduğunu ve arına ulaşan hava debisinin gereken değerin altında kaldığını göstermektedir; bu durumda hattın uzunluğunun kısaltılması gerekmektedir (Calizaya ve Jones, 1993). R_a değeri, Atkinson eşitliğine uygulanarak, hattın ne kadarının kısaltılması gerektiği hesaplanır.

$$R_a = \frac{k \times L \times C}{A^3} \quad 4.15$$

$$L = \frac{R_a \times A^3}{k \times C} \quad 4.16$$

Birinci aşamada belirlenen L_1 uzunluğu uygulandığında, arına ulaşan debi gerekli değerin altında kalmaktadır. Bu nedenle hesaplamalarda R_a değeri negatif çıkmakta ve

Atkinson eşitliğine göre hesaplanan L uzunluğu da negatif olmaktadır. Bu durum, L₁ uzunluğundan L değerinin çıkarılmasıyla, arında gereken debiye ulaşabilmek için birinci fanın havalandırabileceği maksimum hattın belirlenmesini sağlamaktadır. Uygun uzunluk belirlendikten sonra, fanın çalışma koşulları saptanır. Daha sonra, debi artış oranı (VIR) ve basınç artış oranı (PIR) olarak tanımlanan tasarım parametreleri hesaplanır (Vutukuri, 1983). VIR ve PIR değerleri hesaplandıktan sonra vantüp etkinliği bulunur (Vutukuri, 1983).

$$VIR = \frac{\text{Vantilatörün kullandığı debi}}{\text{Arına ulaşan debi}} \quad 4.17$$

$$PIR = \frac{\text{Kaçaklı koşullarda vantilatör çalışma basıncı}}{\text{Kaçaksız koşullarda vantilatör çalışma basıncı}} \quad 4.18$$

$$\text{Vantüp etkinliği} = \frac{1}{VIR \times PIR} \quad 4.19$$

Hattın uzunluğunun artması durumunda, ikinci bir fanın gerekliliği ortaya çıkarsa, bu fanın konumlandırılmasında temel kriter, birinci fanın arına ulaştırdığı debiyi ikinci fanın sağlamasıdır. Böylece, arına ulaşması gereken toplam debi, arındaki gerekli debi ile birinci fanın kullandığı debinin toplamı olarak yeniden belirlenir ve buna göre hesaplamalar tekrarlanır. Bu işlemler, hattın son noktasına ulaşılan kadar ardışık şekilde devam eder. Sonuç olarak, vantüp boyunca kullanılacak fanların sayısı, yerleşimleri ve çalışma koşulları belirlenmiş olur.

Fanların yerleri önceden biliniyorsa, hesaplamalar daha sade hale gelir. Bu durumda fan sayısı kesin olduğundan, hesaplamalar şu şekilde ilerler: Öncelikle birinci fan, arına gereken debiyi sağlayacak şekilde seçilir; ardından ikinci fan, birinci fanın sağladığı debiyi karşılayacak biçimde belirlenir; ve aynı yöntemle hattın sonuna kadar fan seçimi gerçekleştirilir.

5. TALİ HAVALANDIRMA TASARIMI VE SİMÜLASYONU YAZILIMI

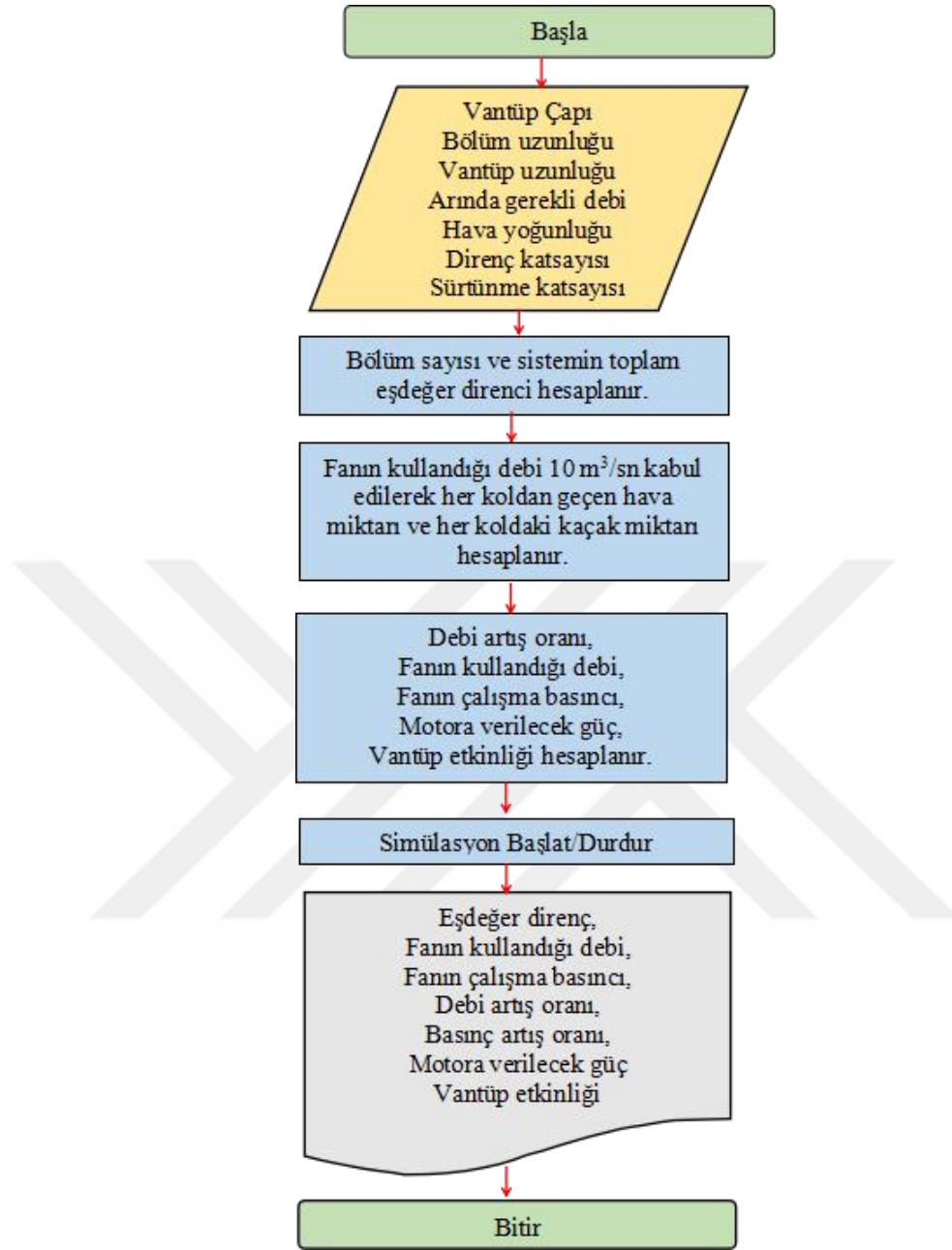
Bu tez çalışması kapsamında, tali havalandırma sistemlerinin seri-paralel bağlı devreler yöntemi ile hesaplanması ve bu hesaplamaların simülasyon ortamına aktarılması amacıyla bir yazılım geliştirilmiştir. Program, C# dili kullanılarak Visual Studio 2012 platformunda kodlanmış ve görsel modelleme için Devdept 3D kütüphanesinin deneme sürümünden faydalanılmıştır. Geliştirilen yazılımın test ve doğrulama süreçlerinde, gerçekçi senaryolar üzerinden değerlendirme yapılabilmesi amacıyla saha verileri kullanılmıştır. Bu veriler, "Bilgisayar Destekli Tali Havalandırma Tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinden alınmıştır (Önder, 1996). Söz konusu tezde yer alan vantüp uzunluğu, vantüp çapı, sürtünme katsayısı, direnç katsayısı, bölüm uzunluğu, arında gerekli debi, fan sayısı ve fan karakteristik eğrileri gibi parametreler, yazılımın girdileri olarak kullanılmış ve geliştirilen algoritmaların uygulanabilirliği bu veriler ışığında test edilmiştir. Böylece yazılımın hem akademik hem de pratik anlamda geçerliliği desteklenmiştir. "DuctFlow" ismi verilen yazılımın arayüzü İngilizce olarak hazırlanmıştır. Uygulama, dört temel modülden oluşacak şekilde yapılandırılmıştır.

5.1. Yazılımın Algoritmaları

Birinci modül, tek bir fan seçimini gerçekleştirmektedir. İkinci modül, uzun mesafeli galerilerde birden fazla fanın kullanılmasına yönelik seçim işlemlerini yapmaktadır. Üçüncü modül, tek bir fanın etkili olabileceği maksimum mesafenin hesaplanmasını sağlamaktadır. Dördüncü modül ise, belirli bir mesafe için kullanılacak fanın çalışma koşullarının belirlenmesini amaçlamaktadır. Çalışmanın devam eden bölümlerinde, bu modüller isimleri yerine sırasıyla 1., 2., 3. ve 4. modül olarak anılacaktır.

5.1.1. Birinci modülün algoritması

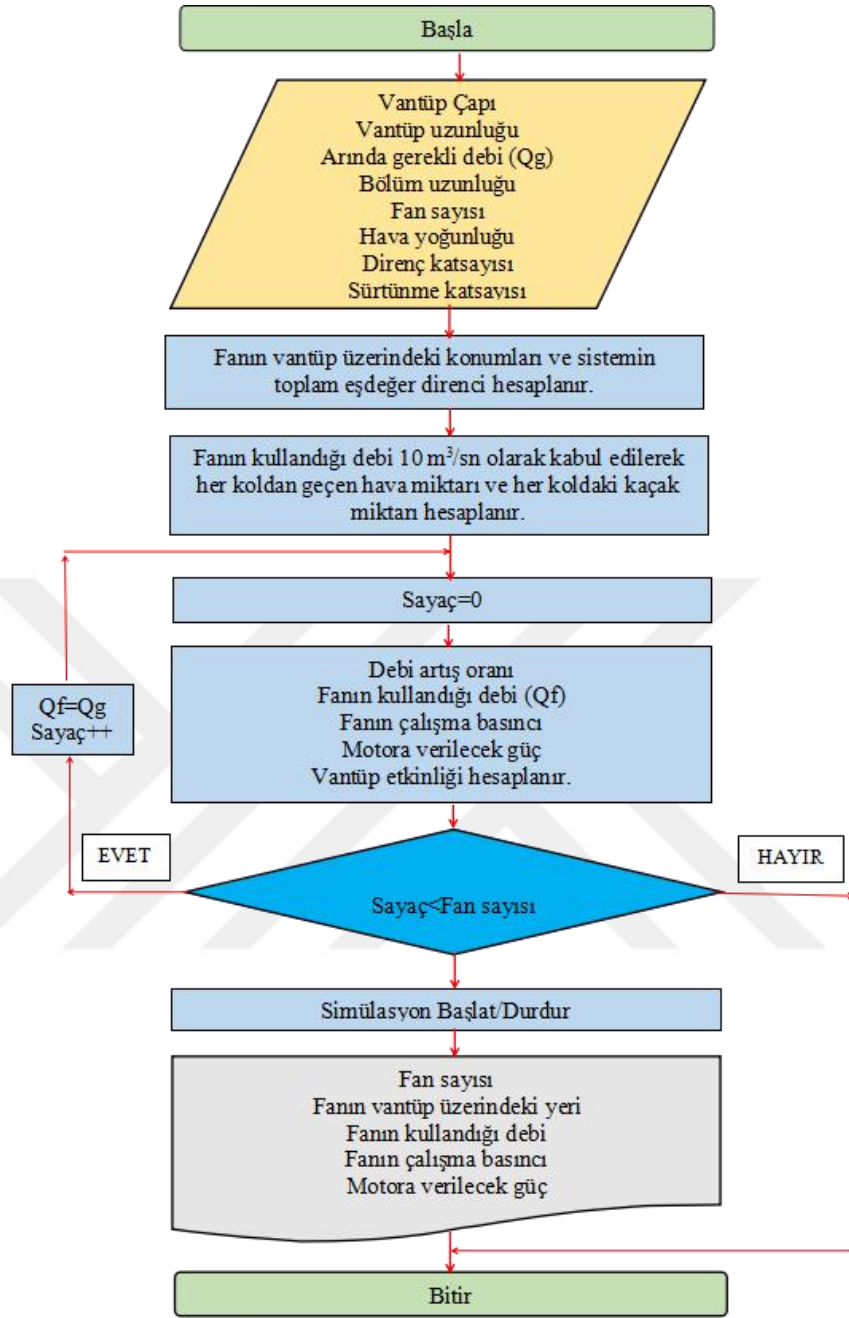
Bu modül, tek bir fanın yeterli olduğu senaryolarda uygulanır. Amaç, belirli bir hattın havalandırma ihtiyacını karşılayacak debi ve basınç değerlerini hesaplamaktır. Şekil 5.1'de birinci modüle ait algoritma verilmiştir.



Şekil 5.1. Birinci modülün algoritması

5.1.2. İkinci modülün algoritması

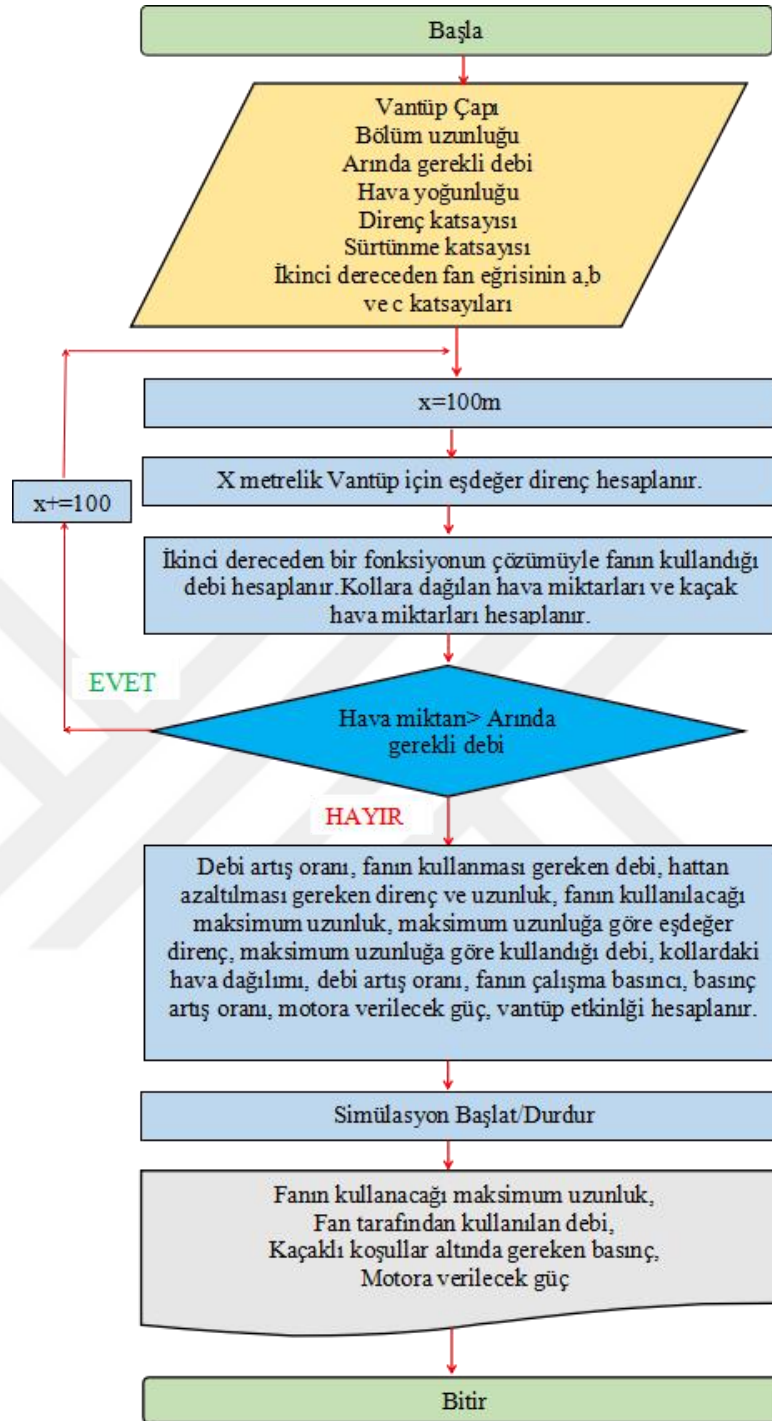
Uzun galerilerin birden fazla fan ile havalandırılması durumunda kullanılan çoklu fan seçimi modülü, bu tür uygulamalara özel olarak geliştirilmiştir. Bu modülde, birinci modülde girilen verilere ek olarak kullanılacak fan sayısı da kullanıcı tarafından belirtilir. Sistem, her bir fanın sağlaması gereken debi ve basınç değerlerini hesaplar. Hesaplama için Şekil 5.2'deki algoritma takip edilir.



Şekil 5.2. İkinci modülün algoritması

5.1.3. Üçüncü modülün algoritması

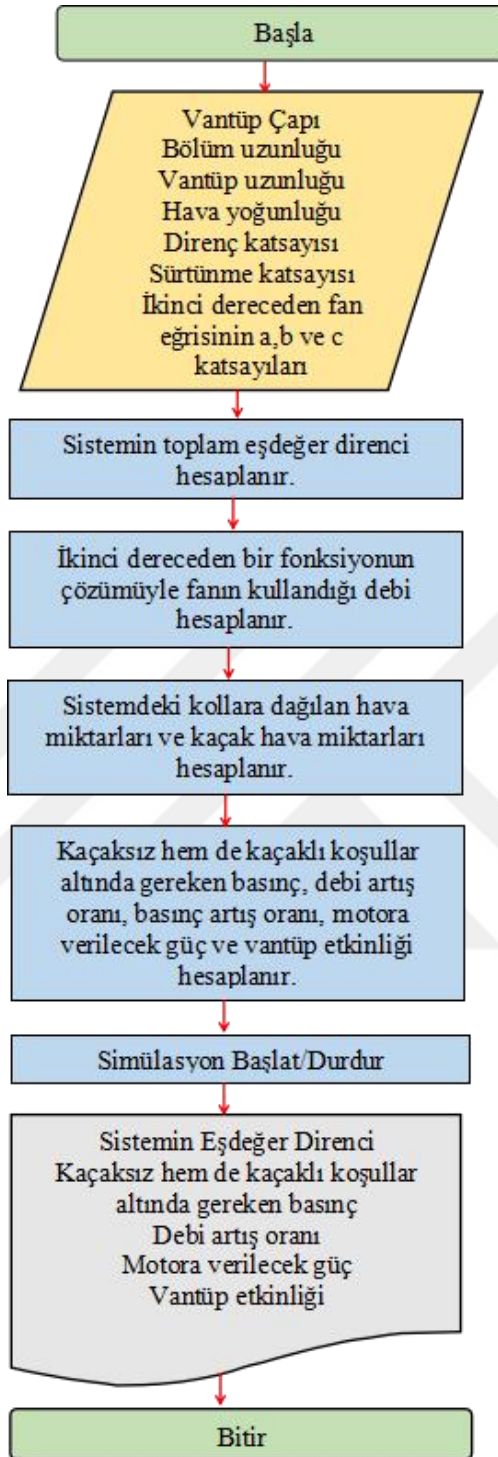
Bu modül, çalışma koşulları bilinen bir fan belirli bir vantüp kullanılması durumunda, gerekli hava debisini sağlayabileceği en uzun hat mesafesini hesaplamak için tasarlanmıştır. Hesaplama için Şekil 5.3'deki algoritma takip edilir.



Şekil 5.3. Üçüncü modülün algoritması

5.1.4. Dördüncü modülün algoritması

Bu modülde, uzunluğu, çapı ve diğer özellikleri bilinen bir vantüpe, çalışma koşulları belirlenmiş bir fan bağlandığında, arına iletilebilecek hava miktarı hesaplanır. Hesaplama için Şekil 5.4'teki algoritma takip edilir.

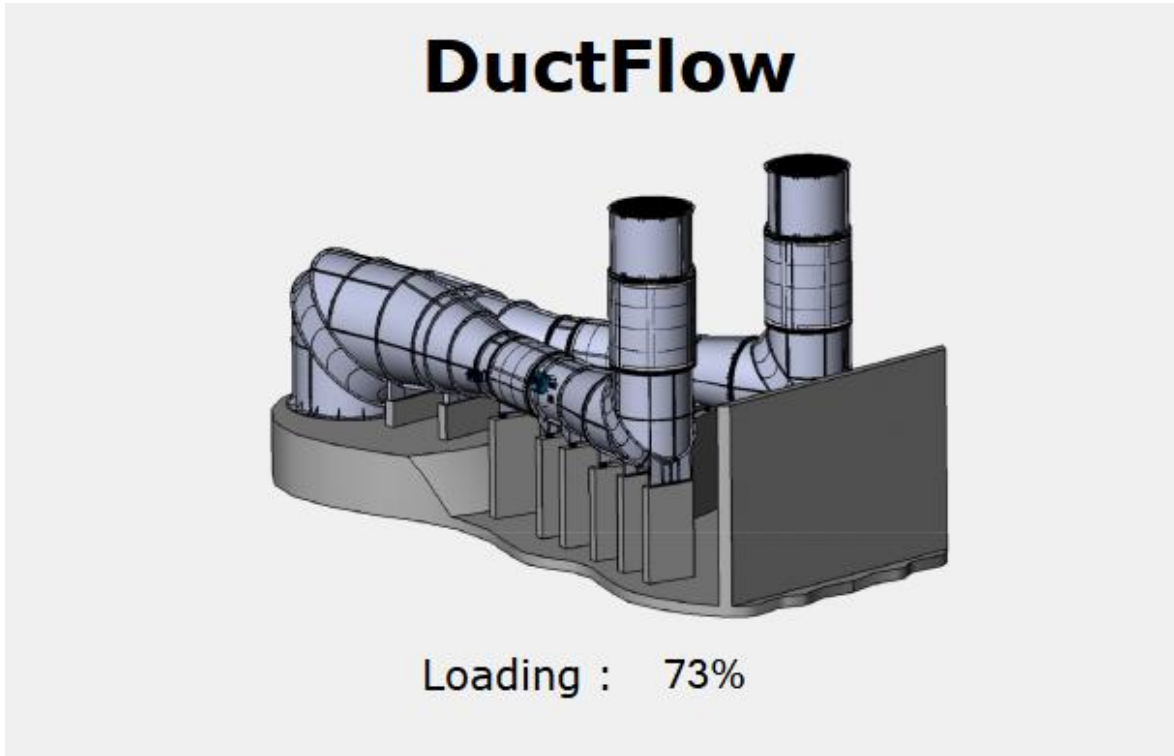


Şekil 5.4. Dördüncü modülün algoritması

5.2. Yazılımın Tanıtımı ve Kullanımı

Bu bölümde, geliştirilen bilgisayar programının İngilizce ara yüzü ve modüller tanıtılmaktadır. Kullanıcının programı nasıl kullanacağı ve modüllerin görevleri adım adım

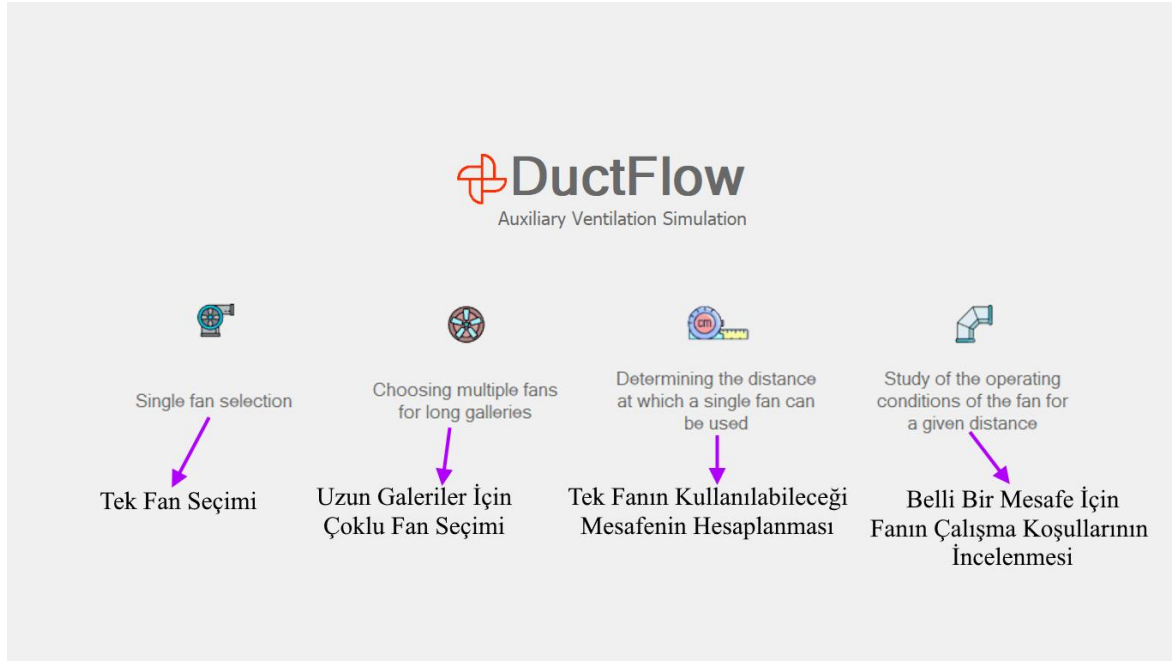
anlatılmıştır. İlk olarak programın masaüstü ikonuna tıkladığında Şekil 5.5'deki açılış ekranı gelir ve ana menü ekranına geçiş yapılır. Tanıtım sürecinde, açıklanan adımların anlaşılabilirliğini artırmak amacıyla örnek verilerle uygulamalı denemeler yapılmıştır.



Şekil 5.5. Açılış ekranı

5.2.1. Ana form ekranı

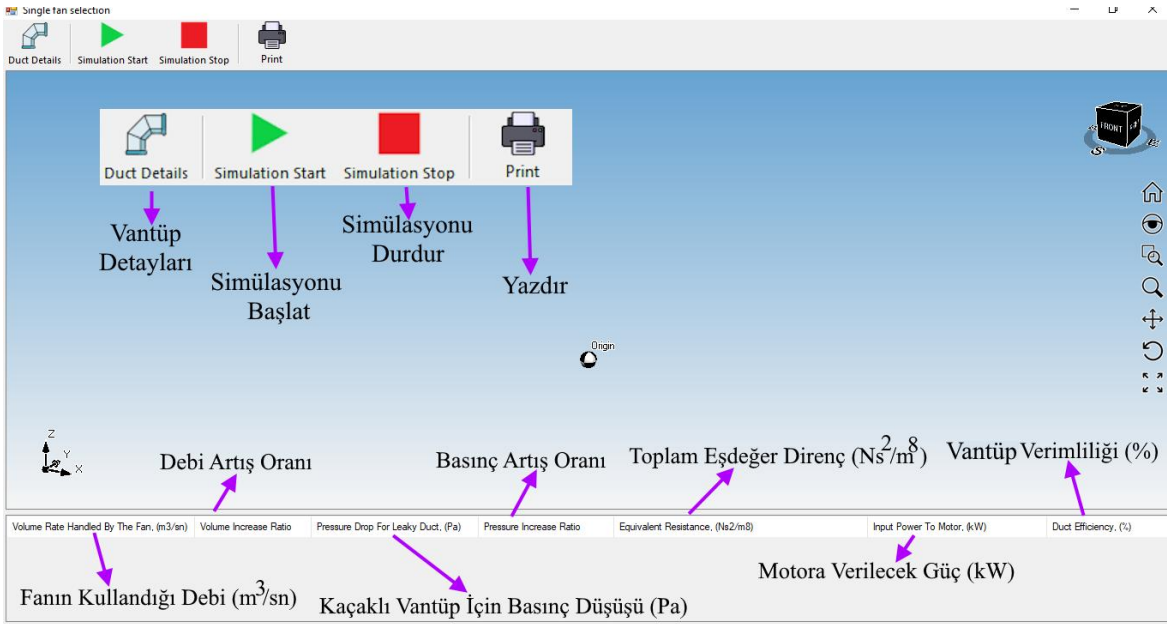
Ana form ekranı, kullanıcının program açılışında karşılaşacağı ilk ekrandır. Bu ekranda yazılım için geliştirilen modüller sırasıyla görüntülenmektedir. Bu formda ilgili butona tıklanarak istenilen modüllere geçiş yapılmaktadır. Şekil 5.6'da ana form ekranı görüntülenmektedir.



Şekil 5.6. Ana form ekranı

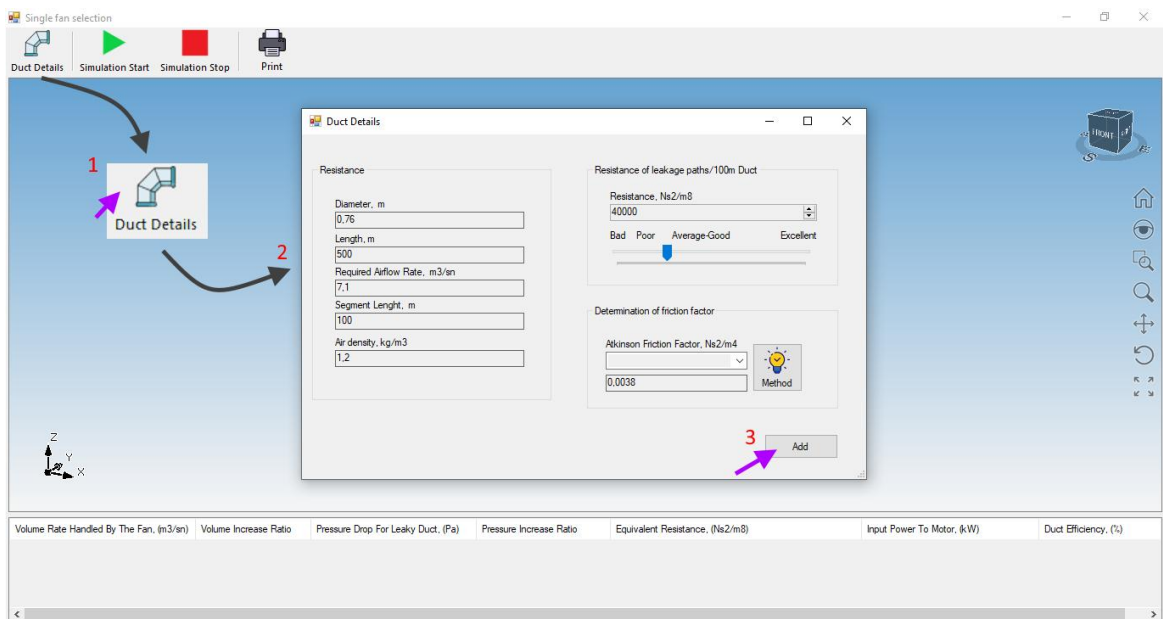
5.2.2. Birinci modül ekranı

Bu modülde, ekranının üst bölümündeki araçlar şeridinde “Vantüp Detayları”, “Simülasyonu Başlat”, “Simülasyonu Durdur” ve “Yazdır” butonları bulunmaktadır. Alt bölümde tasarımın sonuçlarının görüntülediği liste yer almaktadır. Sol alt köşede koordinat sistem aracı, sağ üst köşede 3D görüntüleme küpü ve sağ yan bölümde araç çubuğu yer almaktadır. Şekil 5.7’de birinci modül ekranı verilmiştir.



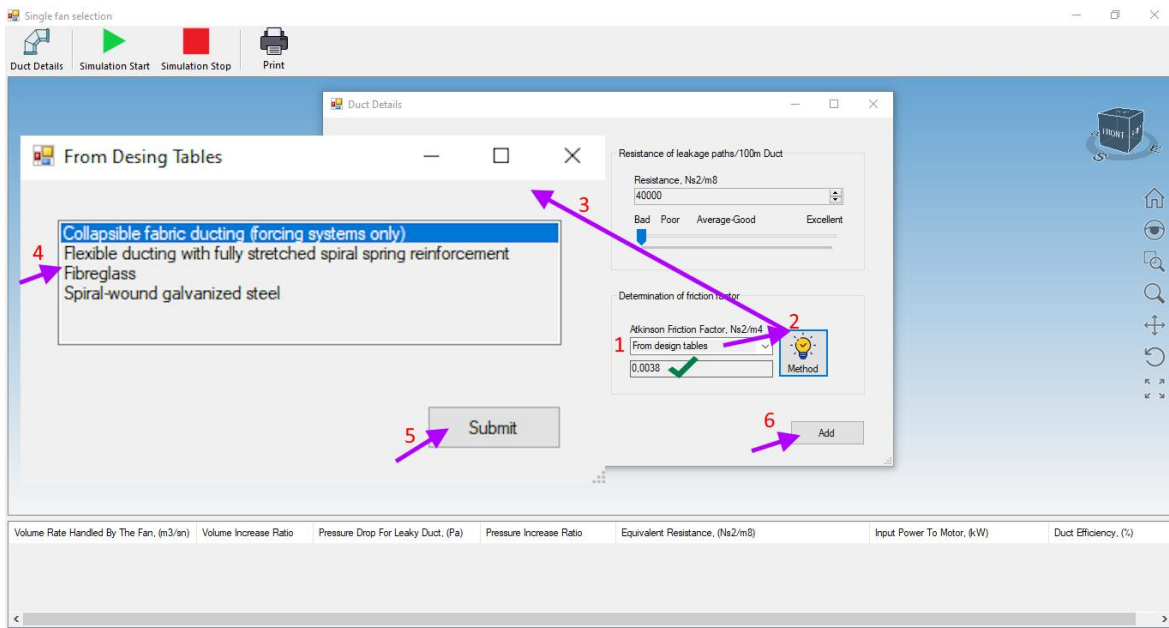
Şekil 5.7. Birinci modül ekranı

Şekil 5.8’de numaralandırılan adımlar takip edilir. İlk olarak vantüp detayları butonuna tıklanarak formda sırasıyla vantüp çapı, vantüp uzunluğu, arında gerekli debi, bölüm uzunluğu, tesis kalitesine göre kötü ve mükemmel arasında bir seçim yapılarak kaçak yollarının direnç katsayısı belirlenir. Direnç katsayısının ve sürtünme katsayısının değeri biliniyorsa elle girilip ekle butonuna tıklanır. Sürtünme katsayısının değeri bilinmiyorsa iki farklı yöntemden biri seçilerek “metot” butonu tıklanır.



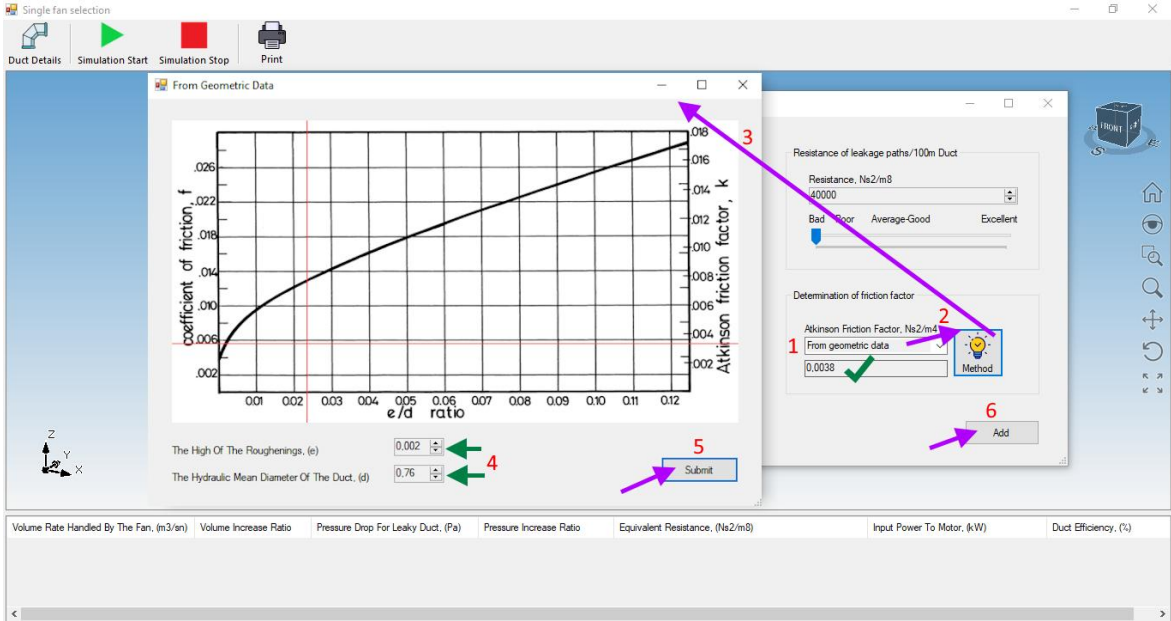
Şekil 5.8. Birinci modül vantüp detayları ekranı

İlk seçenek seçildiğinde Şekil 5.9'daki dizayn tablosu ekranı açılır ve numaralandırılan adımlar izlenir. Açılan dizayn tablosu ekranından katlanabilir kumaş, esnek kanal, fibreglas, spiral sarıli galvaniz çelik gibi seçeneklerden oluşturulan tasarıma uygun bir seçim yapılır ve gönder butonuna tıklanarak vantüp detayları formunda yer alan sürtünme katsayısı değerine otomatik olarak atanır ve dizayn tablosu ekranı kapatılır. Dizayn tablosu ekranı üzerinden sürtünme katsayısının belirlenmesi, tüm modüllerde ortak bir yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin çeşitli modüllerde tekrar edilmesi söz konusu olmakla birlikte, işlem yalnızca bir kez ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



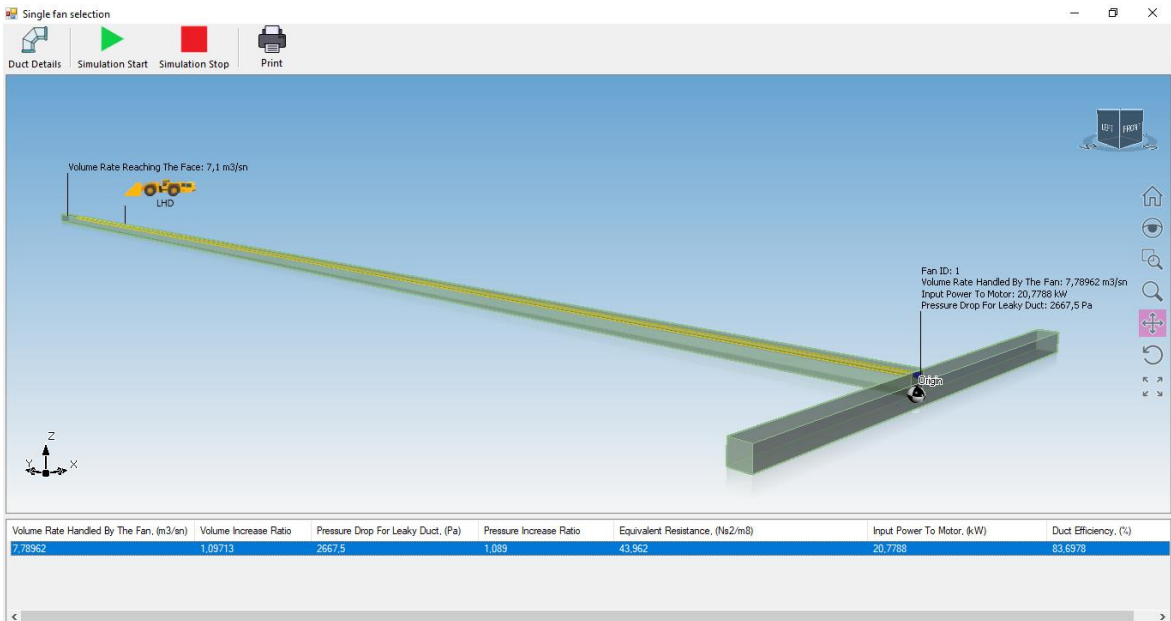
Şekil 5.9. Birinci modül dizayn tablosu ekranı

İkinci seçenek seçilip metot butonuna tıkladığında Şekil 5.10'daki geometrik verilerden formu açılır ve numaralandırılan adımlar izlenir. Açılan geometrik verilerden form ekranındaki tablodan belirlenir ya da tablonun altında yer alan değerler manuel olarak girilerek gönder butonuna tıklanır ve vantüp detayları formunda yer alan sürtünme katsayısı değerine otomatik olarak atanır ve geometrik verilerden ekranı kapatılır. Vantüp detayları ekranına dönüş yapılır. Vantüp detayları ekranındaki ekle butonuna basılarak form kapatılır ve birinci modül ekranına dönüş yapılır. Geometrik verilerden ekranı üzerinden sürtünme katsayısının belirlenmesi, tüm modüllerde ortak bir yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin çeşitli modüllerde tekrar edilmesi söz konusu olmakla birlikte, işlem yalnızca bir kez ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



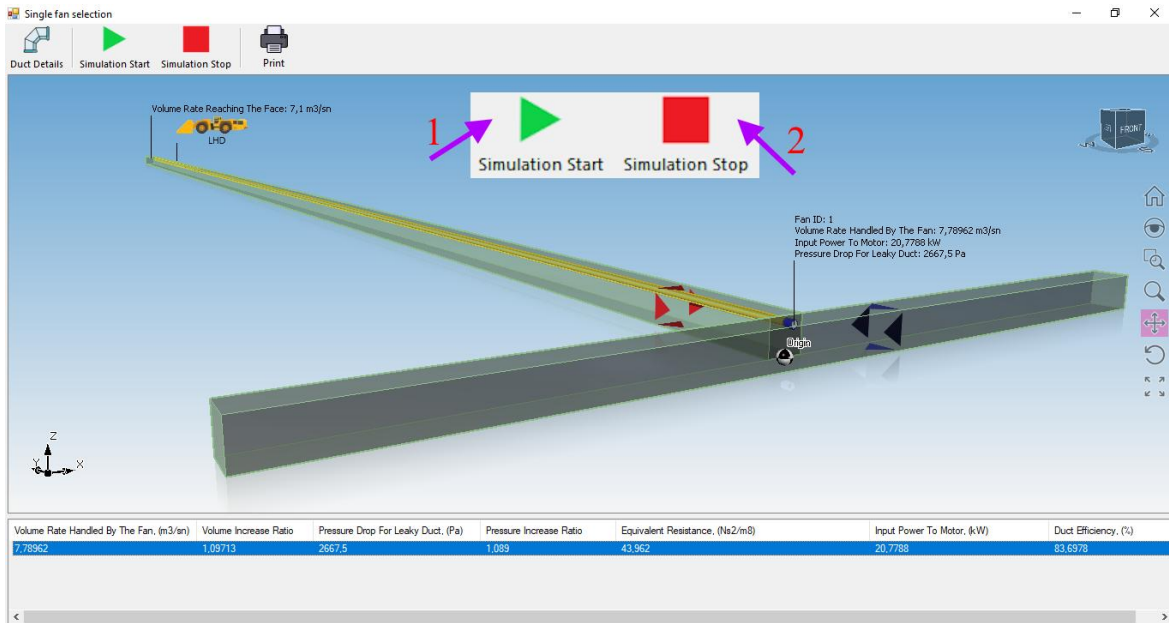
Şekil 5.10. Birinci modül geometrik verilerden ekranı

Şekil 5.11'de 3D tasarım ekranında kör baca, vantüp, fan, yükleyici ve çalışma alanı görüntülenir. Formun altında yer alan tasarım sonuçları listesinde arında fanın kullandığı debi, debi artış oranı, kaçaklı vantüp için basınç düşüşü, basınç artış oranı, toplam eşdeğer direnç, motora verilecek güç, vantüp verimliliği listelenir.



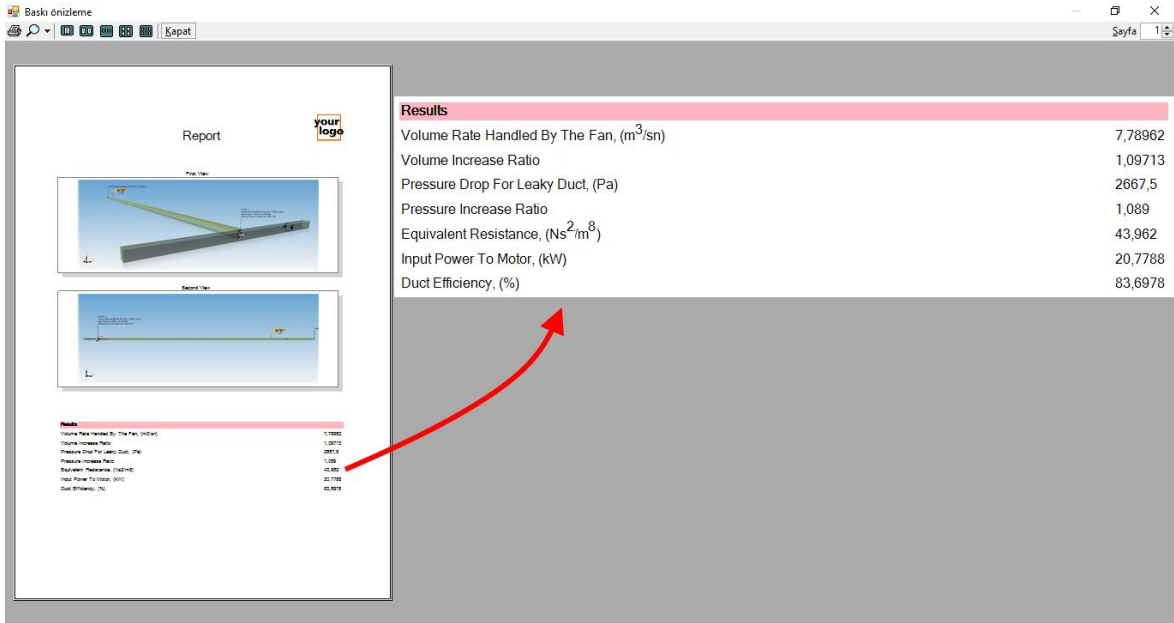
Şekil 5.11. Birinci modül 3D ortamı

Oluşturulan 3D tasarımdan sonra formun üstünde araçlar şeridinde yer alan ve numaralandırılan simülasyonu başlat butonuna tıklanır. Simülasyonda temiz hava girişini temsil eden mavi oklar hareket ederken, kör bacadan kirli havanın atıldığını temsil eden kırmızı oklar çalışma alanından baca girişine doğru hareket ederek çıkış yapar. Fanın hava gönderdiğini temsil eden fan pervaneleri dönüş yapar. Tasarlanan simülasyon ortamı Şekil 5.12’de verilmiştir. Daha sonra numaralandırılan simülasyonu durdur butonu ile simülasyon sonlandırılır.



Şekil 5.12. Birinci modül simülasyon ortamı

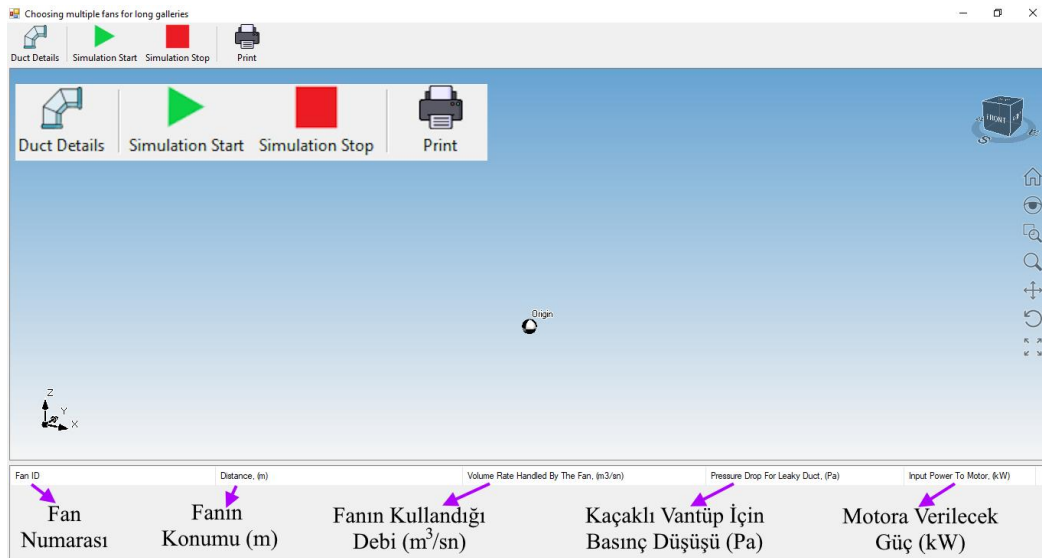
Simülasyon durdurulduktan sonra yine ekranın üst kısmında bulunan araçlar şeridinde yer alan yazdır butonuna tıklanarak 3D model ve tasarım sonuçlarının yer aldığı bir rapor oluşturulur. Bu raporun çıktısı alınabileceği gibi dosya şeklinde de kaydedilebilir. Tasarım çıktısı Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13. Birinci modül raporlama ekranı

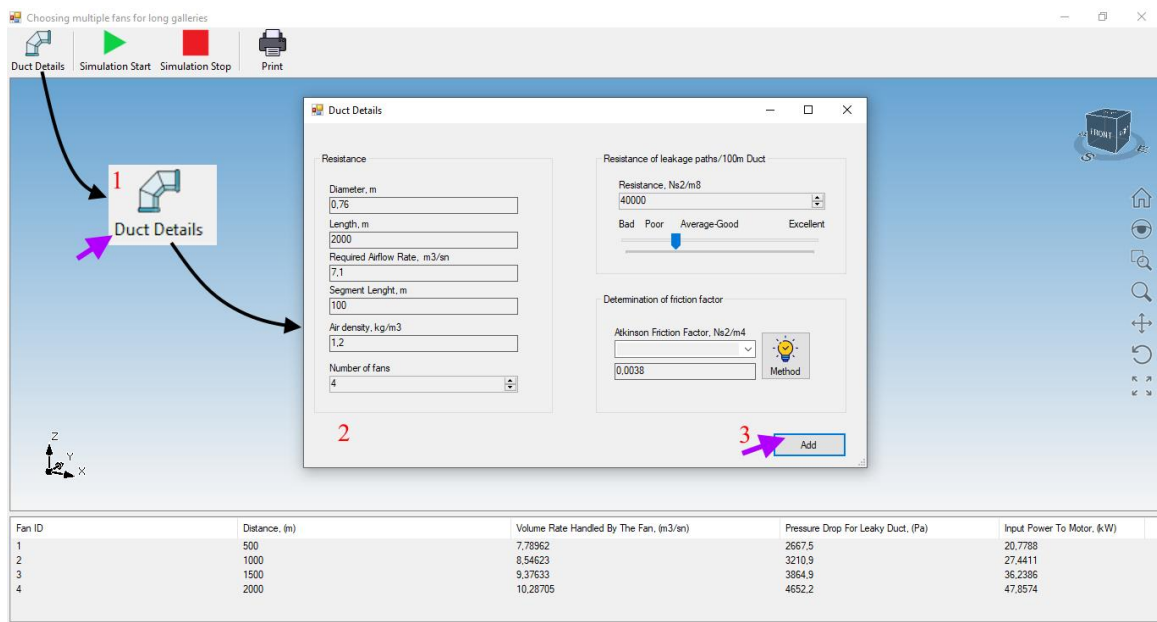
5.2.3. İkinci modül ekranı

Bu modülde, ekranının üst bölümündeki araçlar şeridinde “Vantüp Detayları”, “Simülasyonu Başlat”, “Simülasyonu Durdur” ve “Yazdır” butonları bulunmaktadır. Alt bölümde tasarımın sonuçlarının görüntülediği liste yer almaktadır. Sol alt köşede koordinat sistem aracı, sağ üst köşede 3D görüntüleme küpü ve sağ yan bölümde araç çubuğu yer almaktadır. Şekil 5.14’te ikinci modül ekranı verilmiştir.



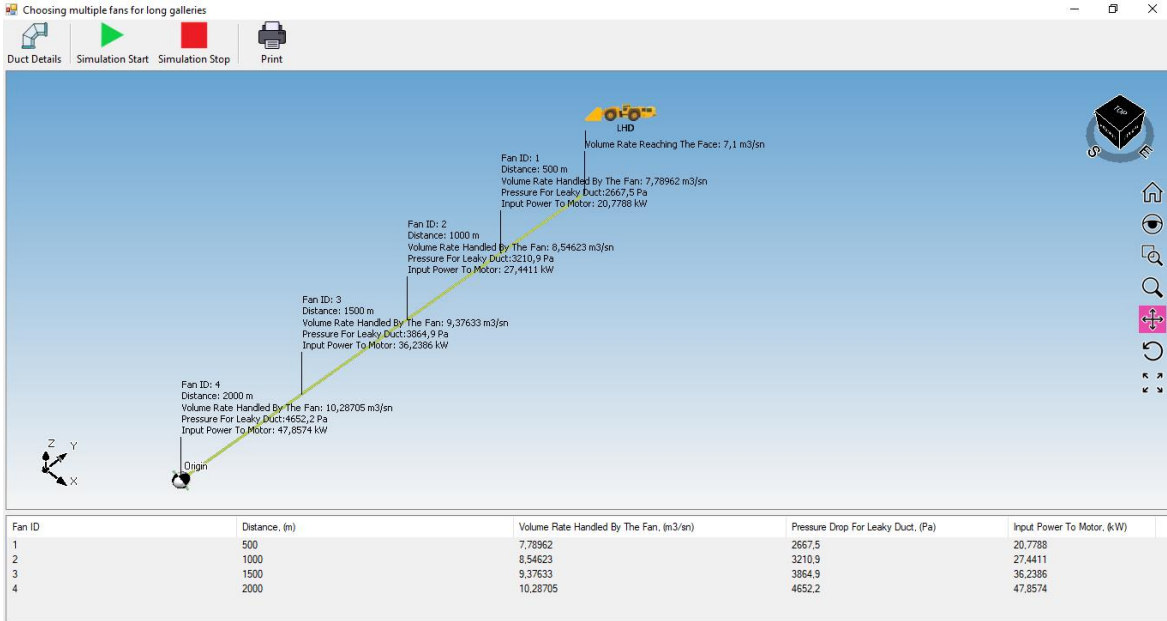
Şekil 5.14. İkinci modül ekranı

Şekil 5.15’de numaralandırılan adımlar takip edilir. İlk olarak vantüp detayları butonuna tıklanarak formda sırasıyla vantüp çapı, vantüp uzunluğu, arında gerekli debi, bölüm uzunluğu, fan sayısı, tesis kalitesine göre kötü ve mükemmel arasında bir seçim yapılarak kaçak yollarının direnç katsayısı belirlenir. Direnç katsayısının ve sürtünme katsayısının değeri biliniyorsa elle de girilebilir. Sürtünme katsayısının değeri bilinmiyor ise birinci modülde anlatılan ve numaralandırılan adımlar sırasıyla takip edilerek belirlenir.



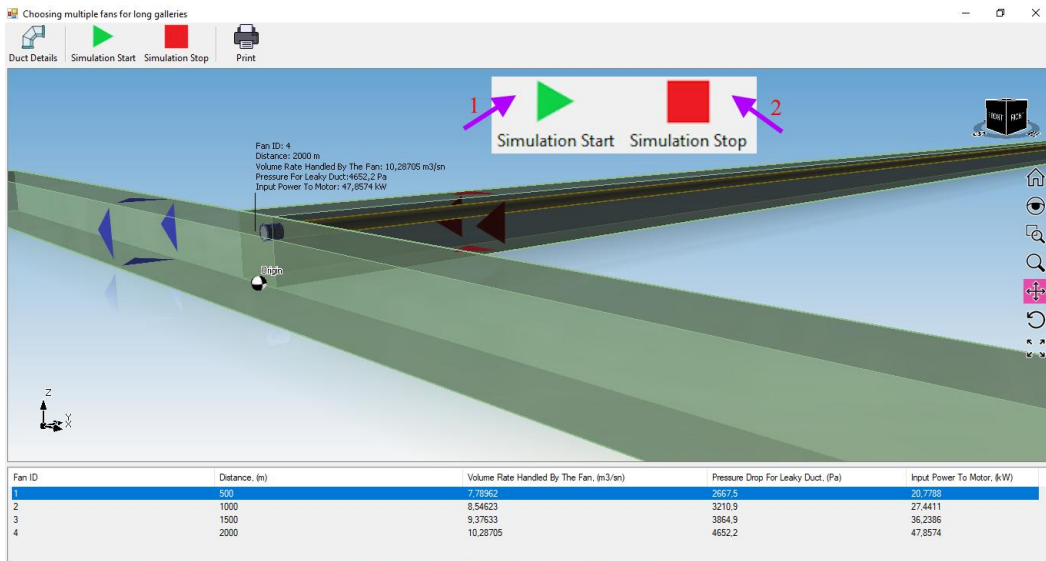
Şekil 5.15. İkinci modül vantüp detayları ekranı

Şekil 5.16’da 3D tasarım ekranında kör baca, vantüp, fan, yükleyici ve çalışma alanı görüntülenir. Formun altında yer alan tasarım sonuçları listesinde fan numarası, fanın konumu, fanın kullandığı debi, kaçaklı vantüp için basınç düşüşü ve motora verilecek güç listelenir.



Şekil 5.16. İkinci modül 3D ortamı

Oluşturulan 3D tasarımdan sonra formun üstünde araçlar şeridinde yer alan ve numaralandırılan simülasyonu başlat butonuna tıklanır. Simülasyonda temiz hava girişini temsil eden mavi oklar hareket ederken, kör bacadan kirli havanın atıldığını temsil eden kırmızı oklar çalışma alanından baca girişine doğru hareket ederek çıkış yapar. Fanın hava gönderdiğini temsil eden fan pervaneleri dönüş yapar. Tasarlanan simülasyon ortamı Şekil 5.17’de verilmiştir. Daha sonra numaralandırılan simülasyonu durdur butonu ile simülasyon sonlandırılır.



Şekil 5.17. İkinci modül simülasyon ortamı

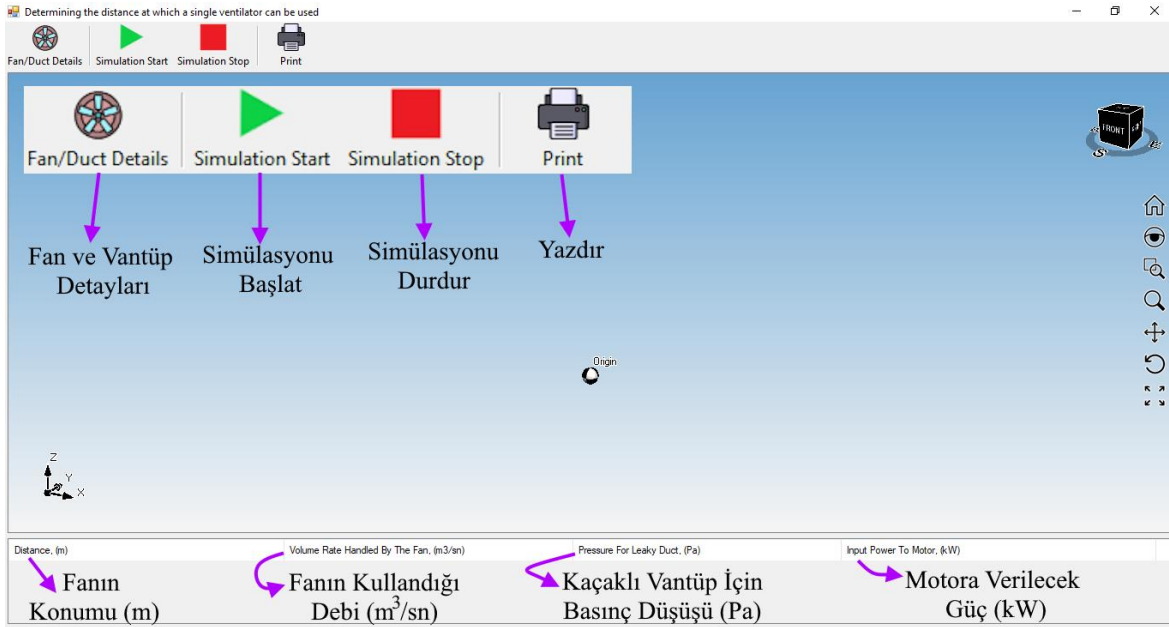
Simülasyon durdurulduktan sonra yine ekranın üst kısmında bulunan araçlar şeridinde yer alan yazdır butonuna tıklanarak 3D model ve tasarım sonuçlarının yer aldığı bir rapor oluşturulur. Bu raporun çıktısı alınabileceği gibi dosya şeklinde de kaydedilebilir. Tasarım çıktısı Şekil 5.18’de verilmiştir.

Fan ID	Distance, (m)	Volume Rate Handled By The Fan, (m ³ /sn)	Pressure Drop For Leaky Duct, (Pa)	Input Power To Motor, (kW)
1	500	7,78962	2667,5	20,7788
2	1000	8,54623	3210,9	27,4411
3	1500	9,37633	3864,9	36,2386
4	2000	10,28705	4652,2	47,8574

Şekil 5.18. İkinci modül raporlama ekranı

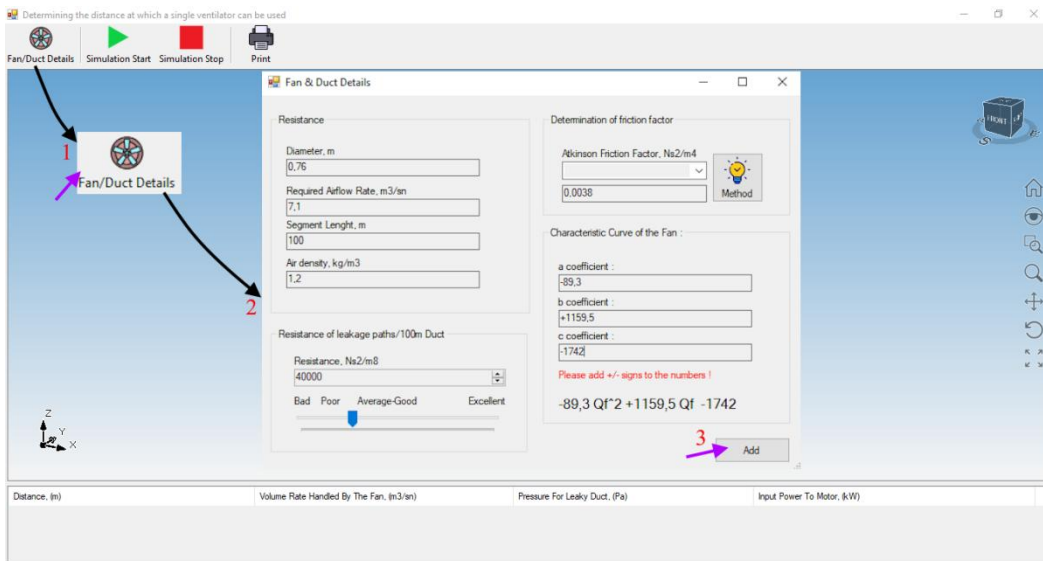
5.2.4. Üçüncü modül ekranı

Bu modülde, ekranının üst bölümündeki araçlar şeridinde “Fan ve Vantüp Detayları”, “Simülasyonu Başlat”, “Simülasyonu Durdur” ve “Yazdır” butonları bulunmaktadır. Alt bölümde tasarımın sonuçlarının görüntülediği liste yer almaktadır. Sol alt köşede koordinat sistem aracı, sağ üst köşede 3D görüntüleme küpü ve sağ yan bölümde araç çubuğu yer almaktadır. Şekil 5.19’da üçüncü modül ekranı verilmiştir.



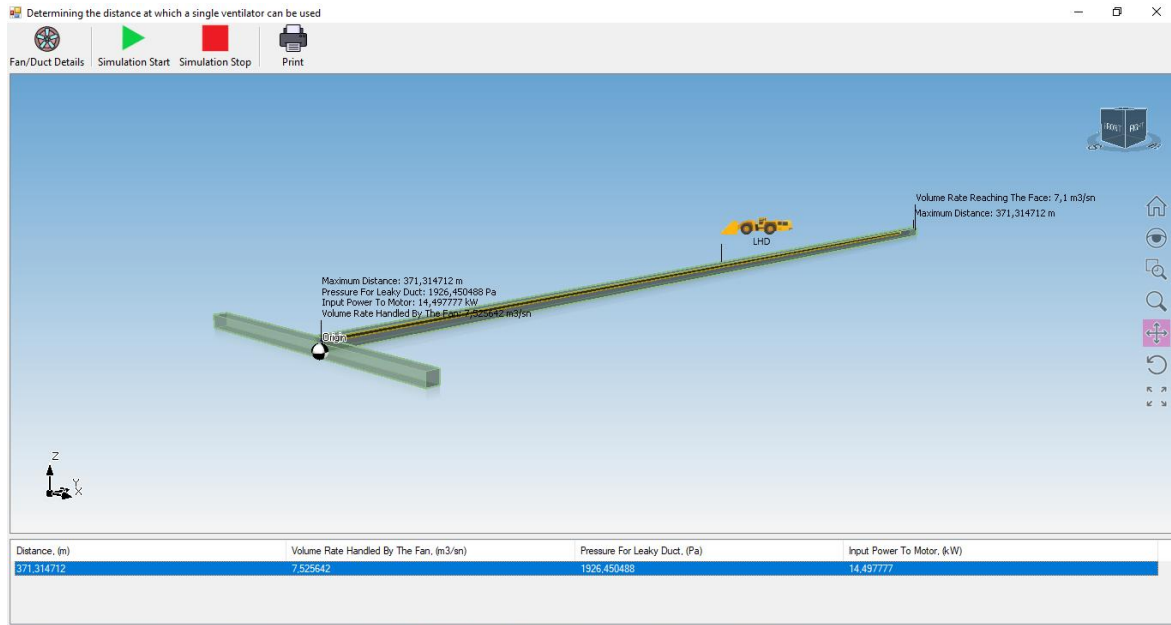
Şekil 5.19. Üçüncü modül ekranı

Şekil 5.20’de verilen fan ve vantüp detayları butonuna tıklanarak formda sırasıyla vantüp çapı, arında gerekli debi, bölüm uzunluğu, hava yoğunluğu, tesis kalitesine göre kötü ve mükemmel arasında bir seçim yapılarak kaçak yollarının direnç katsayısı belirlenir. Bu direnç katsayısının ve sürtünme katsayısının değeri biliniyorsa elle de girilebilir. Sürtünme katsayısının değeri bilinmiyor ise birinci modülde anlatılan ve numaralandırılan adımlar sırasıyla takip edilerek belirlenir. Hat karakteristik eğrisini oluşturan eğri katsayıları girilir.



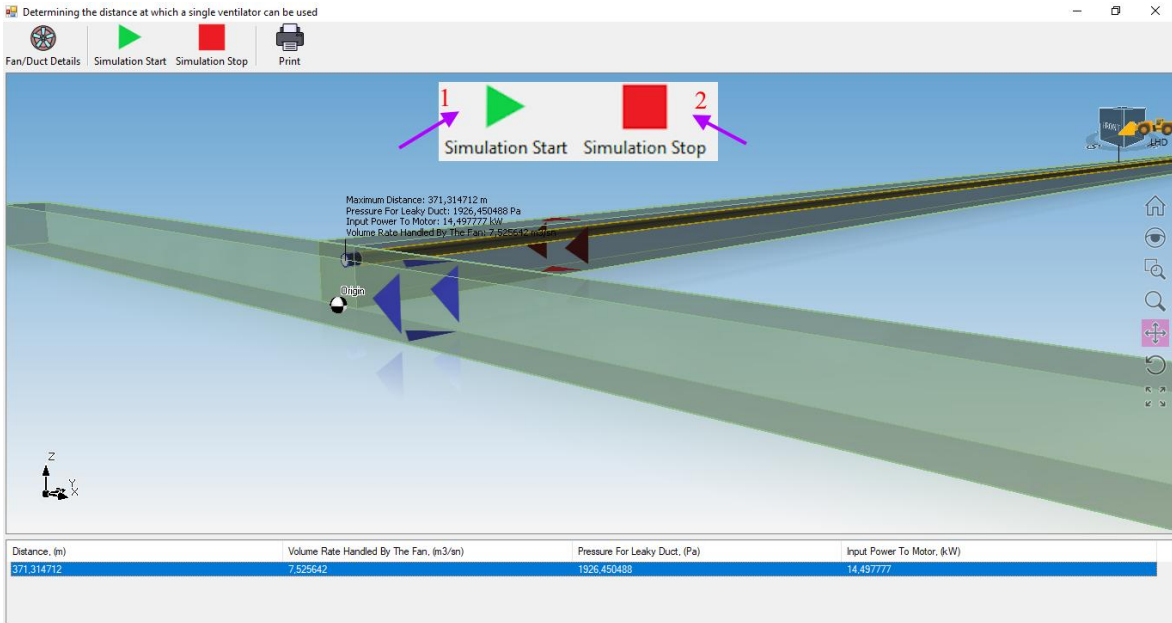
Şekil 5.20. Üçüncü modül fan ve vantüp detayları ekranı

Şekil 5.21’de 3D tasarım ekranında kör baca, vantüp, fan, yükleyici ve çalışma alanı görüntülenir. Formun altında yer alan tasarım sonuçları listesinde fanın konumu, fanın kullanıldığı debi, kaçaklı vantüp için basınç düşüşü ve motora verilecek güç listelenir.



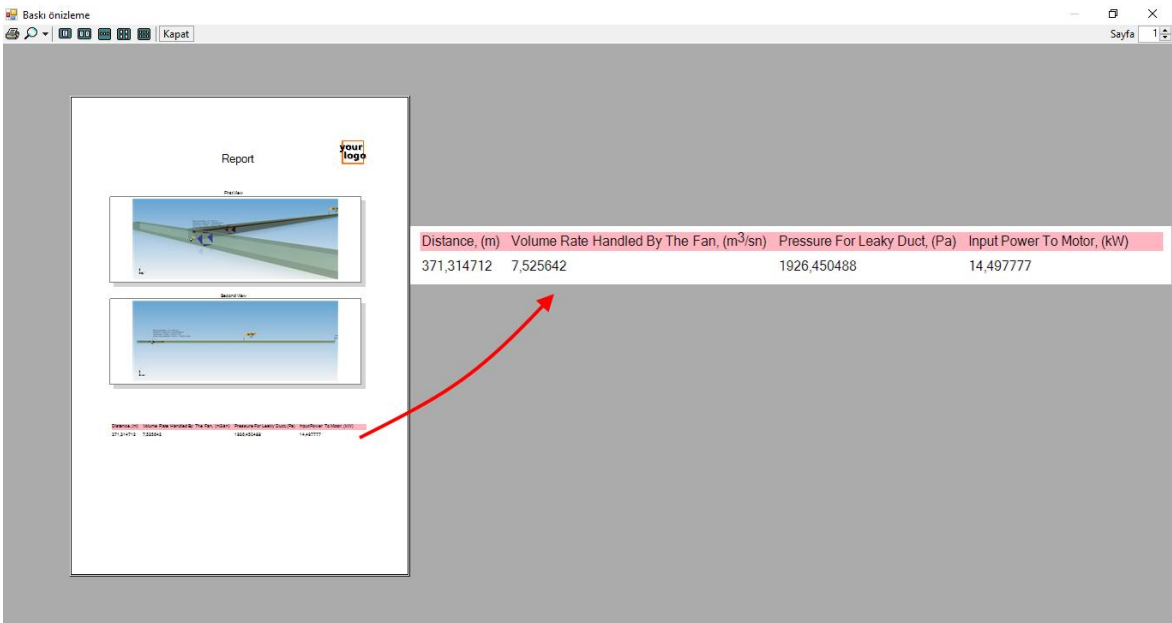
Şekil 5.21. Üçüncü modül 3D ortamı

Oluşturulan 3D tasarımdan sonra formun üstünde araçlar şeridinde yer alan ve numaralandırılan simülasyonu başlat butonuna tıklanır. Simülasyonda temiz hava girişini temsil eden mavi oklar hareket ederken, kör bacadan kirli havanın atıldığını temsil eden kırmızı oklar çalışma alanından baca girişine doğru hareket ederek çıkış yapar. Fanın hava gönderdiğini temsil eden fan pervaneleri dönüş yapar. Tasarlanan simülasyon ortamı Şekil 5.22’de verilmiştir. Daha sonra numaralandırılan simülasyonu durdur butonu ile simülasyon sonlandırılır.



Şekil 5.22. Üçüncü modül simülasyon ortamı

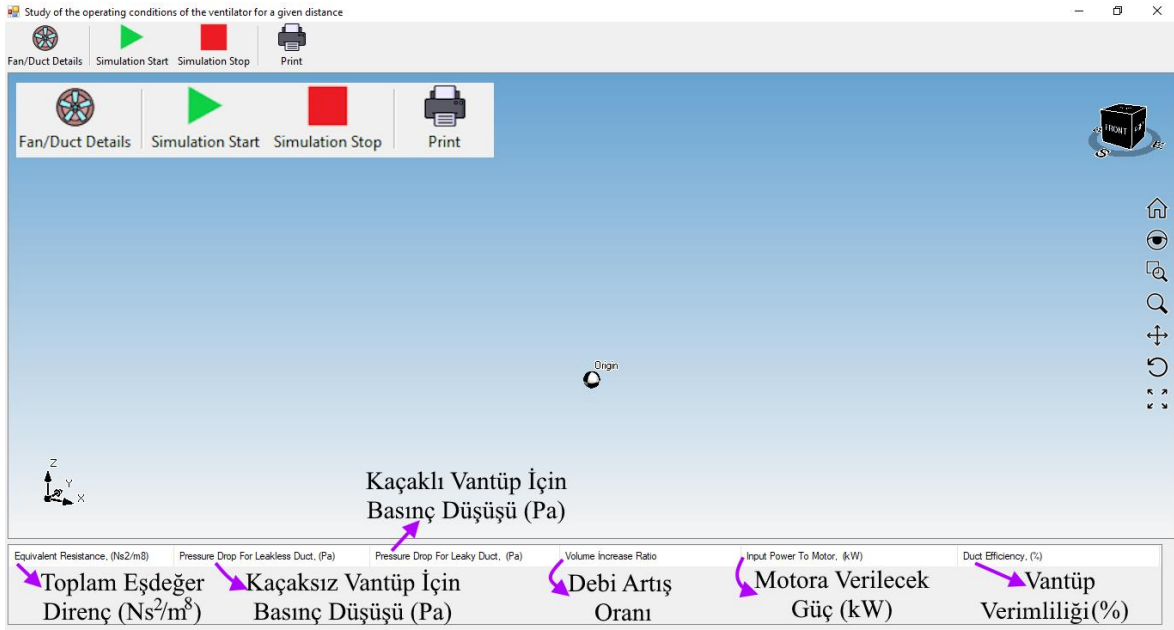
Simülasyon durdurulduktan sonra yine ekranın üst kısmında bulunan araçlar şeridinde yer alan yazdır butonuna tıklanarak 3D model ve tasarım sonuçlarının yer aldığı bir rapor oluşturulur. Bu raporun çıktısı alınabileceği gibi dosya şeklinde de kaydedilebilir. Tasarım çıktısı Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23. Üçüncü modül raporlama ekranı

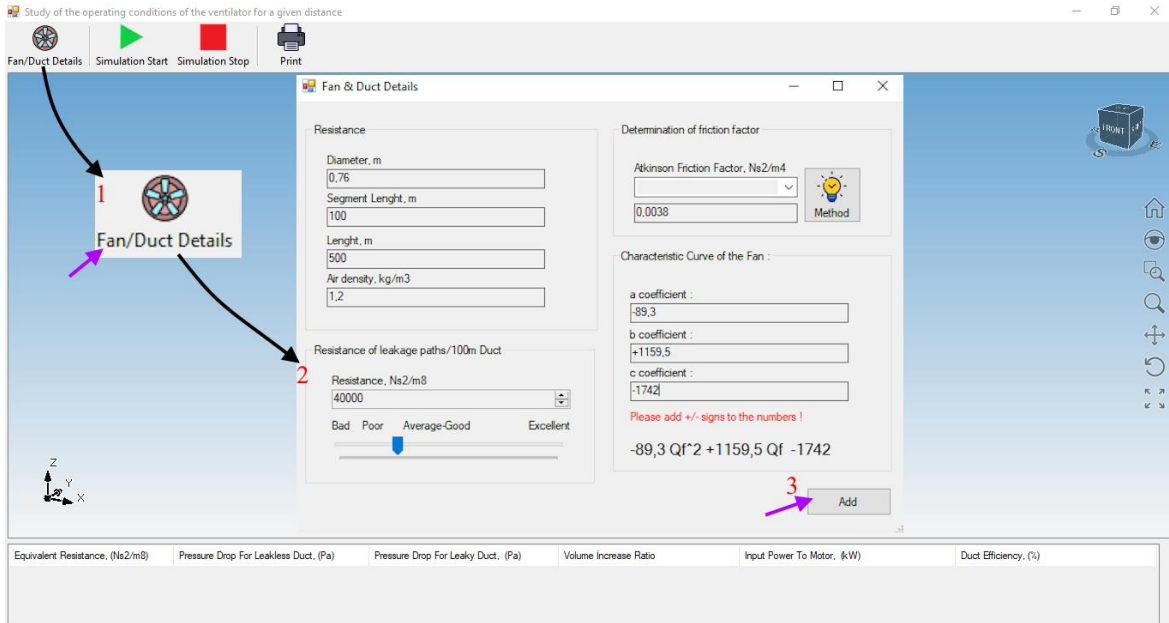
5.2.5. Dördüncü modül ekranı

Bu modülde, ekranının üst bölümündeki araçlar şeridinde “Fan ve Vantüp Detayları”, “Simülasyonu Başlat”, “Simülasyonu Durdur” ve “Yazdır” butonları bulunmaktadır. Alt bölümde tasarımın sonuçlarının görüntülediği liste yer almaktadır. Sol alt köşede koordinat sistem aracı, sağ üst köşede 3D görüntüleme küpü ve sağ yan bölümde araç çubuğu yer almaktadır. Şekil 5.24’te dördüncü modül ekranı verilmiştir.



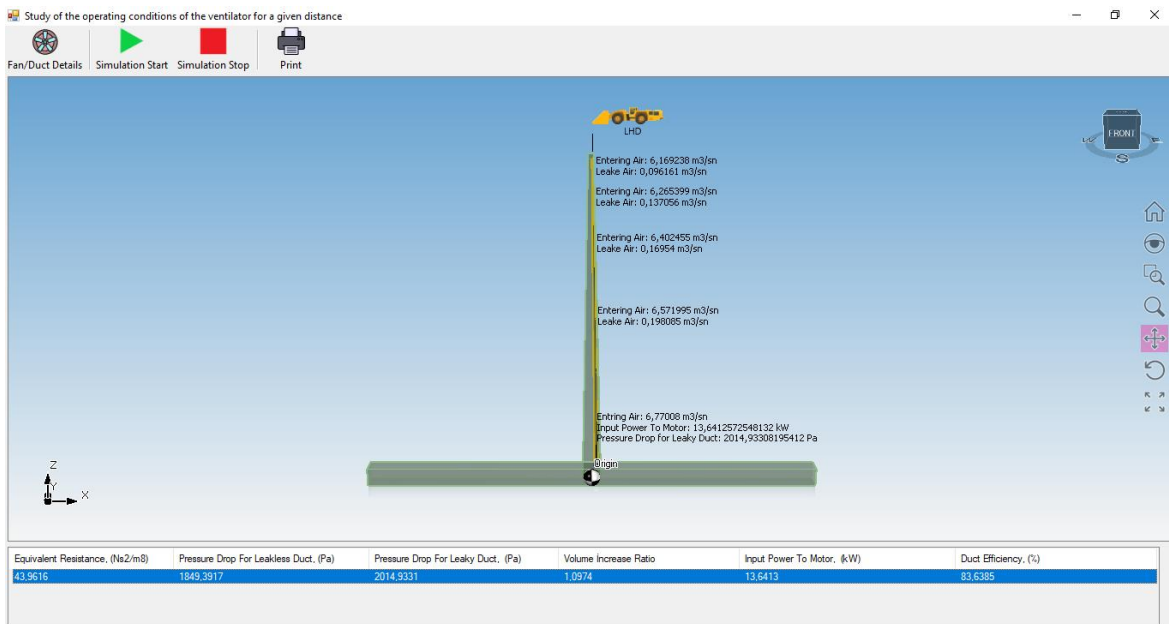
Şekil 5.24. Dördüncü modül ekranı

Şekil 5.25’te verilen fan ve vantüp detayları butonuna tıklanarak formda sırasıyla vantüp çapı, bölüm uzunluğu, hava yoğunluğu, vantüp uzunluğu, tesis kalitesine göre kötü ve mükemmel arasında bir seçim yapılarak kaçak yollarının direnç katsayısı belirlenir. Direnç katsayısının ve sürtünme katsayısının değeri biliniyorsa elle de girilebilir. Sürtünme katsayısının değeri bilinmiyor ise birinci modülde anlatılan ve numaralandırılan adımlar sırasıyla takip edilerek belirlenir. Hat karakteristik eğrisini oluşturan eğri katsayıları girilir.



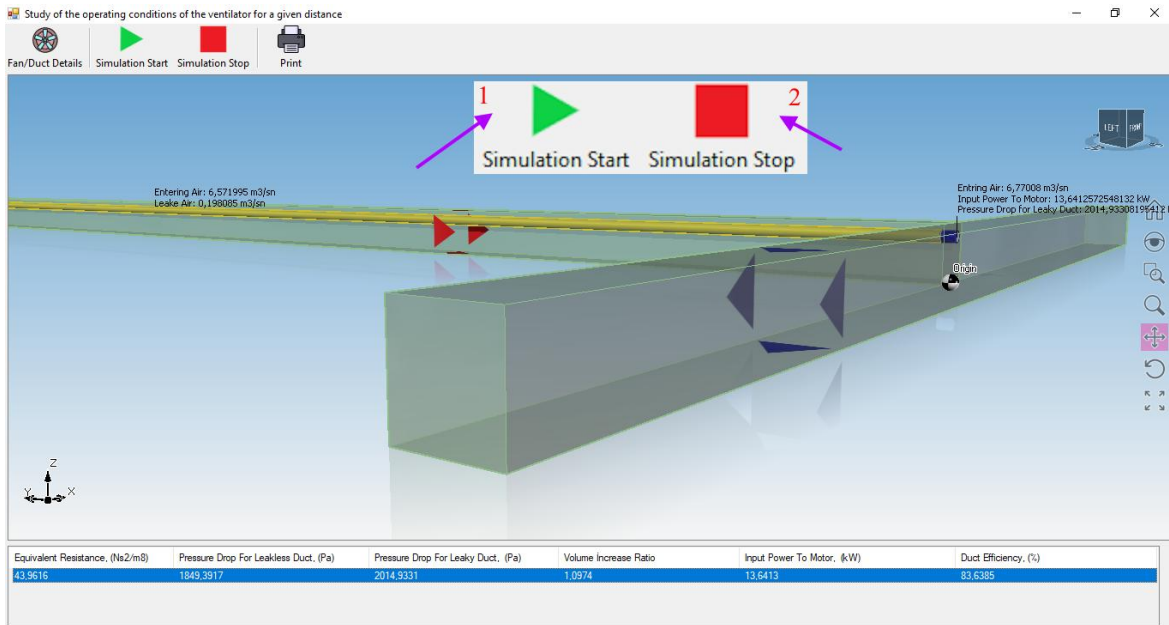
Şekil 5.25. Dördüncü modül fan ve vantüp detayları ekranı

Şekil 5.26'da 3D tasarım ekranında kör baca, vantüp, fan, yükleyici ve çalışma alanı görüntülenir. Formun altında yer alan tasarım sonuçları listesinde toplam eşdeğer direnç, kaçaqsız vantüp için basınç düşüşü, kaçaklı vantüp için basınç düşüşü, debi artış oranı ,motora verilecek güç, vantüp verimliliği listelenir.



Şekil 5.26. Dördüncü modül 3D ortamı

Oluşturulan 3D tasarımdan sonra formun üstünde araçlar şeridinde yer alan ve numaralandırılan simülasyonu başlat butonuna tıklanır. Simülasyonda temiz hava girişini temsil eden mavi oklar hareket ederken, kör bacadan kirli havanın atıldığını temsil eden kırmızı oklar çalışma alanından baca girişine doğru hareket ederek çıkış yapar. Fanın hava gönderdiğini temsil eden fan pervaneleri dönüş yapar. Tasarlanan simülasyon ortamı Şekil 5.27’de verilmiştir. Daha sonra numaralandırılan simülasyonu durdur butonu ile simülasyon sonlandırılır.



Şekil 5.27. Dördüncü modül simülasyon ortamı

Simülasyon durdurulduktan sonra yine ekranın üst kısmında bulunan araçlar şeridinde yer alan yazdır butonuna tıklanarak 3D model ve tasarım sonuçlarının yer aldığı bir rapor oluşturulur. Bu raporun çıktısı alınabileceği gibi dosya şeklinde de kaydedilebilir. Tasarım çıktısı Şekil 5.28’de verilmiştir.

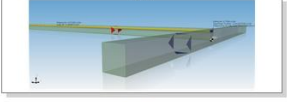
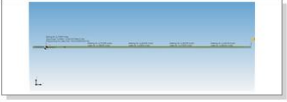
Baskı Önizleme

Kapat

Sayfa 1/1

Report

your logo

Results

Equivalent Resistance, (Ns ² /m ⁵)	43.9616
Pressure Drop For Leakless Duct, (Pa)	1849.3917
Pressure Drop For Leaky Duct, (Pa)	2014.9331
Volume Increase Ratio	1.0974
Input Power To Motor, (kW)	13.6413
Duct Efficiency, (%)	83.6385

Results

Equivalent Resistance, (Ns ² /m ⁵)	43.9616
Pressure Drop For Leakless Duct, (Pa)	1849.3917
Pressure Drop For Leaky Duct, (Pa)	2014.9331
Volume Increase Ratio	1.0974
Input Power To Motor, (kW)	13.6413
Duct Efficiency, (%)	83.6385

Şekil 5.28. Dördüncü modül raporlama ekranı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tali havalandırma sistemleri, yeraltı maden ocaklarında ana hava akımının ulaşamadığı, kör galeriler gibi alanların havalandırılması maksadıyla kullanılır. Ana havalandırma sisteminin ayrılmaz bir parçası olan bu sistemler, madenin dar ve erişimi zor alanlarına temiz hava ulaştırarak etkin hava sirkülasyonu sağlar.

Çalışma kapsamında, yeraltı madenlerindeki tali havalandırma sistemlerinin seri-paralel devreler yöntemiyle hesaplanmasını sağlayan C# dilinde kodlanmış bir bilgisayar programının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Tasarlanan program, tali havalandırma sistemlerini modelleyip simüle ederek en uygun hava akışının sağlanabilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada elle hesaplanmış ve saha uygulamalarıyla sağlanması yapılmış literatürdeki veriler alınarak geliştirilen yazılıma girilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

Bilgisayar destekli yazılımlar tasarım ve simülasyon süreçlerinde elle yapılan hesaplamalara göre çok daha çabuk ve verimli çıktılar sağlamaktadır. Böylece tasarım ve proje süreleri önemli ölçüde kısaltmakta ve otomatik hale gelmektedir.

Geleneksel yöntemlerle yapılan matematiksel hesaplamalar hata riskini beraberinde getirebilirken, bu işlemlerin yazılım ortamında gerçekleştirilmesi daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Gerçek zamanlı oluşturulan senaryolar sayesinde tasarımın uygulanabilirliği ve sağlanması yapılabilir.

Bilgisayar destekli yazılımlar sayesinde hızlı ve etkili bir şekilde tasarım parametrelerinin optimizasyonu sağlanır. Bu da sistemin verimliliğini yükseltmektedir.

Gelişmiş görselleştirme sayesinde 3D modelleme ve simülasyon desteği ile tali havalandırma sistemlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamakta böylece sunum ve eğitim açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Değişken tasarım ortamlarının kısa sürede test edilebilirliği, en uygun çözümün belirlenmesine yardımcı olmakta ve karar alma sürecini desteklemektedir.

Bilgisayar destekli yazılımlar mühendis ve teknikerlerin kısa sürede bilgi edinmelerine katkı sağlamakta, geleneksel yöntemlere göre daha az deneyimle daha hızlı ilerleme kaydedilmesine olanak tanımaktadır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, mevcut sistemlerin iyileştirilmesi ve yeni uygulamaların geliştirilmesi açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Bu doğrultuda, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler aşağıda sıralanmıştır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen modüller yer altı ocak uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilecek şekilde daha da geliştirilebilir.

Gelişmiş modelleme teknikleri entegre edilerek yazılımın farklı ocak iklimi koşullarına göre performans tahminleri yapabilmesi ileride yapılacak çalışmalara konu olabilir.

Söz konusu yazılımın mobil cihazlar üzerinden de kullanılabilir olan versiyonlarının geliştirilmesi saha çalışmalarına büyük katkılarda bulunacaktır.

Yapay zeka veya makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak, geçmiş verilerden öğrenen ve tasarım önerileri sunan akıllı bir havalandırma tasarım asistanı geliştirilmesi ileride yapılacak olan araştırmaların konusunu olabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Auld, G. (2002). Estimation of leakage in ventilation ducting. *CIM bulletin*, 95
- Auld, G. (2004). An estimation of fan performance for leaky ventilation ducts. *Tunnelling and underground space technology*, 19(6), 539-549.
- Browning, E. J. (1983). An approximate method for auxiliary ventilation calculations. *Min. Eng.(London);(United Kingdom)*, 143(264).
- Calizaya, F., & Mousset-Jones, P. (1993). Method of designing auxiliary ventilation systems for long single underground openings. In the 6 th US Mine Ventilation Symposium, Salt Lake City, UT, USA, 06/21-23/93 (pp. 245-250).
- Chang, P., Xu, G., & Huang, J. (2020). Numerical study on DPM dispersion and distribution in an underground development face based on dynamic mesh. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(4), 471–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.005>
- Chang, P., Xu, G., Zhou, F., Mullins, B., Abishek, S., & Chalmers, D. (2019). Minimizing DPM pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using CFD. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 87, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.014>
- Çetin, O. (1995). OAL İşletmesinde mekanize galerilerde toz kontrolü [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniveristesi Kütüphanesi.
- Dang, P. T., & Bui, V. D. (2020, March). Improving duct parameters to design auxiliary ventilation in mining roadways driven. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 780, No. 3, p. 032013). IOP Publishing.
- Dang, P. T. (2023). Selecting Parameters to Design Auxiliary Ventilation in Underground Mine. *Inżynieria Mineralna*. <http://doi.org/10.29227/IM-2023-02-40>
- Dang, P. T., Malanchuk, Z., & Zaiets, V. (2021). Investigation of resistance and air leakage of auxiliary ventilation ducting in underground mine in Quang ninh. *E3S Web of Conferences*, 280, 08002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128008002>
- Drăgoescu, R., & Moraru, R. I. (2025). Auxilliary ventilation systems improvement for optimal safety conditions provision in underground environments. *Revista Minelor*, 31(1), 30–49. <https://doi.org/10.2478/minrv-2025-0003>
- Geng, F., Gui, C., Teng, H., Tang, J., Niu, H., Zhou, F., Liu, C., Hu, S., & Li, S. (2020). Dispersion characteristics of dust pollutant in a typical coal roadway under an

- auxiliary ventilation system. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122889. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122889>
- Gonen, A. (2021). ENERGY SAVINGS IN AUXILIARY VENTILATION SYSTEMS OF UNDERGROUND MINES. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 8(10), 72–82. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v8.i10.2021.1055>
- Güyağüler, T. (1991). Ocak havalandırması. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 148s.
- Hasheminasab, F., Bagherpour, R., & Aminossadati, S. M. (2019). Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 89, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.022>
- Li, Z., Jia, Q., Li, G., Xu, Y., Wang, J., & Zhai, X. (2024). Performance analysis and optimization of coupled cooling system for auxiliary ventilation and partial thermal insulation in high geothermal tunnels. *Applied Sciences*, 14(5), 2128. <https://doi.org/10.3390/app14052128>
- Li, Z., Liu, H., Xu, Y., Li, R., Jia, M., & Zhang, M. (2021). Numerical Analysis on the Thermal Performance in an Excavating Roadway with Auxiliary Ventilation System. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1184. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031184>
- Martynenko, V. (2020). Analysis of strength and bearing capacity of the auxiliary mine ventilation fan connected to the rotor of its electrical drive. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 19–23. <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250078>
- Menéndez, J., Fernández-Oro, J. M., Merlé, N., Galdo, M., Álvarez, L., López, C., & Bernardo-Sánchez, A. (2023). Auxiliary ventilation systems in mining and tunnelling: Air leakage prediction and system design to optimize the energy efficiency and operation costs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140, 105298. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105298>
- Mishra, D., Mohalik, N. K., Ray, S. K., Khan, A. M., & Pandey, J. K. (2023). Design of an Auxiliary Ventilation System for Long Blind Headings during Drivage Opening of an Underground Coal Mine.
- Morla, R., Karekal, S., Godbole, A., Tukkaraja, P., & Chang, P. (2022). Optimum auxiliary fan location to control air recirculation. *Mining Metallurgy & Exploration*, 39(6), 2291–2299. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00690-1>
- Obracaj, D., Korzec, M., & Deszcz, P. (2021). Study on Methane Distribution in the Face Zone of the Fully Mechanized Roadway with Overlap Auxiliary Ventilation System. *Energies*, 14(19), 6379. <https://doi.org/10.3390/en14196379>

- Önce, G. ve Saraç, S., 1986, Madenlerde Havalandırma, Anadolu Üniversitesi Yayını
- Önder, M. (1996). Bilgisayar destekli tali havalandırma tasarımı [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.
- Qureshi, A. R., Sabanov, S., Bayramov, E., & Neafie, J. (2025). Optimization of dual duct forced auxiliary ventilation system to mitigate particulate matter emissions in a polymetallic underground mine environment: A hybrid approach. *PLoS ONE*, 20(5), e0322278. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322278>
- Sahu, A., & Mishra, D. P. (2022). Coal dust monitoring and computational simulations of dust dispersion in continuous miner development heading through auxiliary ventilation systems. *Current Science*, 122(4), 419.
- Salami, O. B., Brune, J. F., & Xu, G. (2025). A CFD analysis of equipment fires in an underground development heading for improved auxiliary ventilation design. *Safety in Extreme Environments*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/s42797-025-00119-0>
- Şensöğüt, C. (1994). Klasik ve Kontrollü Kısa Devre Havalandırma ile Uzun Hazırlık Galerilerinde Toz Kontrolü. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 33(1), 17–22. <https://www.mining.org.tr/tr/download/article-file/375800>
- Torno, S., & Toraño, J. (2020). On the prediction of toxic fumes from underground blasting operations and dilution ventilation. Conventional and numerical models. *Tunnelling and underground space technology*, 96, 103194.
- Tutak, M., & Brodny, J. (2018). Analysis of the impact of auxiliary ventilation equipment on the distribution and concentration of methane in the tailgate. *Energies*, 11(11), 3076. <https://doi.org/10.3390/en11113076>
- Vutukuri, V. S. (1983). Air leakage in ventilation ducting and the design of auxiliary ventilation systems. *Min. Eng.(London);(United Kingdom)*, 143(262).
- Vutukuri, V. S. (1984). Study of variables in auxiliary ventilation. *Trans.-Inst. Min. Metall., Sect. A;(United Kingdom)*, 93.
- Vutukuri, V. S. (1986). Mine ventilation and environment, Department of Mining Engineering University of New South Wales.
- Xin, S., Wang, W., Zhang, N., Zhang, C., Yuan, S., Li, H., & Yang, W. (2021). Comparative studies on control of thermal environment in development headings using force/exhaust overlap ventilation systems. *Journal of Building Engineering*, 38, 102227.
- Zhang, H., Li, M., Xiao, Y., Han, X., Liu, B., & Yang, W. (2023). Numerical study on interactions between climate conditions and diesel exhaust and optimization of auxiliary ventilation in underground mines. *Thermal Science and Engineering Progress*, 37, 101594.