

Aksiyel Fan Tasarımı ve 3 Boyutlu Yazıcı İle Hızlı Prototipleme *Using Of 3d Printer Fast Prototyping Method Over the Axial Fan Technology*

Yakup Akyol^{1*}

¹ *Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Müh. Anabilim Dalı Yüksek Lisans, Türkiye*

* *Sorumlu Yazar: akyolya@itu.edu.tr*

Özet

Bir maden işletmesinin kuruluşundan itibaren ihtiyaç duyulan temiz hava ihtiyacı yıllar içinde evrimleşerek temelinde fanlar ve yardımcı teknolojileri ile birlikte kapsamlı bir akademik branş ve iş kolu haline gelmektedir. Madenlerdeki ana fikir temiz havayı üretip çalışma bölgelerine doğru şekilde dağılımını yapmak olmakla birlikte bu operasyonun enerji tüketimini ve verimliliği odak noktasına alarak yapmak da sektörün beklentileri arasındadır. Madencilik dışındaki alanlarda fanlar bağlandıkları tesisata göre tasarlanıp kullanılmakta bu yüzden önemli bir verim kaybı yaşanmamaktadır. Ancak yeraltı madenciliğinde kullanılan tünel fanları tünelin ilerleme sürecinde karakteristik eğrinin farklı noktalarında çalışmaktadır. Bu çalışmanın amacı fan çarkına bağlı shaft gücünü değiştirmeden farklı debi-basınç karakteristiğine sahip çarklar üreterek tüneldeki kazı mesafesinin değişmesine bağlı olarak fanı daima yüksek bir havalandırma verimi ile çalıştırmaktır. Bu durumun önündeki en büyük engel çark imalatı olup, hızlı prototipleme için 3D yazıcı teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında bir buluş niteliğinde geliştirilen Lost-PLA yöntemi hali hazırda bir üretim metodu olan hassas döküm teknolojisinde 3D yazıcı kullanarak yapılan bir hibrid metottur.

Anahtar Kelimeler: Eksenel Fan, 3D Yazıcı Teknolojileri, Hızlı Prototipleme, Havalandırma

Abstract

The need for clean air, which has been required since the establishment of a mining enterprise, has evolved over the years, and become a comprehensive academic branch and business line, with fans and auxiliary technologies as its basis. Although the main idea in mines is to produce clean air and distribute it correctly to the working areas, it is also among the expectations of the sector to focus on energy consumption and efficiency of this operation. In areas other than mining, fans are designed and used according to the installation they are connected to, so there is no significant loss of efficiency. However, tunnel fans used in underground mining operate at different points of the characteristic curve during the progress of the tunnel. The aim of this study is to produce impellers with different flow-pressure characteristics without changing the shaft power connected to the fan impeller, and to always operate the fan with a high ventilation efficiency depending on the change in the excavation distance in the tunnel. 3D printer technology is used for fan blade manufacturing and rapid prototyping, which are the biggest obstacles to this situation. In addition, the Lost-PLA method, developed as an invention within the scope of my study, is a hybrid method made using a 3D printer in precision casting technology.

Keywords: Axial Fan, 3D Printing Technology, Fast Prototyping, Ventilation

1. Giriş

Yeraltı madenciliğindeki temel operasyonlardan biri olan havalandırma konusunun gün geçtikçe derinleşen yeraltı işletmeleri ile önemi giderek artmaktadır. İşletmelerin derinleşmesi ile birlikte artan sıcaklık ve seyreltilmesi zorlaşan muhtemel patlayıcı ortam büyük, güçlü fanlara olan ihtiyacı gerekli kılmaktadır (Gyamfi, 2020). Bu noktada aksenel özellikli fanlar kurulum için daha az alana ihtiyaç duyması, herhangi bir güç aktarım elemanı içermediğinden bakım ve onarım maliyetlerinin düşük olması, emme ve basma yönünde iki yönde çalıştırılabilmesi, airfoil kanat yapısı ile yüksek verimlikte çalışması gibi özellikleri ile yeraltı madenlerinde sıklıkla tercih edilen fanlar haline gelmektedir (Euler ve Philip, 2019). Mevcut durumda kum kalıplama yöntemi ile hazırlanan ve her bir motor gücü için 1 ya da 2 tane basınç-debi ilişkisi olan fanlar yerine, her bir tesisat için özel çarklar üretilmesinin önünü 3D yazıcı teknolojileri açmaktadır. Bu çalışma kapsamında hem ana fan hem de yardımcı fanlar noktasında şebekeye uygun fanların yeni nesil 3D yazıcılar ve hassas döküm teknolojileri ile hızlı prototipleme çalışmaları ve saha ölçümlerini içermektedir. Mevcut durumda ağırlıkla ithalata bağımlı ve oldukça niş olan bu teknoloji ülkemizdeki hem kömür hem de metal madenciliğinin dinamiklerine uygun olacak şekilde geliştirilerek üretilebilecektir.

Bu çalışma kapsamında üretilen aksenel fan Balıkesir su ve kanalizasyon işleri idaresine ait atıksu artıma tesisine kurularak madenlerdeki probleme benzer şekilde oluşan hidrojen sülfür ve metan varlığını ortamdaki uzaklaştırmak amaçlanmaktadır.

3D yazıcı teknolojisi son yıllara pek çok kişinin evine kadar ulaşmış ve yaygın kullanım ağı ve kullanıcı geri bildirimleri sayesinde hızlı bir gelişim süreci göstermektedir. Bu yönüyle 3D yazıcıların yeraltı madenciliğinde kullanılan havalandırma fanları için de verimli ve hızlı bir araç olarak kullanılması da öngörülmektedir. Bu teknoloji ile bir havalandırma mühendisi tüneli için kendi çarkını tasarlayıp, baskı alarak kullanabilecek hatta uzun bir tünel kazısında birden fazla çark değiştirerek en verimli havalandırma operasyonunu gerçekleştirebilecektir.

2. Kullanılan 3D Yazdırma Teknolojileri

Genellikle endüstride yaygın olarak kullanılan 3 boyutlu yazıcılar filament tipi yazıcılar ve SLA reçine tipi yazıcılar olarak 2 türde üretilmektedir. Bu yazıcı çeşitlerinin birbirinden ayrılan en önemli özellikleri kullandıkları hammadde çeşididir. Filament tipi yazıcılar bir tambur üzerine çeşitli uzunlarda sarılmış olarak bulunan çapları 1.75 mm ve 2.5 mm dairesel özellikli çubuklardır. 3D yazıcıların filament malzemesi olarak kullandığı ABS, PLA ve PET gibi malzemeler, plastik enjeksiyon makinalarının kullandığı benzer endüstriyel hammaddeleri kullanmaktadır. SLA tipi yazıcılar ise likit halde hazırlanmış ve plastik kaplar içerisinde satılan reçine formunda hammaddeler kullanmaktadır. ABS, Naylon, PA gibi yine endüstride kullanılan plastik hammaddelerine benzer kimyasal bileşime sahip ürünler kullanılmaktadır.

2.1 SLA (Sterolitografi) Yazıcı Teknolojisi

Işıklı reçineyi sertleştiren ve ışığın foto polimerizasyon tekniği ile reçineyi sertleştirerek oluşturulan bir katmanlı 3d üretim yöntemidir. Mevcut 3 boyutlu yazıcı teknolojileri içerisinde ölçü toleranslarının en doğru olarak elde edildiği 3 boyutlu yazıcı teknolojisi SLA yöntemidir. SLA yönteminde mevcut durumda oda sıcaklığında likit olarak bulunan reçine hammaddesinin belirli bölgelerinin UV ışık altında pozlayarak sertleşmesi sağlanmaktadır. Her bir katman katı model programındaki tasarıma göre varsayılan değer olarak 0.05mm kalınlıkta sertleştirilir ve katmanlar oluştuğunda nihai model elde edilmektedir. SLA yöntemindeki ölçü hassasiyeti ön planda olduğundan bu teknik diş hekimliği, kuyumculuk, sergi modelleri ve optik parça üretiminde yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır.

2.2 Filament Çubuk Kullanan Yazıcı Teknolojileri

Filament tipi yazıcılar termoplastik özellikteki şeritleri eriterek katı model üreten bir katmanlı üretim teknolojisidir. Termoplastik ürünler ısıtıldıklarında şekillendirilebilir ve soğuduklarında tekrar eski mekanik özelliklerine geri dönebilirler (Komurlu vd., 2017). SLA yazıcılardan en önemli farkı reçineyi pozlayarak sertleştirmek yerine filamentleri eriterek modeli oluşturan katmanları elde etmektedir. Çeşitli hammaddeler için üreticilerin tavsiye ettiği bir ortam sıcaklığı (fırın iç sıcaklığı) ve filament eriten başlık sıcaklık değerleri mevcuttur. Ortam sıcaklığı 40-70 °C aralığında iken başlık sıcaklığı kullanılan hammaddenin türüne göre 185-250 °C arasında değişiklik göstermektedir. 3D yazıcı filamentleri; esnekliğine, dayanıklılığına ve kullanım alanına göre farklı türlere sahiptirler.



Şekil 1. Filament Çubuk Örnekleri ve SLA Reçine ve Örnek Baskı

2.2.1 PLA Filament

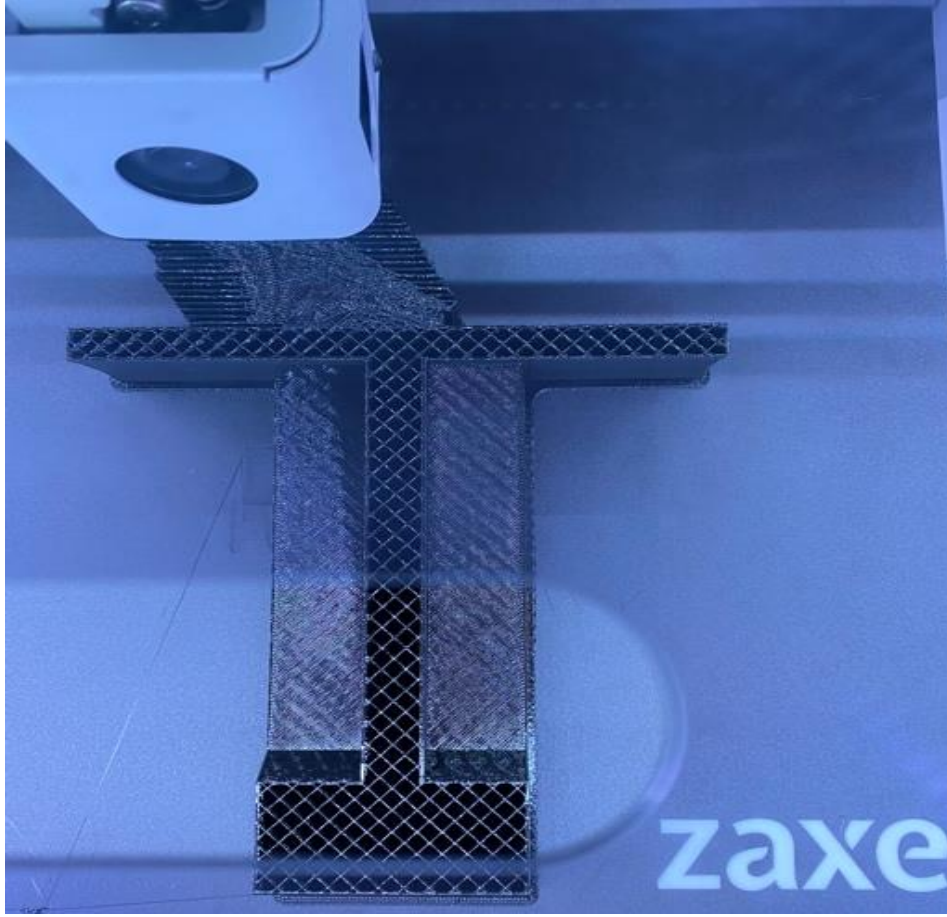
PLA (Polylactic Acid) en çok tercih edilen iki filament türünden biridir. Organik olması, piyasada çok bulunması, diğerlerine göre ucuz olması ve kolay bir kullanıma sahip olması çok tercih edilmesinin başlıca nedenlerindedir. Mısır nişastasından ve şeker kamışından oluşan bir polimerdir. Hafif esnek ama sert bir yapısı vardır; bu nedenle kolayca kırılabilir. Sağlığa hiçbir zararı olmadığı için mutfak gereçleri, oyuncaklar ve protez yapımında kullanılmaktadır.

2.2.2 ABS Filament

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) en çok tercih edilen filamentlerde ikinci sırada yer alır. PLA filamentine kıyasla çok daha iyi mekanik özellikleri olmasına rağmen baskı kolaylığı açısından PLA'nın gerisinde kalmaktadır. Çok dayanıklıdır. Baskı işlemi çok yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Arabalar, elektrik ekipmanları ve ev eşyaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

2.2.3 PETG Filament

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) en çok kullanılan plastik çeşididir. Basımı çok kolaydır, geri dönüşüme kazandırılabilir. Su ve meşrubat şişeleri veya mutfak gereçleri yapımında kullanılmaktadır.



Şekil 2. PLA filament ile yazılan kanadın en kesit görüntüsü

Çalışma konumuz olan aksenal özellikli fanların airfoil kanat yapıları ince uzun profillerden oluşmaktadır. Aldığımız pek çok SLA yazıcı baskısında kanatların kolayca kırıldığı ve istenilen mekanik dayanıma ulaşmadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca SLA yazıcıların baskı alanlarını yatayda ve düşeyde limitleyen pozlama görevi gören UV LCD ekranların boyutu istenilen büyüklükteki maden fanı kanadı basmaya uygun olmadığı gözlemlenmektedir.

Filament tipi yazıcılarda ise baskı alanında herhangi bir limit bulunmaz ve mekanik olarak modelin iç dolgusunda kullandığı çeşitli mesh yapıları sayesinde üstün dayanım özellikleri göstermektedir. Şekil 2’de üretim aşamasındaki bir fan kanadının kesit görüntüsünde kanat içi dolgunun bal peteği şeklinde ilerlediği görülür. Belirli bir dolgu oranı ile basılan malzemeler üretim süresini kısaltır ve Lost PLA yöntemi esnasında malzemenin buharlaşma hızını artırarak dışı kalıp içerisinde kalıntı oluşmasını engeller.

Filament kullanan yazıcılar üretim süresi elektrik tüketim maliyeti yönüyle de oldukça önemlidir. 400 mm çapında monoblok bir fan kanadın üretim süresi %100 doluluk oranında 120 saat iken %20 doluluk oranında bal peteği mesh ile 30 saat düzeyine kadar gerileyebilmektedir. Üretim süresi uzun yazdırma işlemlerinde, elektrik tüketim maliyeti kullanılan filament hammadde fiyatının üzerine çıkabilmektedir. Ayrıca dolgu modelde bir miktar esneklik sağlar ve bu esneklik fan kanadı üzerine gelen radyal ve aksenal yüklere karşı kanadın aniden kırılmasını önleyebilmektedir.

Mesh yapısının bir diğer avantajı model ağırlığındaki hammadde kullanımının azalmasına bağlı olan gerilemedir. Model ağırlığı düştükçe elektrik motoruna herhangi bir aktarma organı olmaksızın doğrudan bağlanan fan kanadının motor rulmanları üzerindeki aksenal yükleri azaltarak rulmanların çalışma ömürlerinin artırılması hedeflenmektedir.

2.3 Filament Tipi Yazıcılar ile Baskı İşlemi

Filament malzemesi olarak Porima firmasının ülkemizde yerli olarak ürettiği Tough-PLA ürününü kullanarak çeşitli baskılar alınmıştır. Şekil 3'te görülen baskı 700 mm çapında bir maden fanının 1/4 oranında küçültülmüş eşlenik parçalarından biridir. Kullandığımız 3D yazıcının yazdırma alanının yetersiz olduğu durumlarda model birkaç parça halinde basılarak montajlı parçalar halinde toplanabilmektedir. Resimde görüldüğü gibi kanatlar üzerindeki burkulma (twist) oldukça yoğun ve ters açılı olmasına rağmen katmanlı üretim teknolojisi destek parçalarına ihtiyaç duymadan üretilebilmektedir.



Şekil 3. 700 mm çapında bir fana ait PLA ile yazılan kanat görüntüsü

Kanat modeli dışında hassas döküm için gerekli olan döküm yolluk parçaları da benzer şekilde 3D yazıcı ile basılarak kül fırınlarında kalıntı yapmadan tamamen buharlaşacak malzemeler ile yapıştırılarak model döküme hazır hale getirilmektedir. Genellikle kalsit içerikli plastikler ve yapıştırıcılar kül fırınlarında tam olarak yanma sonucu kaybolmadığından dışi seramik kalıp içerisinde artıklar meydana gelmekte ve dökümde boşluklar oluşturmaktadır. Bu durum döküm işleminde cevherin her noktaya homojen bir şekilde erişememesi, dengesiz dağılmasına ve pervanenin dönüş esnasında balanslı dönmesi ya da zayıf olan bu bölgelerin çatlaması ve kırılmasına kadar ilerleyen süreçlerin gözlemlenmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada 350mmx300mmx250mm yazdırma alanına sahip Zaxe markasının ülkemizde yerli olarak ürettiği Z1+ model yazıcı kullanılmıştır. 3D yazıcının yerli olarak seçilmesinin sebebi, 3D yazıcıların halen gelişmekte olan bir teknoloji olmasından kaynaklanmaktadır.

Yazıcıların hareketli mekanizmalarında meydana gelen sonsuz mil, kayış ve kasnak arızaları, ısıtıcı fişek ve PT100 sıcaklık sensör arızaları, konumlandırma switch sensör arızaları gibi elektriksel arızalar dönemsel olarak meydana gelmektedir. Yazıcılar çok sayıda yedek parça ve teknik destek ihtiyacı, ayrıca katı model dilimleme yazılımı noktasında sürekli olarak yazılım güncellemesine ihtiyaç duymaktadır.

Yazdırma işlemi modelin hassas bir toleransla üretilmesini desteklemek amacıyla 0.4mm delik çapında nozul kullanılarak hazırlanmıştır. Şekil 4'te görülen Z1+ yazıcı ABS gibi baskı esnasında çalışma ortam sıcaklığının değişmesine bağlı olarak katı model üzerindeki çekmeleri önlemek amacıyla tamamen kapalı kabinli olarak üretilmektedir. Kabinli yazıcılarda kabin içerisindeki yazdırma tabelasının ürettiği ısının homojen bir biçimde dağılması için fan bulunmaktadır. Ayrıca bu fan yazdırma esnasında ortaya çıkan zehirli kimyasalların filtrelenmesinde kullanılan bir karbon filtre içermektedir. Yazdırma işlemi özellikle mesh yoğunluğu fazla ve yazdırılacak çarkın büyük çaplı olduğu durumlarda yazdırma süresi 50 saate kadar çıktığı uygulamalar bu çalışma esnasında deneyimlenmiştir. Böyle durumlarda bir iş sağlığı ve güvenliği önlemi olarak yazıcı mutlaka karbon filtre ile çalıştırılmalı ve yazdırma işlemi yapılan alan doğru bir şekilde havalandırılmalıdır.



Şekil 4. Bu çalışmada kullanılan ZAXE Z1+ marka yazıcı

Ayrıca bu çalışma esnasında yazıcı çıktılarını alırken hareketli mekanik parçaların, yay ve segmanların fırlayarak göze zarar verme ihtimaline karşı gözlük, filament, reçine, yağ ve

parçaları temizlemek için kullanılan kimyasallara dirençli eldiven, fanların ve yazıcının çalışması esnasında çıkan gürültüye karşı iç kulak tıkacı bir iş güvenliği önlemi olarak kullanılmaktadır.

Şekil 5'te görülen filament tipi yazıcı X, Y ve Z olmak üzere toplamda 3 eksene sahip olduğu görülmektedir. X ve Y eksenleri baskı kafasının hareketlerini kontrol ederek yazdırma alanında her bir katmanı inşa ederken Z eksen katmanlı ilerlemeyi sağlamak için yazdırma tablasını aşağıya doğru hareket ettirmektedir.

3. Lost PLA Yöntemi

3D yazıcılarda sıklıkla kullanım alanı bulan PLA hammaddesi organik esaslı bir hammadde olması sebebiyle kül fırınlarında atık ürün bırakmadan yanabilmektedir. Hassas döküm yönteminde kullanılan mum enjeksiyonuna bir alternatif olarak geliştirdiğimiz PLA esaslı 3D yazdırma yöntemi PLA hammaddesinin mum enjeksiyonunda kullanılan metal kalıplara göre oldukça düşük maliyeti sebebiyle Lost PLA yöntemi hem seri üretime hem de prototip ve tekil üretilere uygun olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 5'te görülen aksenel özellikli fan kanadı modeli seramik hammaddesi ile kaplanmış PLA malzemenin tamamen yanarak elde edilen dişi kalıbın elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5. Seramik Çamuru ile Kaplanmış 3D fan Kanadı

Lost PLA yönteminin aksenel fan kanatlarında kullanılmasının en önemli avantajlarından biri de son derece zor modellenen özellikle kum kalıplama yöntemindeki ters açılardan dolayı

elde edilmesi mümkün olmayan aerodinamik verimleri yüksek kanat profilleri için alternatif bir üretim yöntemi olmasıdır.

Hassas döküm üretim yöntemi mevcut durumda sanayide genellikle küçük gövdeli ekipmanlar için tercih edilmektedir. Hassas döküm yöntemini kullanan işletmeler genellikle 500 mm çapına kadar çamur kazanları kullanmaktadır. Maden endüstrisinde kullanılan fanlar genellikle 700 mm çapa kadar monoblok döküm olarak ve açı ayarı yapılabilen kanat kullanılmadan üretilmektedir. 700 mm çaptan büyük pervaneler Şekil 6'da görülen pervane kanatlarının bağlandığı bir ana gövde üzerine montajlanarak üretilmektedir. Genellikle ana havalandırma fanı olarak üretilen bu özellikteki fanlarda Hub-shroud arasındaki mesafe 300-700 mm aralığında olduğu görülmektedir. Mevcut çamur kazanlarına yapılacak boyutsal iyileştirmeler ile tüm maden fanları Lost PLA yöntemi ile üretililebilecektir.



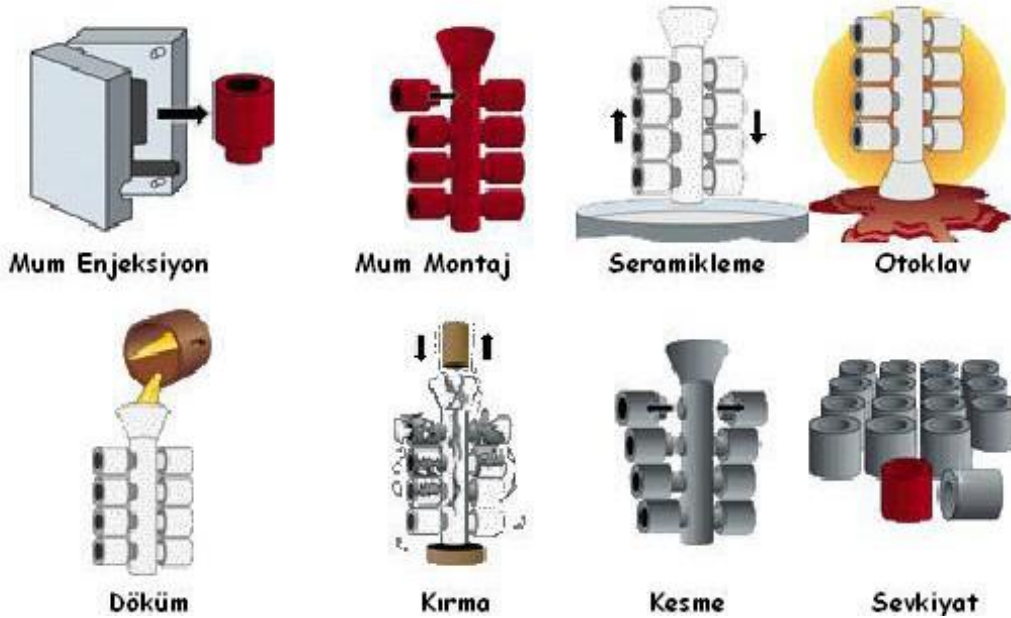
Şekil 6. 1750 Çapında Lost-PLA ile Üretilen Fan Çarkının Dik Torna da İşlenmesi

Hassas döküm yöntemi geniş yelpazedeki alüminyum ve çelik alaşımları başta olmak üzere pirinç ve bronz alaşımlarında sıklıkla kullanılan hammaddeler olarak özellikle heykel alanında karşımıza çıkmaktadır. Maden fanı üretiminde rulman üzerindeki aksel yükleri azaltmak amacıyla hammadde olarak alüminyum alaşımlar başlıca kullanılan malzemeler arasındadır. Özellikle gövde kaplaması bir çeşit pirinç alaşımı olan CuZn29 ile sürtünme ile kıvılcımlanmayı önleyen ETİAL 171 alüminyum alaşımı kömür madenlerindeki ATEX uygulamalarda tercih edilen bir malzeme kombinasyonudur.

3D yazıcılar ile hızlı prototipleme noktasında, 3D yazıcıların kullandığı hammaddeler giderek daha dayanıklı ve son ürüne yönelik hale gelmektedir. Aksel fanlar diğer pompa ya da türbin gibi diğer turbo makine ürünleri ile kıyaslandığında daha az aksel ve radyal yüklere maruz kalmaktadır (maden fanları genellikle 2800-6000 Pa basınç farkı ile çalışmaktadır) (Kingery,

1960). Bu yönüyle aksiyel fanların kanat imalatları Tough PLA ve ABS gibi 3D yazıcı filamentleri ile üretimi mümkün olmaktadır. Mevcut durumda sektör fan ağırlığını azaltma noktasında ağırlıklı olarak alüminyum alaşımları ile daha hafif bir geometri üretmeyi hedeflese, 3D yazıcı filamentleri ile alüminyum kanatlara göre 4'te 1 oranında daha hafif geometriler üretilebilmektedir. Ayrıca bu çalışmanın önemli amaçlarının biri de havalandırması yapılacak hava yolunun direncine özel terzi işi her siparişe özel yeni bir tasarım fikri 3D katmanlı üretim yöntemi ile mümkün olmaktadır.

Konvansiyonel hassas döküm yöntemi Şekil 7'de görülen çeşitli üretim basamaklarından geçmektedir. Hassas döküm, sıvı refrakter bulamaç kullanılarak yapılan, bir dizi işlemde meydana gelmektedir. Bu döküm yönteminde, çevresi oda sıcaklığında sıvı refrakter malzeme ile kaplanan harcanabilir (tekrar kullanılabilir) model kullanılır. Bu model için genellikle mum veya plastik kullanılmaktadır. Konvansiyonel uygulamalar genellikle kum kalıplama ile üretimi zor olan, kalıplanacak model üzerinde çok sayıda ters açı bulunan ve talaşlı imalat yöntemleri ile işlenemeyecek olan yüzeylerinde hassas tolerans veya kozmetik özellikler aranan uygulamalarda tercih edilmektedir. Mevcut üretim tekniği ile daha çok seri imalata yakın bir üretim yöntemidir.



Şekil 7. Hassas Döküm Tekniği İşlem Basamakları

İşlemin genel hatları incelendiğinde, mum veya plastik, çekme toleranslarını da içerecek şekilde bir kalıba basılarak istenen şekil verilir. Bu yolla hazırlanan modeller yolluk etrafına salkım halinde dizilirler. Bu salkım ince bir refrakterle kaplanır. Mum ergitilerek dışarı alınır ve bu ince refrakter yaklaşık 1000 °C civarında sinterlenmektedir. Oluşan bu kabuğa sıcak haldeyken döküm yapılmaktadır. Sonra seramik kabuk kırılarak salkım şeklindeki döküm alınır, kalan seramikler temizlenir, yolluk ve memeler temizlenmektedir. Elde edilen parçanın yüzeyi, diğer döküm yöntemlerine göre çok temizdir ve işlenmeye gerek kalmamaktadır.

Eksiyel fan kanatları tüm eksenlerde oldukça karmaşık bir geometriye sahiptir. Geleneksel olarak kullanılan kuma döküm yöntemde çıkan modeller çeşitli talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmeye ihtiyaç duymaktadır. Burada kullanılan torna, freze, dik işleme merkezlerinde geçen süreler ve kuma döküm için verilen işleme toleransları üretim maliyetlerinin arttırmaktadır.

Hassas döküm yönteminden model talaşlı imalat yöntemleri ile işleme gibi ek üretim yöntemlerine ihtiyaç duymandan kullanılabilir.

Lost PLA yönteminin en önemli avantajlarından biri de imalat süresinin oldukça düşük olmasıdır. Kuma döküm yönteminde bir fan kanadının ahşap modelinin oluşturulması yaklaşık 2-3 hafta sürmektedir. Ahşap modelde kullanılan malzemenin preslenmeli, 3 eksenli ahşap model işleme tezgahı (cnc router) ile temel modelin ve maçaların işlenmesi, vernikleme, boyama ve modelin çalışmasının test edilmesi gibi üretim aşamalarından geçmektedir. Şekil 9'da görülen fan kanat modeli 2.2 kW gücünde 400 mm çapındaki eksenel özellikli bir fana aittir. Kum kalıplama yöntemi için hazırlanan model ortalama 1000-1500 kez deforme olmadan kalıplanabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu özelliği değerlendirildiğinde özellikle seri imalat projeleri için kum kalıplama yöntemi avantajlı olarak düşünülse de maden fanları ile ülkemizde her bir kanat profili ile böyle bir arz talep dengesi olmadığı bilinmektedir. Ana havalandırma fanı noktasında neredeyse her proje özel bir kanat profiline ihtiyaç duyarken, bölgesel tünel havalandırma fanları da havza şartlarına bağlı olarak aynı güçte çok çeşitli debi ve basınç özelliklerindeki kanat profillerine ihtiyaç olduğu tespit edilmektedir. Seri imalata daha uygun olan kum kalıpları kuma kalıplama esnasında otomasyona açık bir yöntem değildir.



Şekil 8. Kum Kalıplamada Kullanılan Ahşap Model

Bu yüzden döküm sonrası süreçte kalite kontrol aşamasında pek çok model orijinal geometri ile çeşitli uyumsuzluklar içerir ve izin verilen tolerans değerleri dışında kalan modeller üretim fitesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Eksenel özellikli fan kanatları imalatına yönelik olarak bazı modifikasyonlar ile geliştirmiş olduğumuz Lost PLA yöntemi hem seri imalata hem de prototip üretime izin verir nitelikte olması yönüyle şebekeye özel fan imalatı noktasında oldukça önemli bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Özetle döküm sonucu elde edilen ürünlerin tekrar işlemeye gerek kalmaması, açay ayarlı fanlardaki gönye üzerindeki açı indikatörler detaylarının dahi döküm

sonucunda elde edilmesi, döküm firesinin az olması ve ölçü toleranslarındaki hassasiyet avantajı bulunmaktadır.



Şekil 9. 3D Yazıcıda PLA Hammaddesi ile Üretilen Çark

3.1 Lost PLA yöntemi ile aksenal özellikli fan kanat imalatı

Lost PLA yöntemi henüz literatüre girmiş ve hassas döküm işlemlerinde sıklıkla başvurulan bir yöntem değildir. Dünyada daha çok start-up firmaların deneyimlediği bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca YouTube da pek çok yabancı girişimci ya da hobi amaçlı olarak döküm yöntemleri ile uğraşan kişiler mevcuttur. Bu çalışma esnasında ülkemizdeki farklı bölgelerde hassas döküm firmaları ile görüşmeler gerçekleştirdim ve sonuçta henüz Lost PLA yöntemini uygulayan bir hassas döküm işletmesi olmadığı tespit edilmektedir. Bu çalışmaya destek olmak ve yöntemi deneyimlenmek için İzmir Kemalpaşa da bulunan Elit Metalurji firması ile iletişime geçerek bir fabrika ziyareti yaptım ve firma ile beraber modeli detaylarına ve hassas döküm için gereken ilave yollukların tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Şekil 10'da 700 mm çapındaki bir fan pervanesinin 1/4 oranındaki fan kanadı, kanat üzerine montajlanmış olarak döküm yolluğu ve seramikten yapılmış döküm haznesi yer almaktadır. Döküm yolluğu ve fan pervanesi tamamen 3D yazıcıda ve PLA hammaddesi kullanılarak üretilmektedir. Şekil 9'daki model tamamen seramik çamuru ile kaplanmaktadır. Bu işlem genellikle 7-8 kez tekrarlanarak ilerler ve model kurumaya bırakılmaktadır.

Şekil 10’da görüldüğü gibi seramik çamuru ile kaplanmış olan fan kanat modeli içerisine ergimiş cevher dökülüyor ve soğuma işleminin ardından seramik kırılarak kanat modeline ulaşılmaktadır. Bu aşamadan sonra seramik artıkları keski yardımıyla tamamen temizlenir ve döküm yollukları kesme taşı ile kesildikten sonra bir sonraki aşama olan kumlama aşamasına geçilmektedir.



Şekil 10. Soğuyan Cevherin Kalıptan Ayrılması Sonucu Elde Edilen Ürün

Şekil 11’de temizlik ve kumlama işlemlerinin ardından elde edilen nihai ürün görülmektedir. Elde edilen ürün tamamen kusursuz bir geometriye sahiptir ve ilk yapılan prototip çalışması yapılan boyutsal ölçümler (lazer tarama metodu ile model taranmıştır) ile katı model arasında belirgin bir ölçü farklılığı oluşmamaktadır. Genel olarak değerlendirme model üzerindeki tüm katı detayları kusursuz bir şekilde çıkmış, 12 spandan oluşan ve neredeyse 90 derecelik twist açısına sahip kanat modeli kusursuz bir şekilde elde edilmiştir. 3 boyutlu yazıcının modeli daha mukavemetli basması için büyük yüzeylere verdiği 0.1 mm’lik baklava desenleri dahi döküm sonucunda elde edilmektedir. Lost PLA yöntemi madencilik endüstri gibi fanların iş olarak kullanıldığı sektörlerde hem prototip hem de seri imalata yönelik bir üretim modeli olmak noktasında gelecek vadetmektedir.

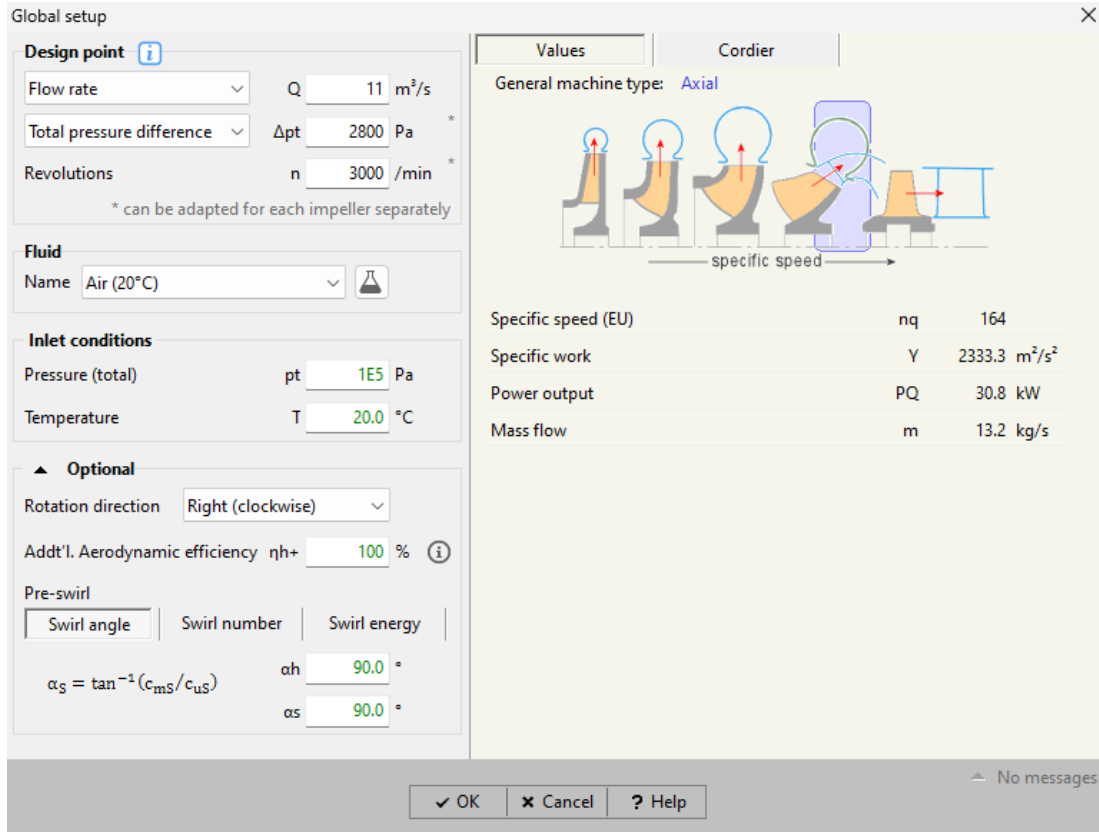


Şekil 11. Hassas Döküm ve Kumlama Sonrası Elde Edilen Son Ürün

4. Cf Turbo Eksenel Fan Kanat Modelleme

Turbo makinaların tasarımı aşamasında kullanılan CF Turbo yazılımı tasarımcıların işini kolaylaştıran pek çok referans tablo, araçlar ve otomatik hesaplama araçlarını içerisinde barındırmaktadır. Ayrıca bu yazılım hesaplamalı akışkanlar dinamiği alanında yoğun faaliyet gösteren Ansys Fluent ve TCFD markaları ile doğrudan entegre olarak çalışabilecek çıktılar ve plug in bağlantılarına sahiptir.

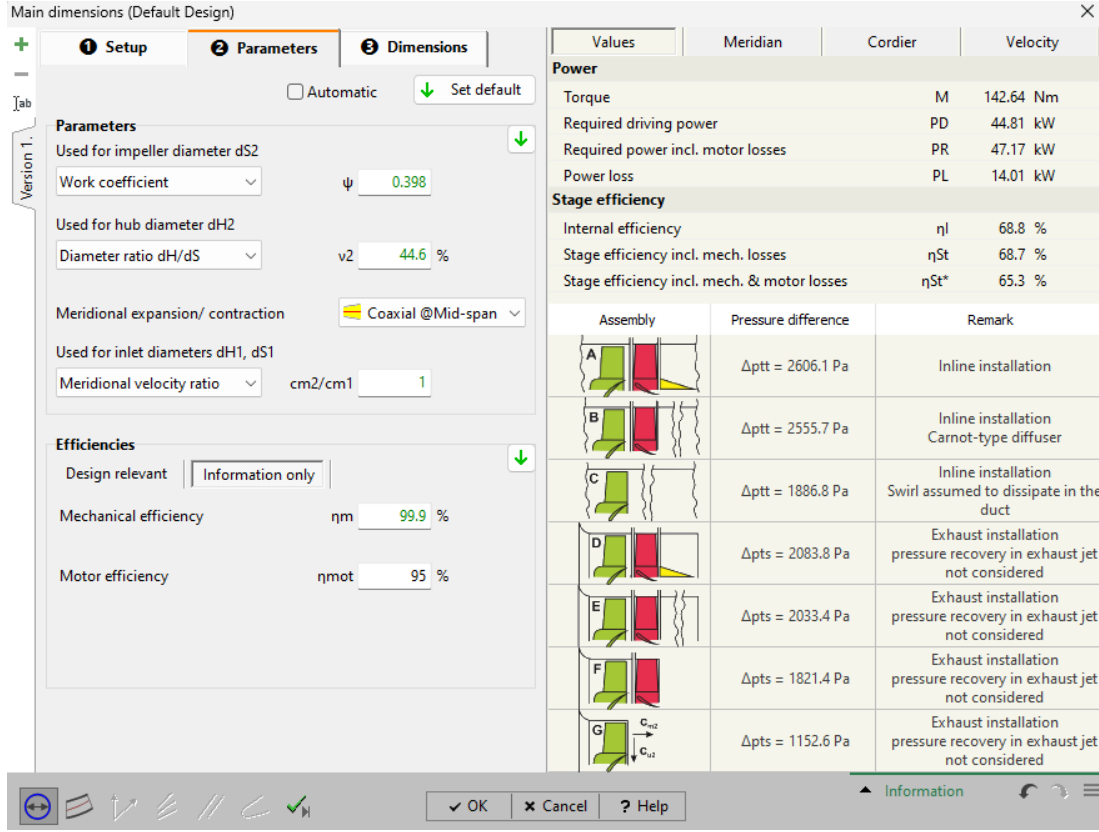
Ayrıca CF Turbo elde edilen kanat profilleri, diğer aksesuar geometrileri Solidworks, AutoCAD gibi katı model araçları için doğrudan 3D uzantılı ve step, stl gibi jenerik çıktılar olarak da üretebilmektedir.



Şekil 12. CF Turbo yazılımı global setup adımı (CF Turbo,2024)

CF Turbo parametrik olarak eksenel fanlarla ilgili bilgileri temel bilgileri girmenizi sağlayan bir ekran ile başlamaktadır. Burada tasarımı yapılacak fanın debi, toplam basınç, motor devri, giriş atmosferik basınç ve sıcaklık şartları, çarkın dönüş yönü, giriş havasının açılı gelmesi durumunda (bazı debi ayarı olan fanlarda inlet guide vane ile debi ayarı hız üçgeninin giriş açısı değiştirilerek yapılabilmektedir.) “swirl angle” açısı tanımlanabilmektedir (Şekil 12). Program temel ayarlar sekmesinde tanımlanan fanın tipi (eksenel, radyal veya karmaşık akışlı), spesifik hız, shaft gücü ve kütle cinsinden debi değeri hakkında bilgileri otomatik olarak hesaplamaktadır.

CF Turbo sadece fan çarkı tasarımı noktasında değil aynı zamanda stator kanatları, giriş ağzı, difüzör gibi ekipmanların tasarımı konusunda da hesaplamalar yapmaktadır. Şekil 12’de aksesuar ve fanın emme ya da basma pozisyonlarına göre üreteceği fark basınç durumları gösterilmektedir. Ayrıca fanın ihtiyaç duyduğu motor gücü ve tork değeri, fan verimi ve Cordier diyagramına uygunluğu da analiz edilebilmektedir.



Şekil 13. Fan üzerinde montaj şekline bağlı fark basınç oluşumu

4.1. Cordier Diyagramı

Fan tasarımının temel adımlarının biri, hatta ilk adımı fanın teknolojisi (eksenel, radyal ya da karmaşık akışlı), çapını ve devir sayısını belirlemektir. Fanlar için Cordier diyagramı yüksek verime sahip bir fan tasarımı için başvurulmuş referans diyagram olarak karşımıza çıkmaktadır.

Cordier diyagramında fanın özgül hızı ile özgül çapı arasındaki değişmeyi göstermektedir. Hedeflenen tasarım noktası için (duty point) değeri aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma = 2\sqrt{\pi n} \frac{\sqrt{Q}}{(2Y)^{3/2}} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D \sqrt{\frac{2Y}{Q^2}}$$

Burada;

Q: Fan debisi (m^3/sn)

Y: Fan özgül enerjisi (m^2/sn^2)

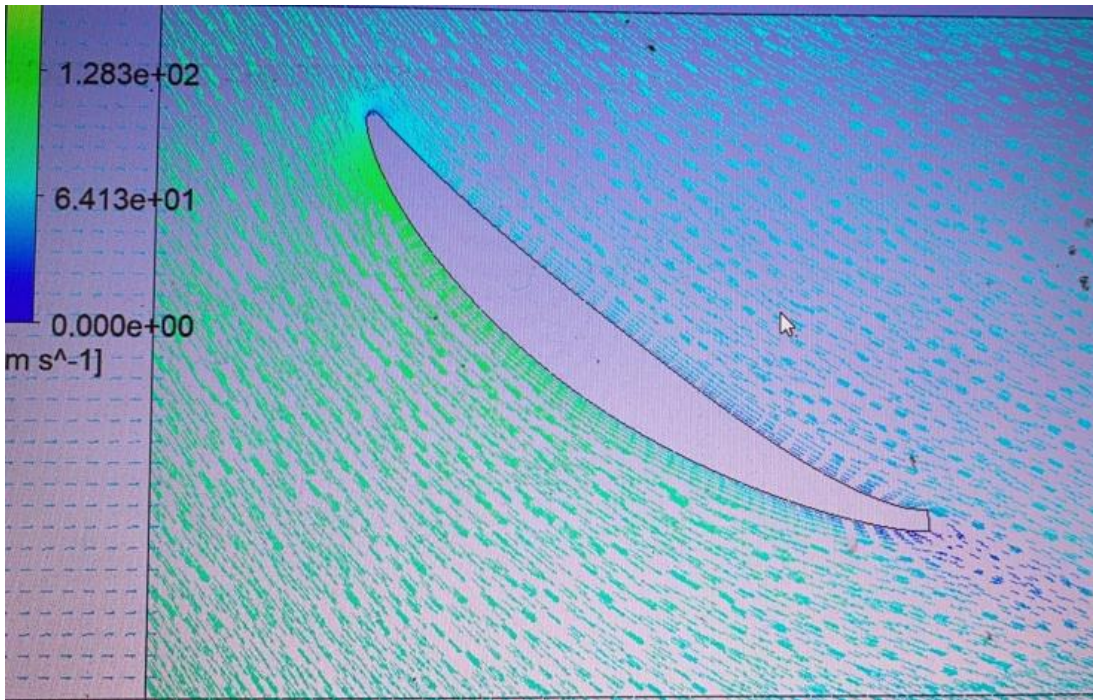
n: Devir sayısı (d/d)

D: Fan çark çapı (m) olarak gösterilmektedir.

Pek çok popüler NACA kanat profili CF Turbo yazılımı içerisinde gömülü olarak bulunmaktadır. Ayrıca program koordinat bazlı olarak yeni kanat profillerinin yazılıma tanıtılmasına da imkan vermektedir. Şekil 15'te fan kanadının aynı profildeki hub, shroud ve mid bölgelerindeki profilleri görülmektedir. Ayrıca bu ekrandan kanat profilinin kanat profilinin kuyruk (trailing edge) bölgesi kalınlığı da ayarlanmaktadır.

4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu

Yapılan tasarımların debi-basınç ilişkileri çözdürmek amacıyla Ansys CFX öğrenci versiyonu ve CFD Support firmasına ait TCFD yazılımları kullanılmıştır. Hem TCFD için hem de CFX için CFTurbo dizayn programının plug-in extension bağlantısı bulunmaktadır. Modelin hub, shroud, inlet, outlet, wall gibi detayları HAD programlarına öğretirken büyük bir kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 16. Tasarım sonucu elde edilen kanadın CFD analizi

Turbomakinaların tasarım ve prototipleme öncesi kullanılmakta olan modelleme ve simülasyon yazılımları popüler bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır (Keklikoğlu, H. 2019). Özellikle yöntemin bu çalışma kapsamında kullanılmasındaki temel amaç aksenel özellikli fan kanatlarının deneysel yöntemle göre daha az maliyetle pek çok muhtemel çalışma noktası için tasarlanarak fan karakteristik eğrilerinin optimize edilebilmesi sağlanabilmektir. HAD sistemi uygulamalarının ucuz ve hızlı olmasının yanında, fan içerisindeki akış bölgesinin tamamı içerisindeki akışı çözerek hız ve basınç alanını vermesi sağlanmaktadır. Bu çalışmada bir HAD aracı olarak Ansys CFX ve ön kanat tasarımı aşamasında CFTURBO Eksenel fan kanat ara yüzleri kullanılmaktadır.

5. Test Fanının Kurulduğu İstasyon

Test fanı 2.2 kW motor gücü 700Pa, 2.2m³/s havalandırma gücündedir. Fanın kurulduğu tesisat 14 metre uzunluğunda 500mm*300mm dikdörtgen şekil özelliklerine sahip bir hava kanalidir. Şekil 17'de görülen işletme Balıkesir Büyükşehir Belediyesi'ne sahip atıksu arıtma tesisidir.



Şekil 17. Burhaniye TM8 Atıksu Arıtma Tesisi

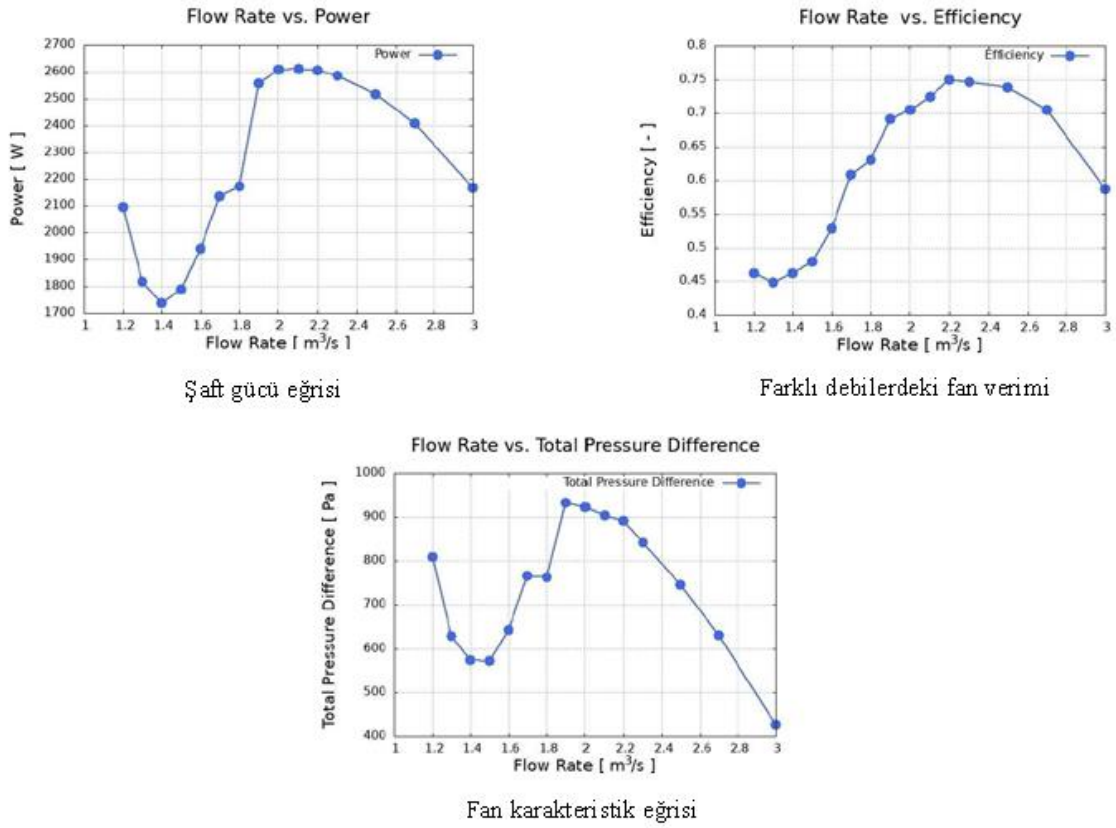
Tesis 4 kattan oluşmakta ve hava kanalı 4. Kata kadar ilerlemektedir. Tesiste madenlere benzer şekilde muhtemel patlayıcı ortam olarak metan, toksik özellikli gaz olarak da hidrojen sülfür gazı oluşumu gözlemlenmektedir. Özellikle tesisi işleten borular, dirsekler, pompa ve tesisat elemanlarında meydana gelen patlaklar esnasında söz konusu gazlar oldukça yüksek konsantrasyonlarda ortamda gözlemlenebilmektedir (McPherson M. 2009).

Havalandırmanın çalışmadığı durumda tesis içerisinde laminar bir akış gözlenmekte ve tesiste açığa çıkan hidrojen sülfür gazı özgül ağırlığı sebebiyle pompaların bulunduğu alt katta, metan gazı da daha üst katlarda birikmektedir.

Şekil 18’de bu çalışmanın konusu üretimi yapılan eksenel fan görülmektedir. Fan tesis dışına temiz havaya kurulmaktadır. Fanların kendi havalarını emmesini ya da basmasının önüne geçmek amacıyla (recirculation) fanlar tesis girişinden en uzak noktaya montajlanmaktadır. Şekil 19’da fanların shaft gücü, farklı debilerdeki verimleri ve karakteristik eğri grafikleri verilmiştir.



Şekil 18. Çalışma Kapsamında TM8 İstasyonu için Üretilen Eksenel Fan



Şekil 19. Fanın shaft gücü, farklı debilerdeki fan verimi ve karakteristik eğri grafikleri

6. Sonuçlar

TM8 istasyonunda çalışan fanlar geniş bir çalışma bölgesi için tükettiği enerjiyi %70 ve üzerini havalandırma gücüne çevirerek oldukça verimli bir havalandırma sistemi tesis edildiği görülmektedir. Tesisat zerinden HAD sonuçlarına göre tasarım değerleri olan 2.2m³/s, 800 Pa değeri, TM8 istasyonunda yapılan saha ölçümleri ile de benzerlik göstermektedir. Hava akışının laminerden türbülanslı akıma geçmesi sonrasında ortamdaki etkili havalandırma ile hidrojen sülfür gazının toksik etkilerini tamamen ortan kaldırmaktadır. Personelin zel nitelikte bir kıyafet giymesine ya da tam yüz maskesi kullanarak çalışmasına gerek kalmadığı gözlemlenmektedir. Temiz havanın ortama doğru şekilde verilmesi ayrıca çalışma ortamındaki kaynak dumanı gibi zehirli gazlarından ortamdan seyreltilmesine yardımcı olmaktadır.

KAYNAKLAR

Euler D.S., & Philip D., 2019. Auxiliary mine ventilation manual version 2.0. Workplace Safety North Books.

Gyamfi, S., 2020. Considerations and development of a ventilation on demand system in konsuln mine [Doktora Tezi]. University of Lulea.

Keklikoğlu, H., 2019. Design, construction and performance evaluation of axial flow fans [Yüksek Lisans Tezi]. Midde East Technical University.

Komurlu, E., Kesimal, A., Aksoy, C.O., 2017. Use of Polyamide-6 type Engineering Polymer as Grouted Rock Bolt Material. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, Vol. 3, Paper no: 37, <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0114-6>

Kingery, D.S., 1960. Behave: Introduction to mine ventilating principles and practices. United States Government Printing Office

McPherson M., 2009. Subsurface ventilation engineering manual. SRK Consultancy Review Book Stores