



# **Yeni Tasarlanmış Bir Ark Ocağında Enerji Veriminin CFD Analizi İle Geliştirilmesi**

**Program Kodu: 3001**

**Proje No: 216M295**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Ekrem BÜYÜKKAYA**

Araştırmacılar:

Dr. Öğr. Üyesi Hasan KÜÇÜK

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan COŞKUN

EKİM 2018  
SAKARYA



## ÖNSÖZ

Sanayi tipi elektrik ark ocağındaki (EAO) hurdanın, ergime sıcaklığına çıkarılabilmesi için büyük miktarda kimyasal enerjiye ve elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Dünyada toplam çelik üretim kapasitesi 1,5 milyar ton/yıl olduğu düşünülürken küçümsenmeyecek kadar yüksek tüketimlerin olduğu görülmektedir. Günümüzde ergitme süresini azaltan ve enerji maliyetini düşüren çözümler kadar EAO'ların verimlerini arttırmak için kimyasal enerjiden daha fazla faydalanılması da önemlidir. Bu projede, EAO'nda ısı ve enerji kaybını azaltıp verimi artırmak için ergitme işlemini durdurmadan sürekli hurda ilavesi yapılabilecek, yeni tasarım bir EAO'nun enerji üretim sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Proje çalışmaları **TÜBİTAK-Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nun** desteğiyle gerçekleştirilmiştir.

Proje çalışmasında kullanılan EAO geometrisi **CVS Teknolojileri Firmasından** alınmıştır.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
Önsöz	ii
İçindekiler	iii
Tablo Listesi	iv
Şekil Listesi	v
Özet	viii
Asbstract	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
3. GEREÇ VE YÖNTEM	8
4. MODELLEME ÇALIŞMALARI	12
4.1 Klasik EAO Modelinin Ağ Yapısı, Eleman Sayısının Seçimi ve Sınır Şartları	12
4.2 Yeni Tasarım EAO Modelinin Ağ Yapısı, Eleman Sayısının Seçimi ve Sınır Şartları	19
4.3 Enjektör Optimizasyon Parametreleri	26
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
5.1 Klasik Geometriye Sahip EAO İçin Doğrulama Çalışması Sonuçları	27
5.2 Yeni Tasarım EAO İçin Simülasyon Çalışması Sonuçları	35
5.2.1 Optimizasyon Çalışması	35
5.2.2 Enjektörlerin Merkezi Açısı (EMA)	38
5.2.3 Püskürtme Açısı	42
5.2.4 Enjektör Uzunluğu	45
5.2.5 Enjektör Optimizasyonu	48
5.2.6 Optimum enjektör konum değerlerin EAO içerisinde enerji dağılımına etkilerinin incelenmesi	53
5.3 Yeni Tasarım EAO'nın LES Türbülans Modeline Ait Simülasyon Sonuçları	55
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
Kaynaklar	67



## TABLO LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 4.1. EAO'na enjekte edilen kömür partiküllerinin boyutları	17
Tablo 4.2. Gaz fazındaki reaksiyonlar	19
Tablo 4.3. Kömür partiküllerinin oksidasyonu	19
Tablo 4.4. Farklı boyutlar kullanılarak oluşturulan modellerin toplam eleman sayıları	22
Tablo 4.5. Yeni Tasarım EAO'nun analizinde uygulanan komutlar	25
Tablo 5.1. Response Surface Optimizasyon metodu ile oluşturulan 14 adet optimizasyon modeli	49
Tablo 5.2. Eriyik yüzey sıcaklığının ve eriyiğin içerisine giren karbon miktarının maksimum olma durumuna göre elde edilen optimum veri noktaları	53
Tablo 5.3. EAO simülasyonlarındaki ısıl denge ve optimizasyon ile enerji kazanımı	54

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Eriyiğe karbon ve oksijen enjeksiyonu ile CO oluşum mekanizması	10
Şekil 4.1. Klasik EAO geometrisine üçgensel ve polihedral ağ yapılarının uygulanması	12
Şekil 4.2. Enjektör simetri düzlemde jet hız profilinin, ağ yapısı ve eleman sayısı ile değişimi	13
Şekil 4.3. Bacadan çıkan CO <sub>2</sub> kütle oranının ağ yapısı ve eleman sayısı ile değişimi	14
Şekil 4.4. EAO'na yakıt ve hava girişini sağlayan ve eş eksenli iki silindir şeklinde tanımlanan enjektör modeli	15
Şekil 4.5. Yeni tasarım EAO'da enjektör konum parametrelerinin optimizasyon adımı	20
Şekil 4.6. Yeni tasarım EAO'nun üçgensel ağ yapısı kullanılarak oluşturulan model	21
Şekil 4.7. Yeni tasarım EAO'nun sayısal modeli için sınır şartları	21
Şekil 4.8. Bacadan çıkan ve ocak içerisindeki CO <sub>2</sub> kütle oranının eleman sayısı ile değişimi	23
Şekil 4.9. Yeni tasarım EAO'nun modelinin polihedral ağ yapısı	24
Şekil 4.10. EAO'nun enjektör optimizasyon parametreleri; EMA P1, püskürtme açısı P2, enjektör uzunluğu P3	26
Şekil 5.1. Enjektör 1'in düşey ekseninden geçen simetri düzleminde alınan; (a) O <sub>2</sub> , (b) karbon (kömür enjeksiyonu), (c) CO <sub>2</sub> , (d) CO, (e) H <sub>2</sub> O ve (f) H <sub>2</sub> 'in 2-boyutlu konantrasyon dağılım görüntüleri.	30
Şekil 5.2. Enjektör 1'i düşey kesen iki boyutlu bir yüzeyden alınan hız dağılımı	31
Şekil 5.3. Enjektör 1'i düşey kesen iki boyutlu bir yüzeyden alınan sıcaklık dağılımı	32
Şekil 5.4. Eriyik üst yüzeyindeki (a) CO <sub>2</sub> , (b) CO, (c) O <sub>2</sub> ve (d) yüzey sıcaklığı dağılımları	34
Şekil 5.5. Radyasyon sıcaklığı için 2 boyutlu yüzeylerden alınan görseller	34
Şekil 5.6. Enjektörlerden gönderilen karbonun, oksijen jeti ile sürüklenirken gaz fazına geçmesi ve eriyik yüzeyine ulaşması	35
Şekil 5.7. Farklı EMA ile konumlandırılmış enjektörlere ait EAO modellerinde eriyik yüzeyindeki ortalama statik sıcaklığın çözümdeki iterasyon sayısı ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)	36

Şekil 5.8. Farklı iterasyon aralıklarından ortalama alınarak hesaplanan ortalama yüzey sıcaklığının EMA ile değişimi (püskürtme açısı:45°, enjektör uzunluğu:300mm)	36
Şekil 5.9. İterasyon aralıklarının ortalama eriyik yüzey sıcaklığına etkisi	37
Şekil 5.10. Eriyik yüzeydeki ortalama sıcaklık ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızın EMA ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)	39
Şekil 5.11. Bacadan çıkan gazların kütle oranlarının EMA ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)	40
Şekil 5.12. Eriyik yüzeyi üzerindeki gazların kütle oranlarının EMA ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)	41
Şekil 5.13. EAO içerisindeki dpm ve eriyik yüzeyinden geçen kütle miktarının EMA ile değişimi (enjektör uzunluğu=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)	41
Şekil 5.14. Eriyik yüzeydeki ortalama sıcaklık ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızın püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)	42
Şekil 5.15. Bacadan çıkan gazların kütle oranlarının püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)	43
Şekil 5.16. Eriyik yüzeyi üzerindeki gazların kütle oranlarının püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)	44
Şekil 5.17. EAO içerisindeki dpm ve eriyik yüzeyinden geçen kütle miktarının püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)	44
Şekil 5.18. Eriyik yüzeydeki ortalama sıcaklık ve eriyik yüzey üzerindeki ortalama hızın enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)	46
Şekil 5.19. Bacadan çıkan gazların kütle oranlarının enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)	46
Şekil 5.20. Eriyik yüzeyi üzerindeki gazların kütle oranlarının enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)	47
Şekil 5.21. EAO içerisindeki dpm ve eriyik yüzeyden geçen kütle miktarının enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)	47
Şekil 5.22. a)Eriyik yüzey sıcaklığının püskürtme açısı ve EMA ile değişimi, b)eriyik yüzey sıcaklığının EMA ve enjektör uzunluğu ile değişimi (sağ ve sol)	50
Şekil 5.23. a) Eriyiğe giren karbon kütle oranının püskürtme açısı ve EMA ile değişimi, b)eriyiğe giren karbon kütle oranının EMA ve enjektör uzunluğu ile değişimi (sağ ve sol)	51
Şekil 5.24. a) Bacadan çıkan O <sub>2</sub> kütle oranının püskürtme açısı ve EMA ile değişimi, b)eriyiğe giren karbon kütle oranının EMA ve enjektör uzunluğu ile değişimi (sağ ve sol)	52

Şekil 5.25. Ele alınan performans parametrelerinin optimizasyon parametrelerine hassasiyetleri	53
Şekil 5.26. Enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu düzlemde hız dağılımı	56
Şekil 5.27. Enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu düzlemdeki tüm EAO'nun ve enjektör 1'e doğru yakınlaştırılmış bölgede O <sub>2</sub> (üstte) ve CO <sub>2</sub> 'nin (altta) kütleli oranlarının dağılımı	57
Şekil 5.28. Enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu düzlemde tüm EAO'nun (üst) ve enjektör 1'e doğru yakınlaştırılmış (alt) sıcaklık dağılımı	58
Şekil 5.29. Eriyik yüzeyindeki CO, CO <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> 'nin kütleli oranları	59
Şekil 5.30. Eriyik yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	60
Şekil 5.31. RANS ve LES türbülans modelleri ile elde edilen silindir için hız dağılımları (Mally vd. 2018)	61

## ÖZET

Tamamlanan projede, ısı ve enerji kaybını azaltarak verimi artırmak amacıyla ergitmeyi durdurmadan sürekli hurda şarjı yapılabilen yeni tasarım bir elektrik ark ocağında (EAO), enjektör konum parametreleri optimize edilmeye ve EAO'nun enerji verimi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, ANSYS hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak, EAO'ndaki yanma, ısı ve kütle geçişi gibi çok karmaşık süreçlerin sayısal bir modeli kurulmuştur. Bu sayısal model ile yapılan simülasyonlardan; EAO'daki yanma ve elektrik arki ile enerji üretimi, eriyiğe, yan duvarlara ve üst kapağa, iletim, taşınım ve ışınlama olan ısı geçişleri ve bacadan olan ısı kayıpları sürekli rejim şartlarında hesaplanmıştır.

Öncelikle kurulan sayısal model ve yapılan kabuller, klasik EAO modelinden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak, doğrulanmıştır. Ele alınan enjektör konum parametreleri, enjektörlerin merkez açısı (EMA: 40°-110°), enjektörlerin püskürtme açısı (20°-50°) ve enjektörlerin uzunluğu (200-700 mm) geniş bir aralıkta değişmektedir.

Bu nedenle, nihai optimizasyon çalışmasından önce yapılan parametrik analizlerde, ele alınan enjektör konum parametreleri için aralıklar daraltılmıştır (EMA: 60°-80°, püskürtme açısı: 35°-45°, enjektör uzunluğu: 250-400 mm). İkinci aşamada ise yazılımda mevcut olan Response Surface Optimizasyon (RSO) yöntemi kullanılarak, ele alınan parametrelerin optimum değerleri belirlenmiştir. Optimizasyonda, doğrudan yazılım ile hesaplanabilen, eriyik yüzeyinin ortalama sıcaklığının ve eriyiğe giren kütle miktarının maksimum olması hedeflenmiştir. Nihai optimizasyon çalışmasında elde edilen optimum enjektör konum parametreleri EMA için 80°, püskürtme açısı için 35° ve enjektör uzunluğu için 400 mm olarak belirlenmiştir.

Elde edilen optimum enjektör konum parametreleri ile klasik EAO'nda kullanılan standart enjektör konum parametreleri (EMA: 70°, püskürtme açısı: 45°, enjektör uzunluğu, 300 mm) için yapılan sayısal çözümlerin sonuçlarına göre; sistemdeki toplam enerjinin %9.5'i yanma reaksiyonlarından sağlanırken %18'i ışınlama ve taşınım yoluyla eriyiğe geçtiği belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması neticesinde yeni tasarım EAO'nda yanma ile ortaya çıkan enerjide yaklaşık %30'luk bir artış, eriyiğe geçen ısı miktarında ise yaklaşık %10'luk bir iyileşme olmuştur.



## ABSTRACT

In the completed project, the injector location parameters were optimized and the energy efficiency of EAF was improved in a newly designed electric arc furnace (EAF) which can be continuously scraped without stopping the melting in order to increase the efficiency of EAF by decreasing the heat and energy losses. For this, a numerical model of very complex processes in EAF such as the combustion and the heat and mass transfer was set by using ANSYS computational fluid dynamics (CFD) software. Energy production by combustion and electric arc in EAF, heat transfer to the melt surface, side walls and top cover by conduction, convection and radiation and heat losses from the flue were calculated under continuous regime conditions with simulations made by using this numerical model.

Firstly, the numerical model and the assumptions were verified by comparing the results obtained from the classical EAF model with the results in the literature. The discussed injector position parameters, the center angle of the injectors (CAI: 40°-110°), the spray angle of the injectors (20°-50°) and the length of the injectors (200-700 mm) vary in a wide range.

Therefore, the intervals for the injector position parameters were narrowed (CAI: 60°-80°, spray angle: 35°-45°, length of injectors: 250-400 mm) by the parametric analysis performed before the final optimization study. In the second stage, the optimum values of the parameters considered were determined by using Response Surface Optimization (RSO) method in the software. In optimization, it is aimed that the average temperature of the melt surface and the amount of mass entering the melt, which are calculated directly by the software, are the maximum. The optimum injector position parameters obtained in the final optimization were 80° for the EMA, 35° for the spray angle and 400 mm for the injector length, respectively.

Results of the numerical solutions for the conventional EAF with the injector position parameters (CAI: 70°, spray angle: 45°, length of injectors: 300 mm) were obtained as 9.5% of total energy production provided by combustion, and %18 of the energy passing through the melt by radiation and convection. As a result of the optimization study, the new design has shown about 30% increase in the energy generated by combustion in EAO, and an improvement of about 10% in the amount of heat passing through the melt.



## 1. GİRİŞ

Sanayi tipi EAO'daki hurdanın, ergime sıcaklığına çıkarılabilmesi için büyük miktarda kimyasal enerjiye ve elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Dünya çelik üretiminin yaklaşık %30'u EAO'lı tesislerde yapılmaktadır. Yüksek kapasiteli modern bir ocak her yüklemde maksimum 350 tona kadar hurda işleyebilir. Bu işlem yaklaşık 50-60 dakika sürer ve EAO'da üretilen her ton çelik için yaklaşık 6-8GJ enerji tüketilir. Bu tüketim entegre tesislerde yapılan çelik üretimi esnasındaki tüketimin yarısı olmakla birlikte, 100 bin nüfuslu bir şehrin elektrik enerjisi tüketimine eşdeğerdir. Dünyada toplam çelik üretim kapasitesi yaklaşık 1,5 milyar ton/yıl olduğu düşünüldüğünde küçümsenmeyecek kadar yüksek enerji tüketimlerinin olduğu görülmektedir. EAO'ların daha az elektrik enerjisi ve daha verimli yanma stratejisi ile çalışmasını sağlamak, kaynakların verimli kullanılması açısından önemlidir. Demir çelik sektörü için ergitme süresini azaltan ve ergitmede ton başına maliyeti düşüren çözümler ile birlikte EAO'ların verimlerini arttırmak için tasarımda birçok hedefin bir arada gözetilmesi gerekmektedir. EAO tasarımında dikkate alınması gereken hususlardan bazıları; kimyasal enerjiden daha fazla faydalanılması, istenilen anda yüksek gücün elde edilebilmesi, ergitme işlemi sırasında ilave edilen hurda malzemenin enerji kaybına sebep olmadan ocağa yüklenebilmesi, ön ısıtmada gerekli brülör sayısının, konumunun ve püskürtme açılarının belirlenmesi, ocak içerisindeki sıvı akışkanın hızlı ve ideal şartlarda boşaltılması şeklinde sıralanabilir. EAO'da gerekli enerjinin yaklaşık %60-65'lik kısmını elektrik enerjisi oluşturmaktadır. %30-35'lik kısmı ise kimyasal enerji ile sisteme verilmektedir. İlave yükleme sırasında kapağın açılmaması ve eriyiğe karbon enjeksiyonu ile köpüklü cüruf oluşturarak çalışılması durumunda, elektrik enerjisi yerine kimyasal enerji kullanımında %4-5'lik bir artış sağlandığı bilinmektedir. Elektrik enerjisinin önemli bir bölümü hurdanın ergitilmesinde harcanmaktadır. Elektrik enerjisinden tasarruf ancak ocakta ergime sağlanıp, elektrotlar cürufa gömülü çalışırken, kimyasal enerji üretiminin arttırılması ile sisteme ekstra enerji girdisi yapılarak sağlanabilir.

Bu proje kapsamında, elektrik ark ocaklarında ısı ve enerji kaybını azaltıp verimi arttırmak için ergitme işlemini durdurmadan sürekli hurda ilavesi yapılabilecek, 70 ton kapasiteli yeni tasarım bir EAO'nun enerji üretim sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, EAO süreçlerini şeffaf, anlaşılır ve güvenli hale getirmeye ve iyileştirme potansiyeli olan alanları belirlemeye yardımcı olduğundan ANSYS hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanıldı. Böylece eriyik üzerinde kalan bölgede, yanma ve elektrik arki ile enerji üretimi, üretilen enerjinin eriyiğe ve fırın duvarlarına transferi modellenerek simülasyon çalışmaları yapıldı.



Geleneksel EAO'larında bir çevrimde birden fazla hurda ilavesi, üstte bulunan tek kapağın açılıp kapanması ile yapılır. Geleneksel ocaklarının, her hurda ilavesinde ergitme işlemi durdurulduğundan; ergime süresinin uzaması ve ocak üst kapağının açılması ile büyük miktarda ısı ve enerji kaybı, etrafa zehirli gaz ve tozların yayılması gibi dezavantajları vardır. Ocaklardan bu yolla kaybolan ısı enerji miktarı ise 10-20 kW-h/ton mertebelerindedir. Proje destekçisi firma tarafından gerçekleştirilen yeni tasarımda, hurda ilavesi önemli enerji kaybına neden olan ana kapak yerine, ana hurda haznesine bağlanmış yan hurda besleme deliğinden yapılabilir. Ergitmeyi durdurmadan sürekli hurda ilavesinin yapılabilmesi için dairesel olan ocak geometrisi elips şeklinde değiştirilmiştir. Bu proje kapsamında, destekçi firmanın tasarladığı yeni EAO'nun enerji verimini geliştirmeye yönelik tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirildi.

Proje çalışmalarında, verim artışı ve ek kimyasal enerji sağlanmasında önemli rolü olan brülörlerin, ocak içerisine yerleşimini tanımlayan; çevresel konum açılarının, eriyik yüzeyine göre enjektör püskürtme açılarının optimizasyonuna yönelik parametrik tasarım ve simülasyonlar yapıldı. EAO'da enerji girdileri hesaplanırken; brülörlerden ve üfleme borusu manipülatöründen üflenen toplam oksijen miktarı, yükmeden gelen toplam karbon enjeksiyonu ve toplamda çıkan kimyasalların hesaplanması önem arz eder. Yeni tasarım EAO, geleneksel silindirik EAO'dan farklı bir geometrik şekle (elips) sahip olduğundan, ocak içerisinde soğuk bölgelerin oluşabileceği değerlendirilmektedir. Bu soğuk bölgelerin ortadan kaldırılması için ek kimyasal enerji girişinde önemli rolü olan brülörlerin, EAO içerisine karbon ve oksijen girişini sağlayacak enjektörlerin konumunun belirlenmesi oldukça önemlidir. Çünkü eriyik hacmine giren toplam ısı enerjisi miktarını artırmanın; eriyik içerisinde oluşabilecek soğuk bölgelerin giderilmesi, köpüklü cüruf oluşturarak eriyik yüzeyinde bir yalıtım tabakasının oluşması ve daha kaliteli çelik elde edilmesi bakımından önemli olduğu bilinmektedir (Sanchez vd., 2012; Kipepe ve Pan, 2014; Rahman, 2010). Bunun için projemizde; enjektörlerin birbirleri arasındaki mesafelerin ve EAO yan duvarlarında yatay düzlemdeki konumları için optimizasyon çalışmaları yapılarak, enjektörlerin merkezi açısı (EMA), enjektörlerin püskürtme açısı, enjektörlerin uzunluğu ve eriyik yüzeyinden yükseklik parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmalarda, enerji etkinliği dikkate alınarak eriyik yüzeyinde üniform sıcaklık dağılımının sağlanması ve optimum değerlerin belirlenmesinde; sayısal modellemede etkin bir optimizasyon yöntemi olan Response Surface Optimization (RSO) metodu kullanılmıştır.

EAO verimini arttırmak için yapılması gereken sayısal çözümler; proseste ortaya çıkan ısı ve kütle transferi, akış, elektromanyetizma, yakıt enjeksiyonu ve yanma kimyası gibi fiziksel



olayların çözümünü gerektirmektedir. Aynı anda oluşan fiziksel ve kimyasal olayların eşzamanlı çözümlenmesi için karmaşık hesaplama yöntemleri gerekir. Fakat sıfır boyutlu denklemlerle bu tip çözümlerin çok zor olmasından dolayı üreticiler, EAO verimine yönelik çalışmalarda genellikle deneme yanılma stratejisine dayalı yöntemleri kullanmayı tercih etmektedirler. Fakat üretimlerinin çok maliyetli olması ve uzun sürmesi nedeniyle optimizasyon çalışmaları çok yavaş ilerlemekte, ticari amaçlı üretimi gerçekleştirilen bir ocakta öngörülen düzeltmelerin etkileri ancak imalatı biten bir sonraki ocakta test edilebilmekte ve bu durum üretici için büyük bir risk taşımaktadır. Son yıllarda hızla gelişen yazılım ve bilgisayar teknolojisi, birçok fiziksel ve kimyasal olayın, aynı anda işlenmesi gereken karmaşık modellerin sayısal olarak çözümlenmesini sağlayabilmektedir. Bu sayede verim üzerine yapılan çalışmalar, çeşitli yazılımlar ve gelişmiş bilgisayarlar yardımıyla, daha hızlı, ekonomik ve çok sayıda parametre ele alınarak yapılabilmektedir. Bu yazılımlardan biri olan HAD, çalışma mantığı ve uygulama stratejisi bakımından hızlı ve güvenilir bir modelleme yöntemi olarak bilinmektedir. Akış hacmi içerisinde elektrik arkı oluşumunun ve yanma olayının aynı anda modellenmesi, yapılacak modelleme çalışmasında HAD yönteminin tercih edilmesinin başlıca nedenlerindedir. Geleneksel ark ocaklarında, belli aralıklarla yapılan hurda yüklemesi için açılan kapaktan, aşırı derecede ısı kaybı dolayısıyla enerji tüketiminde ve salınan emisyonlarda önemli artışlar olduğu bilinmektedir. Bu nedenle proje kapsamında, geleneksel ve yeni tasarım EAO'da yanma sonrası açığa çıkan gazlar (C, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) belirlenerek yeni EAO'nun enerji üretim sistemindeki iyileştirmelerin, kirletici bileşenler üzerindeki etkileri de araştırıldı.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

EAO 'nda deneysel çalışma için gerekli düzeneklerin kapsamlı, çok pahalı olmaları ve güvenlikle ilgili nedenlerden dolayı literatürde deneysel bir çalışmaya rastlanmamıştır. Teorik çalışmaların sayısı ise oldukça azdır. Kompleks fiziksel olayların hesaplanmasında HAD yönteminin yaygınlaşmaya başladığı yıllarda, EAO modellemesi ile ilgili ilk çalışmalar Ushio vd. (1881) ve daha sonra McKelliget vd. (1893) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda bir DC EAO sisteminde, ark ve hazne bölgeleri Navier Stokes, enerji korunumu ve Maxwell denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmalar, farklı ısı transferi modelleri kullanılarak, arkta hazneye olan enerji geçişinin HAD ile modellendiği ilk araştırmalardır. Alexis vd. (2000) DC EAO sisteminde plazma sıcaklığı, basınç ve hızı hesaplamak için enerji, kütle ve momentum korunum denklemleri ile birlikte Maxwell denklemlerini de kullanmışlardır. Sayısal çözümlerden; arkta çıkan enerjinin %18'inin doğrudan haznedeki sıvı metale ulaştığı ve %2'lik bir kısmı da elektrotun absorbe ettiği, geriye kalan %80'lik kısmın ise radyasyon enerjisi olarak EAO içerisine yayıldığı belirlenmiştir.

Tamamlanan projemizde, EAO'daki termokimyasal olaylar sonucu açığa çıkan enerjinin doğru tespiti için enjekte edilen kömür partikülünün katı ve gaz fazları için üçer adet olmak üzere toplamda altı yanma reaksiyon adımı simülasyonlarda kullanılmıştır.

Guo ve Irons (2003), tipik bir endüstriyel EAO içerisindeki radyasyon enerjisi dağılımını tespit etmek için 3-boyutlu bir model üzerinde HAD yöntemini kullanmışlardır. Modelledikleri EAO geometrisi; silindirik bir üst gövde içinde üç adet elektrik ark kaynağı ve alt kısmı silindirik bir gövdeye bağlı hazneden oluşmaktadır. Araştırmacılar radyasyon enerjisinin eriyik içindeki dağılımını belirlemek için 3-boyutlu modele eriyik hacmini de eklemiştir. Yaptıkları modelleme çalışması ile yan çeper yansıtıcıları, su ile soğutulan yan yüzeyler ve ocak çatısındaki radyasyon enerjisi dağılımını tespit etmişlerdir. Sayısal hesaplamaların sonucunda, grafit elektrotların en yüksek ortalama sıcaklığının 3600 K olduğunu ve sabit çalışma koşullarında kullanılan elektrik enerjisinin en fazla %5,5'inin elektrotlarda absorbe edildiğini belirlemiştir. Ayrıca elektrotlardan iletim ile olan ısı kaybının toplam elektrik enerjisinin sadece %0,3'lük bir kısmı olduğunu hesaplamışlardır. Bu projemizde, Guo ve Irons (2003) tarafından yapılmış çalışmadan farklı olarak eriyik kısmının da modele eklenerek radyasyon enerjisinin eriyik yüzeyindeki dağılımı da incelenmiştir.

EAO'ların enerjisinin büyük bir kısmı elektrik arkı ile sağlanırken karbon yanması ile takviye edilmektedir. Enjektörlerden yüksek hızla verilen karbonun yanması; eriyiğin içlerine doğru

nüfuz ederek kimyasal enerji katkısı ve karıştırma etkisi ile eriyiğin üniform yüksek sıcaklıklarda kalmasını desteklemekte, aynı zamanda metal eriyiğinin içerisine bir miktar yanmamış karbon girişini de sağlayarak alaşım oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Bilindiği üzere yanma reaksiyonlarının HAD ile modellenmesi oldukça karmaşık bir çözümlene tekniği gerektirmektedir. Story ve Fruehan (1998) ile Eastep ve Fruehan (2000) tarafından yanma sonrası reaksiyonlarını içeren kimyasal modeller üzerine çalışmalar yapılmıştır. Li ve Fruehan (2003) çalışmalarında üç adet elektrotun bulunduğu fakat haznenin modele eklenmediği silindirik bir EAO için 3-boyutlu bir model kullanmışlardır. Bu model üzerinden detaylı bir HAD analizi ile EAO'larındaki yanma sonrası reaksiyonlarını, akış, radyasyon ve konvektif ısı geçişini eşzamanlı çözmeyi başarmışlardır. HAD analizi sonucunda sistem içerisine giren enerjinin büyük kısmının radyasyon (EAO yan duvarları ve üst kapak) ve baca gazları ile sistemden çıktığını ayrıntılı sayısal verilerle tespit etmişlerdir. Ayrıca baca gazları ile sistem dışına çıkan enerjinin, üretilen toplam enerjinin %30'u olduğunu tespit etmişlerdir. Toplam enerjinin %12'lik kısmının ışınlama yoluyla metal eriyiğine aktarıldığını, % 56'lık kısmının ise yine ışınlama EAO'nun yan ve üst duvarlarına geçtiğini tespit etmişlerdir. Li ve Fruehan (2003) her ne kadar birçok fiziksel ve kimyasal olayı kapsayan bir EAO modeli kurmuş olsalar da yanma için gerekli tüm reaksiyonlar yerine sadece yanma sonrası reaksiyonlarıyla çözüm yapabilmıştır. Tamamlanan proje çalışmasında, literatürden farklı olarak yanmanın tüm aşamaları çözüme katılmış, akış ve ısı geçişi gibi diğer fiziksel olaylar bir arada çözümlenmiştir.

Campolo vd. (2007) EAO'larına süpersonik hızlarda karbon enjekte edebilen bir sistemi HAD ile modellemişlerdir. Enjekte edilen yakıtın yanmasını kimyasal reaksiyonlar kullanarak modellemişler ve süpersonik hızda gerçekleşen yanmayı detaylı bir şekilde incelemişlerdir.

Son yıllarda bilgisayar destekli simülasyon yazılımları ile optimizasyon çalışmalarının güvenilirliği oldukça artmış ve bu yazılımlar birçok çalışmada sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Projemiz çalışmalarında kullanılan ANSYS yazılımı içerisinde HAD çözümleriyle birlikte çalışabilen optimizasyon yöntemleri ile farklı konularda yapılmış optimizasyon çalışmaları literatürde mevcuttur (Abdelhamed vd. 2015; İsmail vd. 2014; Benajes vd. 2016). Ancak literatürde EAO'larında yanma ve enerji verimliliğinin artırılması için yapılan optimizasyonlarda, enjektörlerin yerleşim geometrisinin (konumu ve açısı) optimizasyonu amacıyla HAD analizleriyle etkileşimli olarak yürütülmüş herhangi bir optimizasyon uygulamasına rastlanmamıştır. Bu projede RSO yöntemi kullanılarak optimum enjektör konum ve açıları belirlenmiştir.

Günümüze kadar EAO'lar için yapılan HAD analizlerinde, elektrik arkı ve yanma birbirlerinden ayrı olarak modellenmiştir. Sadece Li ve Fruehan (2003) HAD modelinde her iki enerji kaynağını eş zamanlı çalıştırmışlar fakat karbon yanmasını sadece basit yanma sonrası denklemleri ile modelleyerek incelemişlerdir. Aynı zamanda modellerinde EAO'nun tüm duvarlarını sabit sıcaklıkta kabul edip, soğutma suyu etkisini de ihmal etmişlerdir. Yaptıkları çalışma o güne kadarki en kapsamlı HAD modeli olsa da karbon yanması reaksiyonları üzerinde yapılan son çalışmalar (Molintas ve Gupta, 2011; Zhang vd., 2013; Kim vd., 2014), tam yanma reaksiyonlarını da içeren, çok daha tutarlı, simülasyon çalışmalarının önünü açmıştır. Son yıllarda HAD modelleme tekniğindeki gelişmeler, karmaşık denklemlerin eşzamanlı çözülebilmeye imkân vermektedir ve bu sayede EAO modelinde yanma çözümleri yapılırken, radyasyon denklemleri aktif hale getirilip sistem içerisinde gerçekleşmekte olan tüm fiziksel ve kimyasal olaylar modellenmektedir. Literatürde EAO ile ilgili sayısal çalışmalar genellikle bu modellerin kullanılabilirliğini tespit edip, sistemin çalışması esnasında gelişen olayları incelemeye yöneliktir. Bu projede yürütülen sayısal çalışmalarda literatürden farklı olarak, sürekli hurda şarjı için yapılan yeni bir EAO tasarımında, enjektörlerin geometrik konumlandırması optimize edilerek, enerji veriminin iyileştirilmesi çalışmaları yürütülmüştür.

Geleneksel EAO'ların HAD ile modellenmesinde, enjektör konum ve püskürtme açılarının belirlenmesine yönelik ilk çalışmalar tarafımızdan yapılmıştır (Yiğit vd., 2015). Bu çalışmada, klasik bir ark ocağındaki kimyasal mekanizmadaki karbon yanması ve elektrik ark radyasyonunu birlikte çözümlenerek, sistemin tam güçte çalışması halinde hazne içerisinde gerçekleşen olaylar incelenmiştir. Çalışmamızda, enjektörlerle sağlanan jet yanmasının eriyik yüzeyindeki sıcaklık dağılımına olan etkisi ve emisyon gazlarının EAO içerisindeki dağılımı görsel ve sayısal verilerle değerlendirilmiştir. Ayrıca elektrotlardan radyasyonla yayılan enerjinin hazne içerisindeki dağılımı da simülasyon çalışması ile elde edilmiştir.

Raporu yazılan bu araştırma projemiz ile gerek kendi çalışmamız (Yiğit vd., 2015) gerekse diğer araştırmacıların yaptığı nümerik çalışmalardan farklı olarak eriyik hacmindeki sıcaklık dağılımı ve bu hacme aktarılan toplam enerjinin tespiti de ilk defa çalışılmış oldu. Böylece ocak içindeki yanma ve ark ile oluşturulan şartlara, HAD yazılımlarının güncel imkanları da kullanılarak daha gerçekçi bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Ayrıca bu proje kapsamında geleneksel ve yeni tasarım EAO için enjektörlerin konum ve açılarının optimizasyonuna yönelik olarak; enjektörün eriyik yüzeyi ile yaptığı açı, enjektörün EAO yan duvarları ile yaptığı açı ve enjektörün eriyik yüzeyinden itibaren olan yüksekliği gibi kritik öneme sahip brülör parametrelerinin belirlenmesinde ilk defa RSO metodu uygulandı.

Odenthal vd. (2018) EAO ile ilgili HAD simülasyon çalışmalarının geldiği aşamayı ve gelecekteki uygulamaları değerlendirdikleri çalışmalarında; ocak kabuğu, ocak kapağı, atık gaz dirseği, brülör/enjektör gibi temel elemanlar ve yanma sonrası (post-combustion), ergime, fazların hareketi gibi olaylarla ilgili çalışmalardan örnekler vermişlerdir. EAO için bütüncül bir simülasyon çalışmasının yapılamamasının nedenleri; köpük formundaki cüruf ve hurdanın ergimesi gibi temel yapılar ve işlemler için basitleştirilmiş sayısal modellerin bulunmaması, başlangıç, sınır şartları ve akışkan özellikleri ile ilgili belirsizlikler, ön ısıtma, şarj, ergitme, aşırı ısıtma ve döküm gibi AO süreçlerinin konuma ve zamana bağlı değişmesi, oksijen jetindeki ses üstü akıştan ( $M=2$ ,  $Dx=10^{-6}m$ ,  $Dt=10^{-5}s$ ) ocaktaki eriyiğin akışına ( $Dx=10^0m$ ,  $Dt=10^3s$ ) kadar çok farklı ölçekte çözümlenebilecek akışlar arasındaki etkileşim, eş zamanlı çözülmesi gereken karmaşık alt modellerin bağdaştırılabilmesi için yüksek hesaplama kapasitesine ihtiyaç duyulması, HAD sonuçlarının doğrulanması için gerekli deneysel verilerin EAO içerisindeki işlem koşulları nedeniyle elde edilememesi şeklinde özetlenmiştir. Ancak HAD simülasyonlarının, kurulan sayısal modelin cevabı aranan soruya uygulanması halinde çok verimli olduğu ifade edilmiştir (Odenthal vd., 2018).

EAO için hazırlanacak bir HAD modelinin, ideal şartlarda uygun alt modeller kullanılarak tanımlaması gereken olayların listelendiği çalışmada, öngörülebilir bir gelecekte tüm bu olayları tanımlayabilecek genel bir modelin kurulamayacağı ifade edilmiştir. Bununla birlikte HAD modellerinin; düz-eriyik yüzeyi aşamasında, enjekte edilen oksijenin etkisi ile eriyik, cüruf ve gaz akışı ile ilgili pek çok sorunun cevabının alınabileceği vurgulanmıştır. EAO geometrisi ve işlem koşulları ile ilgili ayrıntılı değerlendirmelerin bulunduğu çalışmada, iki farklı EAO sayısal modeli üzerinden; modellemede yapılan kabuller, kullanılan türbülans modelleri, ağ yapısının oluşturulması, sınır şartları, ışınım modellemesi ile ilgili kabuller, gerekli donanım ihtiyacı ve kimyasal reaksiyonların modellenmesinde kullanılan algoritmalar ile ilgili ayrıntılı değerlendirmeler yapılmıştır. EAO için yapılan bütüncül URANS modellemelerinin sonuçları; EAO süreçleri ve alt bileşenlerden beklenen performans için pratik sayısal değerler de verilerek karşılaştırılmıştır (Odenthal vd., 2017).





### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

***Yeni EAO'larında eriyikte soğuk bölgelerin önüne geçmek için enjektör konum parametrelerinin optimizasyonu;*** geleneksel EAO'da silindirik olan ocak kesitinin, hurdanın üstten sürekli yüklenebilmesi için yapılan yeni tasarımda elips şeklinde olması ve ilk yüklemekten sonra yapılacak yüklemelerde, geleneksel ocaklarda olduğu gibi hatta daha yüksek bir ihtimalle, ocaktaki eriyikte bazı soğuk bölgelerin oluşması doğaldır. Bilindiği üzere; hurdanın ön ısıtılması, eriyik içerisindeki soğuk bölgelerinin giderilmesi, elektrik arkından ve düz eriyik yüzeyinden ısı kaybının azaltılması için köpüklü bir cürufun oluşturulmasında, brülörlerden elde edilen kimyasal enerji çok önemlidir. EAO'larında, brülörlerden enjekte edilen karbonun eriyik içerisinde oksitlenmesi ile enerji girişi sağlanır. Bu süreçte eriyikte açığa çıkan CO gazının gerçekleştirdiği süpürme işlemi ile eriyik yüzeyinde köpüklü bir cüruf tabakası oluşur. Köpüklü cüruf tabakası; EAO'da ana ısı kaynağı olan elektrik arkını da kaplayarak, EAO duvarındaki refrakterleri ark yanmasından korur, deoksidasyon ürünleri ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve inklüzyonları absorbe ederek sıvı çeliğin kalitesini geliştirir, ocakta defosforizasyonu ve potada desülfürizasyonu gerçekleştirir, metali oksidasyondan, azot ve hidrojen absorpsiyonundan koruyup, ergimiş çeliği, ısı kaybını minimize edecek şekilde çevreden izole eder (Sanchez vd., 2012; Kipepe ve Pan, 2014; Rahman, 2010). Bu nedenlerle brülör konum parametrelerinin (enjektörlerin merkezi açısı (EMA), enjektörlerin püskürtme açısı, enjektörlerin uzunluğu) çok iyi optimize edilmesi gerekmektedir.

Köpüklü cüruf tabakasının oluşumunun sağlanması için karbon, belirli bir yükseklikten ve eriyik yüzeyine daha dik açılarla ( $30^\circ$ - $35^\circ$ ) püskürtülür. Oksijen ise eriyik yüzeyine biraz daha yatay bir açıyla ( $42^\circ$ - $45^\circ$ ) gönderilir (CVS Teknolojileri Firmasından alınan verilerdir) Klasik geometriye sahip EAO'larında yapılan bu uygulama yeni tasarım EAO için de kullanılmıştır. Fakat yeni tasarım EAO'nun eliptik yapısı nedeniyle düz eriyik yüzeyinde oluşma ihtimali kuvvetlenen soğuk bölgelerin engellenmesi bakımından, enjektörlerin EAO duvarlarına çevresel yöndeki yerleşmelerini belirleyen EMA'nın önemi daha da artmaktadır. Öncelikle enjektörlerin düz eriyik yüzeyinden yükseklikleri ve enjektörlerin püskürtme açısı sabit tutularak, soğuk bölgelerin engellemesi için daha önemli olan enjektörlerin çevresel yöndeki konumları EMA optimize edilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon çalışmasında Response Surface Optimization (RSO) metodu kullanıldı. RSO metodu uygulanırken, düz eriyik üzerindeki EAO hacminde kömürün yanması ile eriyik hacmine aktarılacak ısı enerjisinin maksimize edilmesi, enjektörlerin yatay düzlemdeki konumlarını tanımlayan EMA'nın değiştirilmesi ile sağlandı.

**Hazne içerisindeki cürufun enerji verimi üzerindeki etkilerinin araştırılması;** proje konumuz olan yeni tasarım EAO'da ısı ve enerji kaybının azaltılarak, verim artışının sağlanması, yanma sonrası açığa çıkan gazların sayısal çözümleme ile belirlenmesi projemizin bilimsel kalitesini ve farklılığını ortaya çıkaran önemli hususlardan biridir. Burada iyi cürufu köpük üretiminin sağlanabilmesi için enjektörlerle püskürtülen karbonun eriyik içerisinde oksitlenmesi ile sağlanan ilave enerji girdisinin yanı sıra açığa çıkan CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir (Li ve Fruehan, 2003).

Bunun için püskürtülecek karbon ve oksijenin eriyik yüzeyi ile yaptığı açının doğru bir şekilde belirlenmesi ve miktarlarının çok iyi ayarlanması gerekir [ $O=0,6xC$ ]. Bu nedenle pratikte yapılan köpüklü cüruf uygulamasında; eriyik içerisinde ilave bir enerji üretmenin yanında CO gazı da oluşturarak cürufu köpürtmek için oksijen ve kömür tozu (karbon) birlikte enjekte edilir. Bazı durumlarda sadece karbon enjekte edilir ve karbon cüruftaki FeO ile reaksiyona girerek CO gazını üretir.

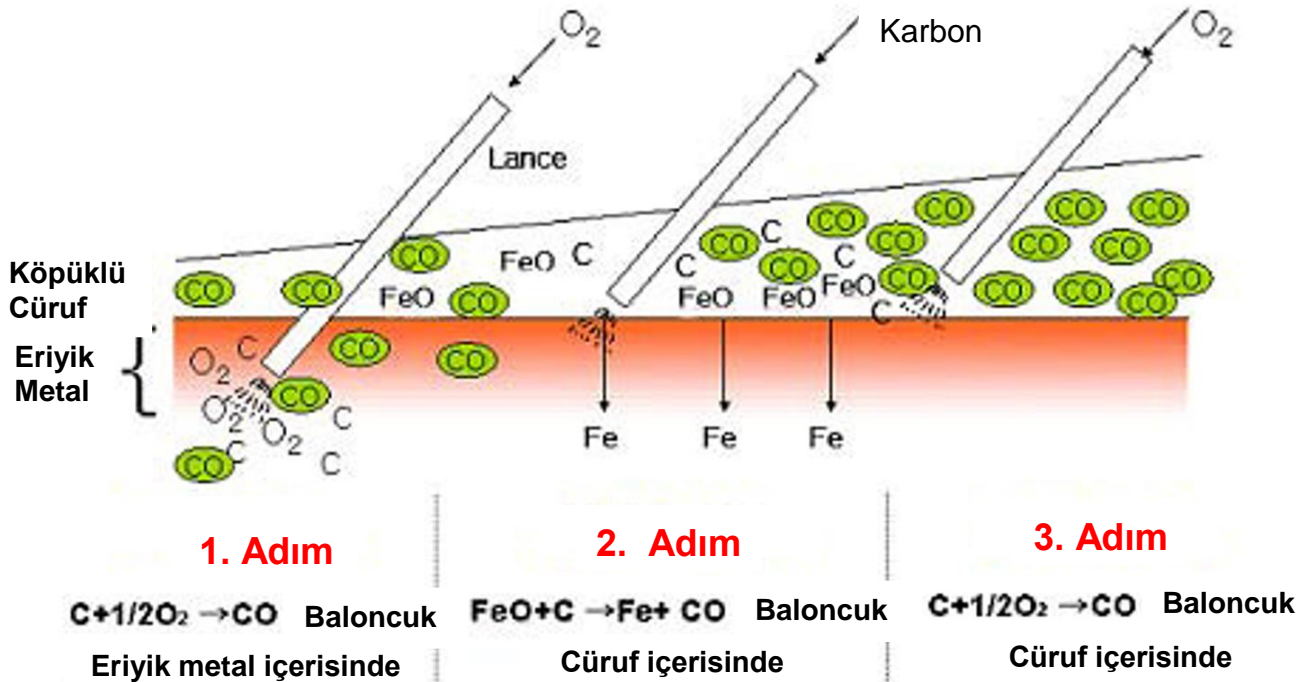
Bu projemiz kapsamında gerçek şartlarda cüruf oluşum mekanizmasını sayısal çözümlerle ile gerçekleştirmek için eriyik içerisine oksijen ve karbon enjekte edilmiştir. CO oluşumu, köpüklü cüruf oluşumun da bir başarı ölçütü olduğundan, eriyik yüzeyinde yutulan karbon ve oksijen miktarının EMA, püskürtme açısı ve enjektör uzunluğu ile değişimleri de incelenmiştir. Böylece eriyik yüzeyinde yutulan karbon ve oksijen miktarındaki artışın (CO üretiminde artış) olumlu/olumsuz sonuçları dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Cürufun vizkozitesi, CO baloncuklarını yeteri kadar uzun süre tutabilecek düzeyde olmalıdır. Cüruf çok koyu olursa, kabarcık oluşumu zorlaşır. Tam tersine cüruf çok akışkan olursa, eriyikten gelen CO kabarcıkları çok hızlı bir şekilde patlayacak ve köpürme kalıcı olmayacaktır (Şekil 3.1).  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , FeO cürufu çok akışkan yaparken, CaO ve MgO cürufun koyulaşmasına neden olurlar. Cürufun baziklik seviyesi 2'nin altına düştüğünde, MgO çözünürlüğünde önemli bir artış meydana gelmektedir. EAO'da başlangıçta oluşan cürufun bazikliği düşüktür ki bu da yüksek MgO çözünürlüğü anlamına gelmektedir. İlk hurda sepeti ile birlikte dolomit ilavesi cürufun doyunluğu için gerekli MgO miktarını sağlar ve böylece ocaktaki refrakter aşınması minimize edilir.

Cürufta baloncuklar;  $C + FeO$  (cüruf)  $\rightarrow CO$  (balon)  $\uparrow + Fe$  (çelik)  $\downarrow$  reaksiyonu gereği oluşur (Şekil 3.1). Köpürme gerçekleştiğinde, cüruf tabakasının kalınlığı 10 cm'den 30 cm'ye kadar ulaşabilir. Bazı durumlarda cüruf o kadar kabarır ki elektrot portlarına kadar ulaşır. Enerji verimliliğindeki artış seviyesi cürufun köpürdüğü durumda %60-65 seviyelerindeyken

köpürmenin olmadığı durumda %30-35 seviyesindedir. Yeni tasarım EAO'da; kapağın ikinci ve üçüncü yüklemeler için açılmaması ve karbon enjeksiyonu ile oluşturulan kalın köpüklü bir cüruf tabakası ile çalışılması, elektrik arkından oluşan kayıpları ve dolayısıyla elektrik enerjisi tüketimini azaltacaktır. Bu sayede elektrik enerjisi yerine kimyasal enerjiden %4-5'lik bir oranda daha fazla yararlanıldığı bilinmektedir.

Elektrik enerjisinin büyük bölümünün hurda ergitilirken harcılandığı bilinmektedir. Elektrik enerjisindeki asıl tasarruf ancak ocakta ergime sağlanıp, elektrotlar cürufa gömülü çalışılırken (düz eriyik yüzeyi ile çalışma safhası) elektrik ark kayıplarının azalması, başka bir ifade ile eriyikteki kimyasal olayların devamı için enjekte edilen karbon ve oksijen sayesinde üretilen kimyasal enerjinin EAO kayıpları için yeterli olması durumunda sağlanabilir. Bu miktar da toplam elektrik enerjisi girdisinden %4-5 azalmaya tekabül eder.



Şekil 3.1. Eriyiğe karbon ve oksijen enjeksiyonu ile CO oluşum mekanizması (Özdemir, 2018)

**Geleneksel ve yeni tasarım EAO'nun HAD modellerinin, eriyik yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve bu hacme aktarılan toplam enerjinin hesaba katılması ile gerçek çalışma şartlarına yaklaştırılması;** EAO'nun enerji verimini artırmak için yapılması gereken hesaplamalar; proste ortaya çıkan ısı ve kütle transferi, akış, elektrot radyasyonu, yakıt enjeksiyonu ve yanma kimyası gibi fiziksel olayların çözümünü gerektirmektedir. Eş zamanlı gerçekleşen fiziksel ve kimyasal olayların birlikte değerlendirilmesi için kompleks hesaplama yöntemleri gerekir. Fakat sıfır boyutlu denklemlerle bu tip problemlerin çözümünün çok zor

olmasından dolayı üretici firmalar, EAO'nın enerji verimini artırmaya yönelik çalışmalarda genellikle deneme yanılma stratejisine dayalı yöntemleri kullanmayı tercih etmektedir. EAO'ları büyük hacimli ve endüstriyel amaçlı olduklarından, çalışma şartları nedeniyle, ölçekli deneysel düzeneklerinin kurulması ya da çalışan ocaklarda deneyler yapıp veri alınması oldukça zordur. Dolayısıyla EAO kurulumunun çok maliyetli olması ve uzun sürmesi nedeniyle, optimizasyon çalışmaları çok yavaş ilerlemektedir. Ticari amaçlı üretimi gerçekleştirilen bir ocakta öngörülen tasarımsal düzeltmelerin etkilerin sonuçları ancak imalatı biten bir sonraki ocakta test edilebilmekte ve bu durum üretici firma için büyük riskler taşımaktadır. EAO tasarımında yapılan verim artırıcı iyileştirmeler; çok daha hızlı, ekonomik ve aynı zamanda çok fazla sayıdaki parametrelerin etkileri de incelenerek ancak çeşitli yazılımlar ve gelişmiş bilgisayarlarla gerçekleştirilebilir. Düz eriyik yüzeyi üzerindeki EAO gaz akış hacminde oluşan elektrik arkı ve yanma ile birlikte özellikle eriyik yüzeyi de modele eklenerek, radyasyon enerjisinin eriyik yüzeyindeki dağılımı da incelendi. Bunun yanında ışınlama ısı geçişinin çözümünde, HAD yazılımında mevcut daha gelişmiş bir radyasyon modeli olan ve EAO radyasyonunu doğru ve hızlı bir şekilde çözebilen (Scheepers vd., 2010) P1-radyasyon modelinin kullanıldı. Ayrıca açık literatürde mevcut, EAO'ları için HAD yazılımları ile yapılan az sayıdaki sayısal çalışmada, elektrik arkı ve yanma birbirlerinden ayrı modellenmiştir. Sadece Li ve Fruehan (2003) enerji üreten her iki mekanizmayı aynı anda HAD modelinde birleştirmiştir. Ancak bu çalışmada da karbon yanması, sadece basit yanma sonrası modeli kullanılarak incelenmiştir. Li ve Fruehan (2003) modellerinde, EAO'nın tüm duvarlarını sabit sıcaklıkta kabul edip, soğutma suyunun etkisini de ihmal etmişlerdir. Son yıllarda HAD modelleme tekniğindeki gelişmeler, karmaşık denklemlerin aynı anda çözülebilmesine imkân vermektedir. Bu sayede EAO modelinde yanma çözümleri yapılırken, radyasyon denklemleri de aktif hale getirilip sistem içerisinde gerçekte var olan tüm fiziksel ve kimyasal olay modellenebilmektedir.

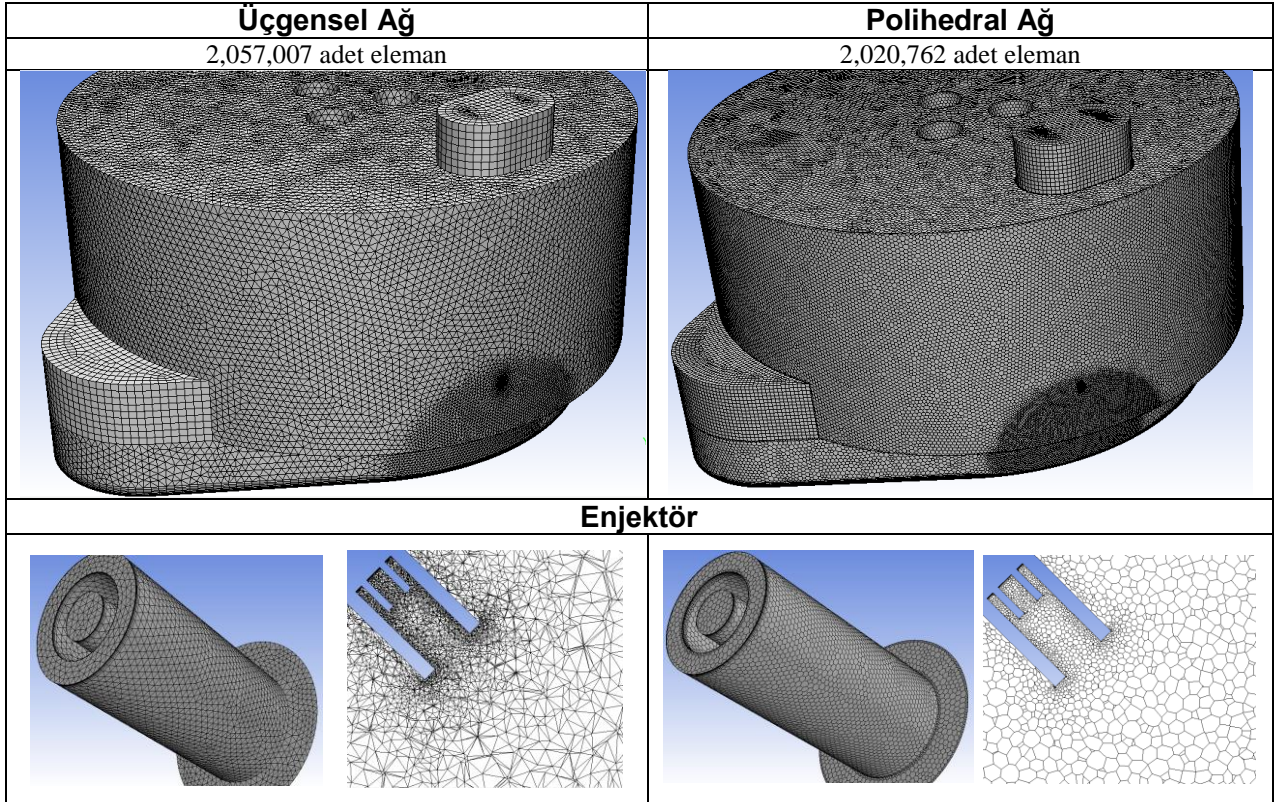
Açık literatürde mevcut sayısal çalışmalarda, EAO'daki yanmanın oldukça karmaşık olması nedeniyle problemin basitleştirilmesi için genellikle sadece eriyik yüzeyinden taşınım ile olan ısı geçişi hesaba katılmaktadır (Li ve Fruehan, 2003; Guo ve Irons, 2003). Yani eriyik hacmindeki sıcaklık dağılımı ve bu hacime aktarılan toplam enerji hesaplara katılmamıştır. Bu projede, günümüze kadar yapılan nümerik çalışmaların ışığında ve gelişmiş sayısal hesaplama yöntemlerinden yararlanılarak, eriyik yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve bu yüzeyden geçen hacime aktarılan toplam enerji de analizlere dahil edildi. Karbon ve oksijenin, eriyik yüzeyine enjektörlerle farklı açılarla püskürtülmesi simüle edilerek, enjektörler için optimum konum parametreleri belirlendi.

## 4. MODELLEME YÖNTEMLERİ

### 4.1 Klasik EAO Modelinin Ağ Yapısı, Eleman Sayısının Seçimi ve Sınır Şartları

Bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmaların daha ileri seviyeye taşınması için simülasyonlarda kullanılan ağ yapısındaki eleman sayısının ciddi oranda azaltılmasına olanak veren polihedral eleman tipinin kullanmanın sonuçlara etkisi incelenmiştir.

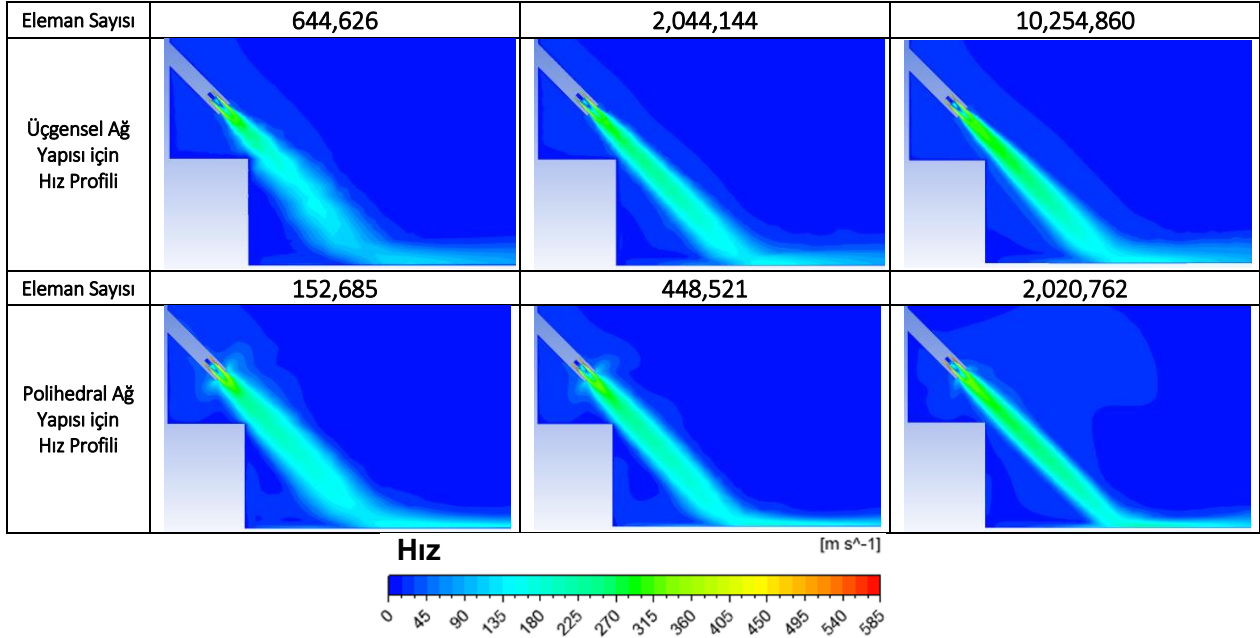
Şekil 4.1’de ise üçgensel ve polihedral ağ yapılı klasik EAO ve enjektör modellerine ait görünüşler verilmiştir. Üçgensel ağ yapılı model, polihedral ağ yapılı modele dönüştürülürken, sık ağ yapılı bölgeler olan eriyik yüzeyi, enjektör çıkış bölgesi, karbon ve O<sub>2</sub>’nin püskürtüldüğü bölgelere aktarılmıştır.



Şekil 4.1. Klasik EAO geometrisine üçgensel ve polihedral ağ yapılarının uygulanması

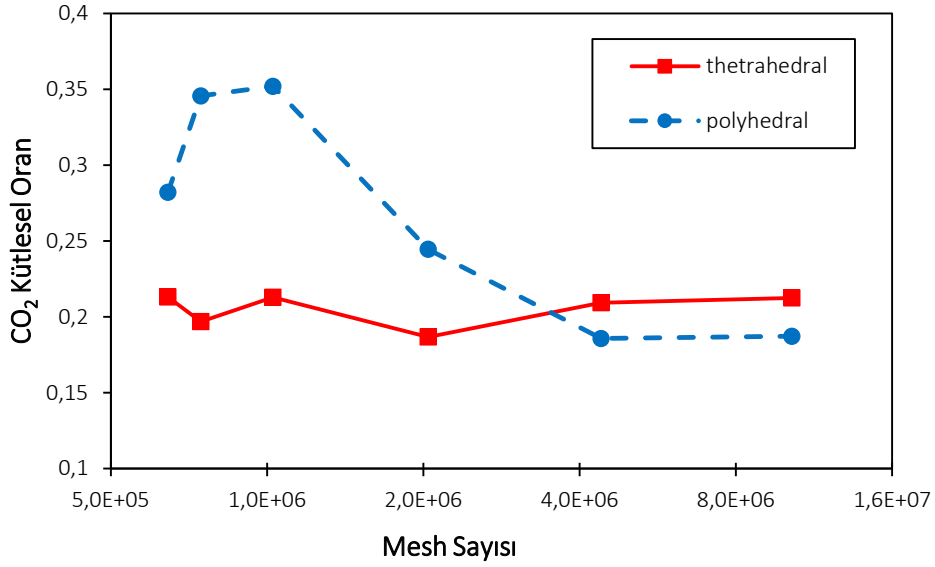
Şekil 4.2’de, modelde kullanılan ağ yapısı ve eleman sayısı değiştirilerek, enjektör simetri düzlemindeki jet akışına ait hız profilindeki değişim verilmiştir. Her iki ağ yapısında da eleman sayısı arttıkça daha düzenli bir hız profilinin olduğu açıkça görülmüştür. 10 milyon eleman sayısına sahip üçgensel ağ yapılı model ile bu model dönüştürülerek elde edilen 2 milyon

eleman sayılı polihedral ağ yapılı modele ait hız profilleri benzerlik göstermiştir. Ayrıca üçgensel ağ yapısına sahip model, polihedral ağ yapısına dönüştürüldüğünde; modeldeki toplam eleman sayısının yaklaşık 1/5 oranında azaldığı görülmüştür. Bu sayede yeni tasarım EAO 'nda yapılması planlanan enjektör optimizasyon çalışmasının daha hızlı yapılmasına yönelik önemli bir altyapı oluşturuldu.



Şekil 4.2. Enjektör simetri düzlemde jet hız profiline, ağ yapısı ve eleman sayısı ile değişimi

Polihedral elemanların kullanıldığı ağ yapısının sonuçları, üçgensel elemanlar ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3'de, bacadan çıkan CO<sub>2</sub>'in ağ yapısı ve eleman sayısı ile değişimi görülmektedir. Yapılan karşılaştırmada, 4 milyon ve üzeri eleman sayısına sahip modelin üçgensel ağ yapısının, polihedral ağ yapısına dönüştürülmesi durumunda, kütle oranların oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

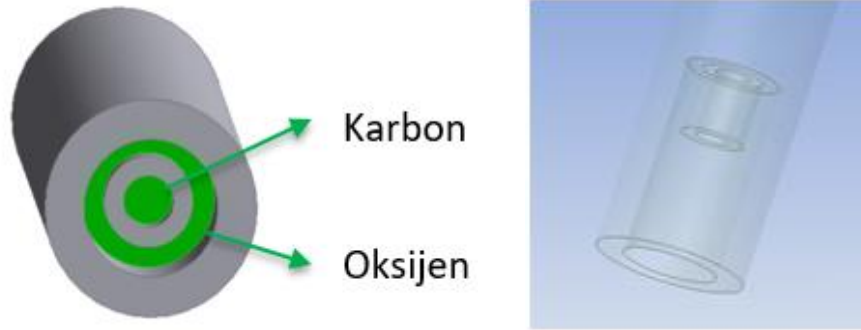


Şekil 4.3. Bacadan çıkan CO<sub>2</sub> kütle oranının ağ yapısı ve eleman sayısı ile değişimi

Ağ yapısı oluşturulan model daha sonra Fluent yazılımına aktarıldı ve doğru bir çözüm için gerekli sınır koşulları tanımlandı. Uygulamada, EAO'nun yan ve kapak üst duvarlarında farklı sıcaklıkların ortaya çıktığı bilinmektedir (Yiğit vd., 2015). Özellikle kapak altında kalan yan duvarlarda, su ile soğutma yapılan bölgenin aktif çalışma sırasındaki ortalama sıcaklığının 393 K civarında olduğu bilinmektedir. Potaya yakın duvarlardaki ölçümlerde ise sıcaklık değerlerinin 873-773 K aralığında değiştiği bildirilmiştir (Yiğit vd., 2015). Bu yüzden HAD modelinde EAO duvarları farklı sıcaklıktaki bölgelere ayrılarak, yüzeylere gerçekçi sıcaklık değerleri verilerek simülasyonlar gerçekleştirildi. Hazırlanan modelde elektrotlara aktarılan toplam elektriksel güç 100 MW olup, modelde elektrotların alt yüzeylerinde 1.15e+08 W/m<sup>2</sup>'lik bir ısı akısı olarak tanımlandı. Daha gerçekçi bir ısı çözüm için eriyiğin alt yüzeyinde ısı iletim ve taşınım denklemleri aktif hale getirildi ve eriyikten dış ortama olan ısı kaybı da sayısal modele eklendi. Böylece daha ayrıntılı bir ısı geçişi modeli kullanılarak eriyik yüzeyindeki sıcaklık dağılımının doğru bir şekilde çözülmesi sağlandı. Eriyiği oluşturan sıvı metalin ısı iletim katsayısı 0.5 W/mK ve yüzeyindeki ışınım yayma katsayısı 0.7 olarak tanımlandı. Benzer şekilde EAO yan yüzeylerindeki ışınım yayma katsayısı da 0.7 ve grafit elektrotların yayma katsayısı da 0.85 olarak tanımlandı (Yiğit vd., 2015).

Enjektörler, Şekil 4.4'de görüldüğü gibi eş eksenli iki silindir şeklinde modellendi. İç kısımdaki silindirden karbon girişi sağlanırken, dıştaki silindirden de oksijence zenginleştirilmiş hava girişi sağlanmıştır. Oksijence zenginleştirilmiş hava ve karbon için giriş hızları ve sıcaklıkları modelde sırası ile 137 m/s ve 300 K olarak tanımlandı.

Ayrıca bir EAO'nun çalışması esnasında, eriyik yüzeyinden bir ton sıvı çelik için 1.5 kmol CO çıkışı olduğu bilinmektedir (Li ve Fruehan, 2003). Benzer şekilde, gerçek koşullarda pota içerisindeki katı fazdaki tüm metalin tamamen sıvı faza geçtiği durumda ocakta bulunan sıvı çelik kütlelerine karşılık gelen CO'ın eriyik yüzeyinden çıkışı ve EAO gaz hacmine girişi modelde tanımlanmıştır. Modelde eriyik içerisinde oluşan ve yanma hacmine eriyik yüzeyinden giren CO'ın kütleli debisi, klasik ark ocağı için 0.5 kg/s olarak hesaplandı (Yiğit vd., 2015). Yeni tasarım EAO'nun hurda kapasitesi de eski EAO ile aynı olduğundan, eriyik yüzeyinden ocak hacmine giren CO'ın kütle debisi de 0.5 kg/s olarak seçildi. Yazılımda eriyik yüzeyden ocak hacmine CO girişi sadece hacimsel olarak tanımlanabildiğinden, eriyik yüzeyi üzerinde CO üretilen bir hacim oluşturuldu (Şekil 4.9). Klasik ark ocağında bu hacim 23 m<sup>3</sup> ve 0.5 kg/s kütleli debide yüzeyden ocağa giren CO'ın hacimsel kütle üretimi ise 0.021455 kg/m<sup>3</sup>-s'dir. Yeni tasarımda EAO'nda ise kütleli debi aynı olmasına rağmen eriyik yüzey üzerinde tanımlanan hacim 14 m<sup>3</sup>'dür ve hacimsel kütle üretimi 0.035565 kg/m<sup>3</sup>-s olarak hesaplandı.



Şekil 4.4. EAO'na yakıt ve hava girişini sağlayan ve eş eksenli iki silindir şeklinde tanımlanan enjektör modeli

Scheepers vd. (2010), yaptıkları çalışmada, elektrotlarda oluşan arkta kaynaklı ışımanın, Fluent yazılımında mevcut P1 radyasyon modeli ile doğru ve hızlı bir şekilde çözebileceğini göstermişlerdir. Bu sebeple oluşturulan HAD modelinde; yüksek sıcaklıktaki ısı kaynakları olan elektrotlardan ve yanma reaksiyon bölgelerinden, ocağın gaz hacmine ve bu hacmi çevreleyen yüzeylere enerjinin ışımla yayılımı için P1 radyasyon modeli kullanılmıştır.

Analiz çalışmalarında öncelikle Reynolds Navier-Stokes (RANS) türbülans modeli ve daha sonra optimizasyon çalışmaları sonrasında aynı sınır şartları uygulanarak Large Eddy Simülasyon (LES) türbülans modeli kullanılmıştır.

Türbülans modeli olarak öncelikle Reynolds Navier-Stokes (RANS) denklemlerinden  $k-\epsilon$  kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda belirtildiği üzere,  $k-\epsilon$  türbülans modelinin kömür



partikülünün yanması ve gaz akışının kombinasyonunu içeren türbülans etkilerini doğru bir şekilde çözdüğü, deneysel gözlemlerle tespit edilmiştir (Zhang, 2013).  $k-\varepsilon$  modeli, taşınım denklemlerindeki, türbülans kinetik enerjisini ( $k$ ) ve türbülans yitim oranını ( $\varepsilon$ ) temel alan, yarı ampirik bir modeldir (Launder ve Spalding, 1972). Türbülans kinetik enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır ( Versteeg ve Malalasekera, 1995; Biswas ve Eswaran, 2002; Parankar, 2002).

$$k = 1.5(u \cdot I)^2 \quad (1)$$

Denklemdaki  $u$  brülör çıkış kesitindeki  $O_2$  hızı ve  $I$  türbülans yoğunluğudur. Türbülans yoğunluğu aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$I = 0.16 \text{Re}^{-1/8} \quad (2)$$

$k-\varepsilon$  modeli için türbülans yitim oranı şöyle ifade edilebilir.

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \left( \frac{k^{3/2}}{l} \right) \quad (3)$$

Denklemdaki  $l$  boyut skalası ve  $C_\mu$  model sabitidir. Boyut skalası sınır koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Hız girişi sınır koşulu için boyut skalası aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$l = 0.09 L \quad (4)$$

Denklemdaki  $L$ , brülör çıkış kesitinin yarı çapıdır.

Bir diğer türbülans modeli olarak LES türbülans denklemlerinden Smagorinsky-Lilly (Broukal and Hajek, 2011) modeli kullanılacaktır (Broukal ve Hajek, 2011). LES türbülans modelinin, akış alanında oluşan küçük ölçekli türbülans etkilerini de zamana bağlı çözerek, gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği bilinir. Smagorinsky-Lilly türbülans modelinde eddy-viskozitesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

Burada  $L_s$  alt ağ yapısı için karışım büyüklüğü ve  $|\bar{S}| \equiv \sqrt{2\bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij}}$  olarak çözülmektedir. Fluent yazılımında  $L_s$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (6)$$

Burada  $\kappa$  von Karman sabiti,  $d$  en yakın duvar yüzeyine uzaklık,  $C_s$  Smagorinsky sabiti,  $V$  ise hesaplama yapılan elemanın hacmi olarak verilir.

LES türbülans modeli ile yapılan çözümlerin zamana bağlı olarak ilerlemesi ve daha yoğun bir ağ yapısının kullanılması gerekmiştir. Ayrıca zamana bağlı olarak devam eden çözümün fiziksel olarak düzene girmesi için çözüm süresinin olabildiğince artırılması gerektiği bu proje çalışmasında görülmüştür. Bu nedenlerle LES türbülans modelinin çözüm sürelerini ciddi miktarda uzattığı gözlenmiştir. Literatürde EAO'ları için yapılan HAD çalışmalarında türbülans modeli olarak RANS denklemlerinden k-ε modelinin kullanıldığı ve yeterli derecede doğru sonuçlar alındığı bilinmektedir (Singh vd., 2013). Bununla birlikte EAO için LES türbülans modeli kullanılarak yapılan herhangi bir HAD simülasyonu çalışmasına rastlanmamıştır. Sadece jet enjeksiyonun olduğu bölge için kısmi LES türbülans modeli çözümü yapılarak, bu çözümden elde edilen sonuçların genel EAO modeli için girdi olarak kullanıldığı çok az çalışma mevcuttur (Odenthal vd., 2018).

Sıvı yakıt ve kömür yanmasının modellenmesi ile ilgili çalışmalar (Rahmanian vd., 2014; Morsi ve Alexander, 1972; Matveev ve Serbin, 2007), EAO hacmindeki yanmanın modellenmesinde; ayırık faz modeli (DPM-Discrete Phase Model) çözüm metodunun parçacık izleme modeli için kullanışlı olduğunu göstermektedir. Bu sebeple kömür partiküllerini de taşıyan O<sub>2</sub> akışının oluşturulmasında DPM modeli kullanılmıştır. DPM ile sayısal çözümü yapılacak enjeksiyon modelinde; enjeksiyon tipi olarak yüzey, partikül tipi için de yanma seçilmiştir. Karbon partiküllerinin boyutları Rosin-Rammler modeline göre belirlenmiştir. Tablo 4.1'de EAO'na enjekte edilen kömür partiküllerinin yaklaşık boyutları verilmiştir ve bu değerler simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır. Enjeksiyon sırasında karbon partiküllerinin gaz fazı içerisindeki yörüngeleri rastgele (stokastik) hesaplanmaktadır.

Tablo 4.1. EAO'na enjekte edilen kömür partiküllerinin boyutları

Min çap [m]	Max çap [m]	Ortalama çap [m]	Yayılma parametresi
70e-06	200e-06	134e-06	4.52

Yörüngeler, karbon partiküllerine etkiyen atalet kuvvetlerinin, kayma, yerçekimi ve dış kuvvetler ile dengelendiği kabul edilerek hesaplanır.

$$\frac{d\vec{u}_d}{dt} = F_D \left( \vec{u}_h - \vec{u}_d \right) + \frac{\vec{g}(\rho_d - \rho_h)}{\rho_d} + \vec{F} \quad (7)$$

Denklemdaki  $u_h$  gaz fazın (O<sub>2</sub>) hızı,  $u_d$  ayırık fazın (karbon partikülü) hızıdır.  $\rho_h$  ve  $\rho_d$  sırasıyla O<sub>2</sub> ve karbon partikülünün yoğunluğudur.  $g$  yerçekimi ivmesini ve  $F$  dış kuvvetleri temsil etmektedir. Denklemdaki  $F_D$  kayma kuvvetleridir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_D = \frac{18\mu_d C_D \text{Re}}{\rho_d d^2} \quad (8)$$

Denklemdaki Reynolds sayısı, partikül çapı karakteristik çap olarak kabul edilerek ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\text{Re} = \frac{\rho_h d |u_d - u_h|}{\mu_h} \quad (9)$$

Denklemdaki  $C_D$  kayma katsayısıdır. Morsi ve Alexander (1972) kayma katsayısının Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak hesaplanabileceğini önermiştir

Karbon partikülleri ile  $O_2$  arasındaki reaksiyon “species transport” modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Kimyasal reaksiyonların tanımlanmasında, hacimsel ve partikül yüzeyi reaksiyonları kullanıldı. Kömürdeki uçucu maddelerin ayrıldığı buharlaşma (devolatilizasyon) süresince, parçacığa taşınım ve ışınila ısı geçişi olur ve ortamdaki ısı çekilir (Matveev ve Serbin, 2007).

$$m_d c_p \frac{dT_d}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (10)$$

Partikül yüzey reaksiyonu boyunca partikülün ısı dengesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir (Magnussen ve Hjertager, 1981).

$$m_d c_p \frac{dT_d}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{\text{reac}} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (11)$$

Denklemdaki  $H_{\text{reac}}$  yüzey reaksiyonu ile açığa çıkan ısı enerjisidir.

Kütle korunumu, simülasyonda kullanılan her bir kimyasal bileşen için çözümlenmiştir. Reaksiyon hızları, Finite-Rate Eddy-Dissipation modeli (Marchisio ve Barresi, 2003) ile kimyasal kinetik veya türbülansa bağlı hız-kontrollü mekanizmalar kullanılarak çözümlenmiştir. Bu sayede, bölgesel mikro-karışımın etkisi, reaksiyon hızının tespitinde etkili olacaktır (Hookyung vd., 2010).

HAD modelinde kömür; içinde mevcut ve buhar fazına geçecek bileşenlerin çokluğu nedeniyle basitleştirilerek, tek bir bileşen olarak tanımlanmıştır. Fluent yazılımında, kömürün yoğunluğuna, özgül ısısına ve içerisindeki bileşenlerinin oranlarına göre, birçok farklı kömür sınıflandırması bulunmaktadır. Bu çalışmada kömür; uçucu madde (VM), karbon (C), hidrojen (H), ve oksijenden (O) oluşan tek bir kuramsal hidrokarbon bileşeni olarak kabul edilmiştir. İçerisinde uçucu maddenin de olduğu, altı adet bileşen içeren, üç-adımlı hacimsel reaksiyonlar modelde kullanıldı. Gaz fazındaki reaksiyonlarda, bölgesel kimyasal reaksiyonlar, Arrhenius

tipi kimyasal kinetik ile bağdaştırılır. Kömür yanması simülasyonunda kullanılan, gaz fazındaki üç adımdan oluşan kimyasal reaksiyonlar, Arrhenius reaksiyon hızları ve aktivasyon enerjileri ile birlikte Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Gaz fazındaki reaksiyonlar

Numara	Reaksiyon	A	Ea (j/kgmol)
1	$mv_{vol} + 1.706O_2 \rightarrow CO_2 + 1.543H_2O$	2.119e+11	2.027e+08
2	$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$		
3	$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$	1e+15	1e+08

Uçucu maddeler, kömür partikülünün yüzeyinden tamamen buharlaştıktan sonra katı fazdaki reaksiyonlar aktif hale gelmeye başlar [35]. Modelde tüm kömür partikülleri karbon olarak kabul edildi. Bu sayede katı kömürde ortaya çıkacak kompleks yanma mekanizmaları tek bir reaksiyon ile tanımlanabilecek ve çok karmaşık denklemler içeren model bir miktar basitleştirilebilecektir. Karbon yanması için kullanılan 6 bileşen ve 3 alt reaksiyondan oluşan yüzey reaksiyonları; Arrhenius reaksiyon hızları, aktivasyon enerjileri ve difüzyon hızı sabitleri ile birlikte Tablo 4.3'de verilmiştir.

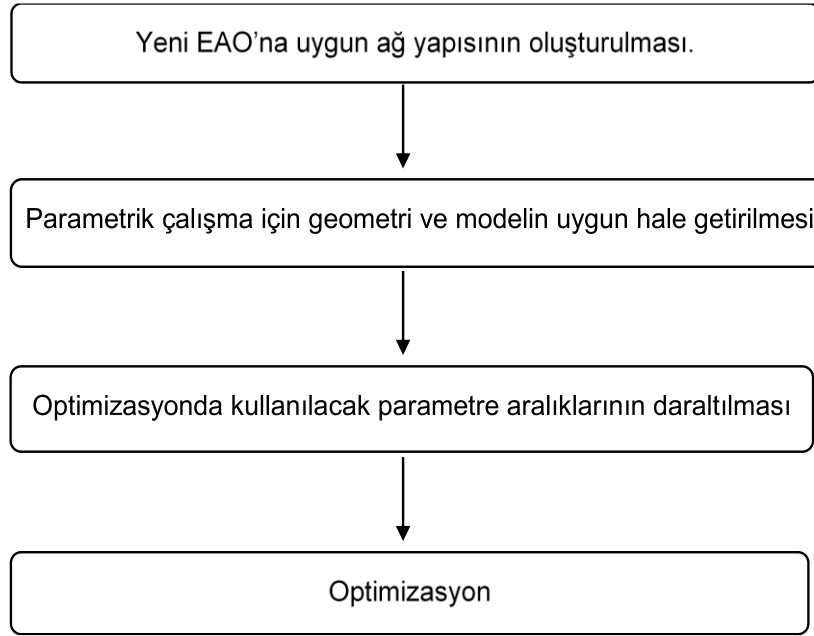
Tablo 4.3. Kömür partiküllerinin oksidasyonu

Heterojen partikül yüzey reaksiyonları				
Numara	Reaksiyon	A	Ea (j/kgmol)	Difüzyon hızı sabiti
4	$C < s > + 0,5O_2 \rightarrow CO$			
5	$C < s > + CO_2 \rightarrow 2CO$	0.002	7.9e+07	5e-12
6	$C < s > + H_2O \rightarrow H_2 + CO$			

#### 4.2 Yeni Tasarım EAO Modelinin Ağ Yapısı, Eleman Sayısının Seçimi ve Sınır Şartları

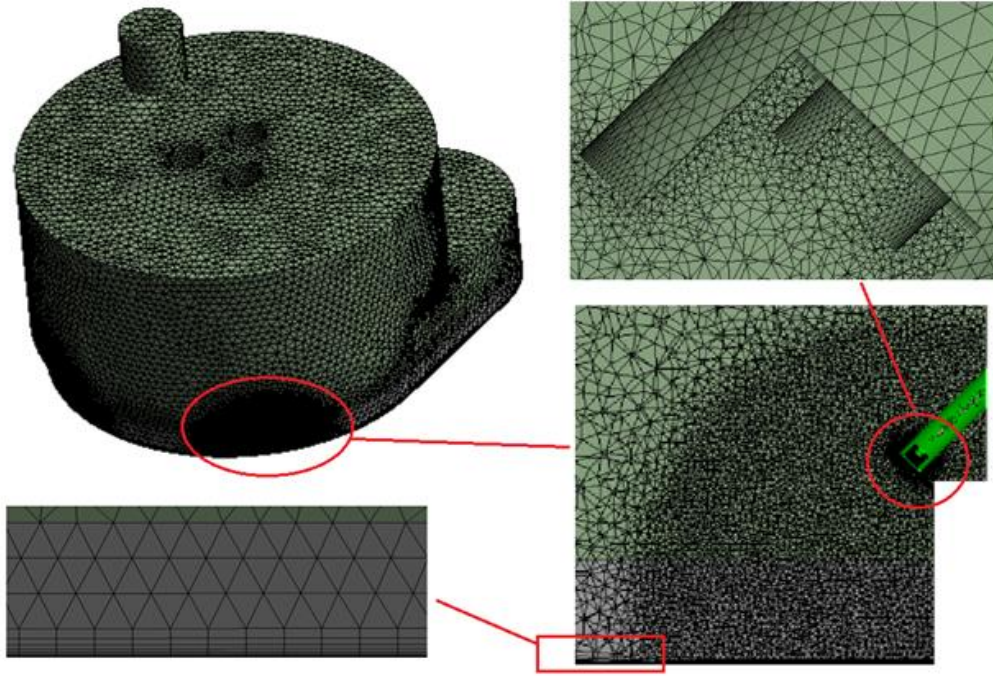
Yeni ark ocağı için klasik modelde kullanılan sınır koşulları sonuçları karşılaştırabilmek için değiştirilmeden modele uygulandı. Fakat yeni EAO'daki geometrik farklılıklar nedeniyle ağ yapısı optimizasyonu tekrar yapıldı. Bunun yanında enjektör optimizasyonu çalışmasının yapılabilmesi için parametrik çözüm göz önüne alınarak modele bazı eklentiler uygulandı. Şekil

4.5'de yeni tasarım EAO'nda ağ yapısı optimizasyonu ve enjektör konum parametrelerinin optimizasyonu çalışmasında uygulanan işlemler bir akış şeması ile gösterilmektedir. Buna göre ilk aşamada, simülasyon sürelerinin kısaltılması ve minimum eleman sayısı ile doğru verilere ulaşmak için en uygun ağ yapısının belirlenmesi hedeflenmiştir. Sonuçların doğruluğunda değişimlerin fazla olduğu bölgelerdeki ağ yapısı önem kazandığından; cüruf yüzeyi, elektrotların çevresi ve brülör çıkışına yakın bölgelerdeki ağ dokusu diğer bölgelere kıyasla daha küçük elemanlardan oluşturuldu. Farklı eleman sayılarıyla oluşturulan modellere ait sonuçlar karşılaştırılarak, en uygun eleman sayısına sahip ağ yapısı seçilmiştir.



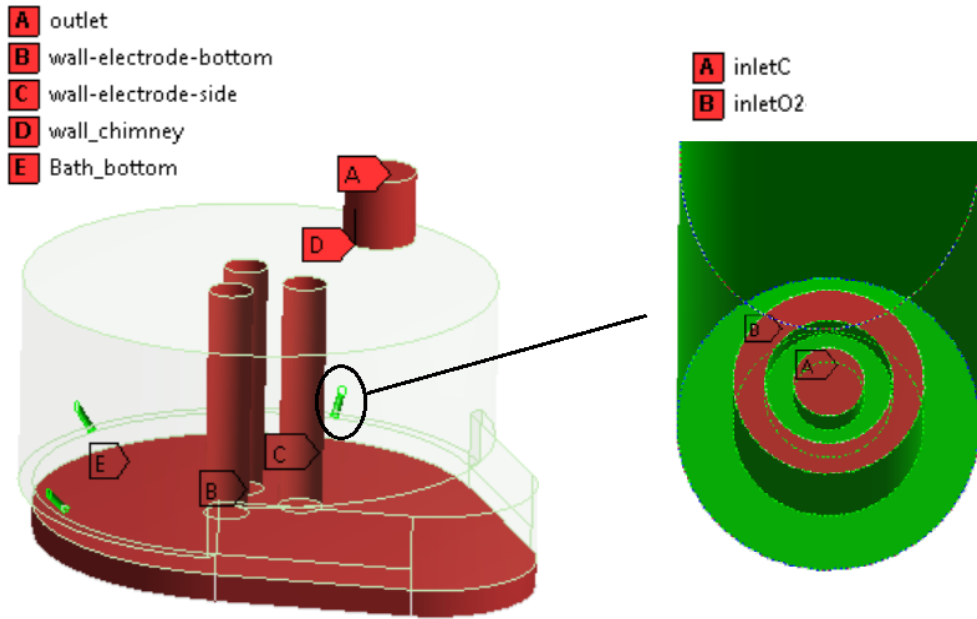
Şekil 4.5 Yeni tasarım EAO'da enjektör konum parametrelerinin optimizasyon adımları

Yeni tasarım EAO'daki enjektör geometrileri, parametrik çalışmaya uygun olarak, ANSYS programının alt modülü ve olan 3 boyutlu çizim programı olan Design Modeler kullanılarak yeniden oluşturuldu. Klasik EAO çalışmaları sonrasında, yeni tasarım EAO için hazırlanan akış hacminin üç boyutlu (3B) modeli sonlu sayıda elemana bölünerek çözüm için gerekli olan ağ yapısı oluşturuldu. Modellemede, ağ yapısının ayarlanması önemli bir kriterdir. Çünkü simülasyonda kullanılan denklemleri doğru çözüme ulaştıracak düğüm noktaları geometri içerisine yerleştirilmektedir. Bu amaçla, ocak geometrisindeki hassas ve kaba ağ yapısına sahip olması gereken bölgeler belirlendi. Kimyasal reaksiyonların yoğunlukta olduğu ve karbonun püskürtüldüğü bölgeye küresel hacim tanımlanarak daha sık ağ yapısı oluşturuldu. Ayrıca, eriyik yüzeyi ve enjektörlerin ocak içerisine oksijen ve karbon gönderdiği giriş yüzeyleri için de katmanlı ağ yapısı kullanıldı (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Yeni tasarım EAO'nın üçgensel ağ yapısı kullanılarak oluşturulan model

Şekil 4.7'de yeni tasarım EAO'na ait sayısal modelde uygulanan farklı sınır şartları, duvar yüzeyleri ve hacimler ile karbonun ve O<sub>2</sub>'in enjektörlerden püskürtüldüğü yüzeyler gösterilmiştir.

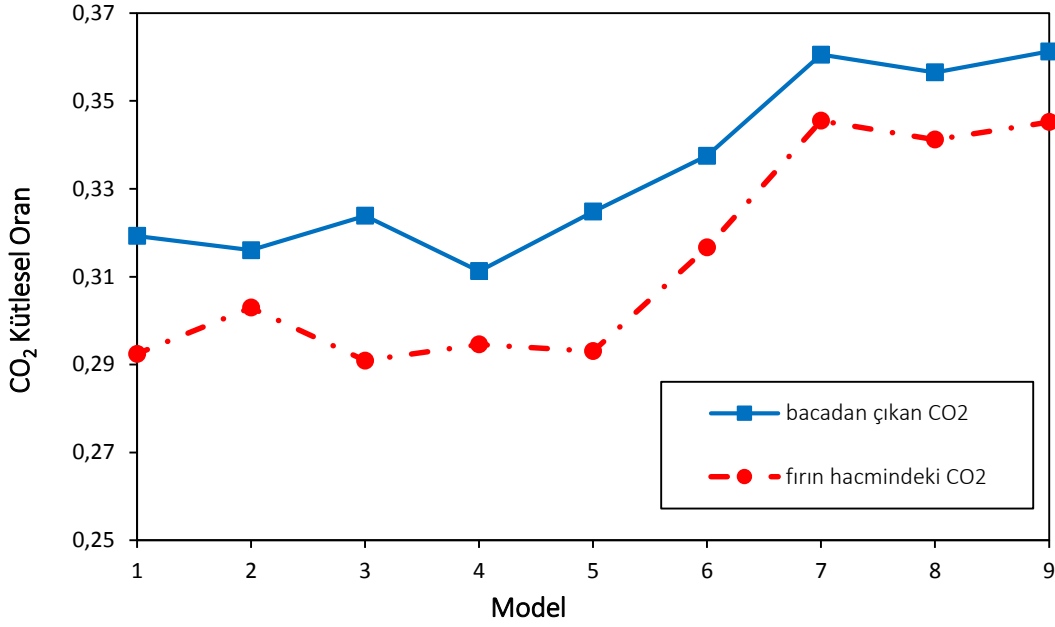


Şekil 4.7. Yeni tasarım EAO'nın sayısal modeli için sınır şartları

Karbon enjektörlerinin boyutları, EAO'nun 3B modelindeki diğer boyutlara göre çok küçük olduğundan, enjektörler temel alınarak oluşturulacak bir ağ yapısındaki eleman sayısı yüz milyonlar mertebesinde olacaktır. Bu kadar büyük eleman sayılarına sahip, yanma reaksiyonlarının da olduğu bir HAD modeli ile çözüm süreleri çok uzayacaktır. Dolayısıyla simülasyonlara başlamadan önce, uygun ağ yapısına ve eleman sayısına sahip bir EAO modeli hazırlandı. Hem çözüm sürelerini uzatmayacak hem de sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek düzeyde olan bir ağ yapısına ve mümkün olan en düşük eleman sayısına sahip 3B HAD modelini seçmek için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. HAD modeli için en uygun ağ yapısı ve eleman sayısının belirlenmesi için hazırlanan bu modellerde; fırın hacmindeki ortalama eleman uzunluğu sırası ile 0,05, 0,1 ve 0,15 mm, enjektörlerin çıkışında hız gradyenlerinin büyük olduğu ve kimyasal reaksiyonların yoğun gerçekleştiği düşünülen bölgelerde oluşturulan sık ağ yapılı küresel hacimdeki eleman uzunluğu da 0,015, 0,025 ve 0,035 mm seçilerek 9 farklı HAD modeli oluşturuldu (Tablo 4.4). Şekil 4.8'de ocak içerisinde oluşan ve bacadan çıkan CO<sub>2</sub>'in kütle oranlarının, sırasıyla ocak hacmindeki ve küresel hacimdeki eleman uzunlukları azaltılarak elde edilen farklı eleman sayısı sahip HAD modellerindeki değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Farklı boyutlar kullanılarak oluşturulan modellerin toplam eleman sayıları

<b>Model</b>	<b>Ocak hacmindeki eleman boyutu [mm]</b>	<b>Küresel hacimdeki eleman boyutu [mm]</b>	<b>Toplam eleman sayısı [adet]</b>
1	0,15	0,035	2160163
2	0,15	0,025	4056818
3	0,15	0,015	14119261
4	0,10	0,035	2846453
5	0,10	0,025	4736478
6	0,10	0,015	14796087
7	0,05	0,035	10449541
8	0,05	0,025	12297533
9	0,05	0,015	22314265



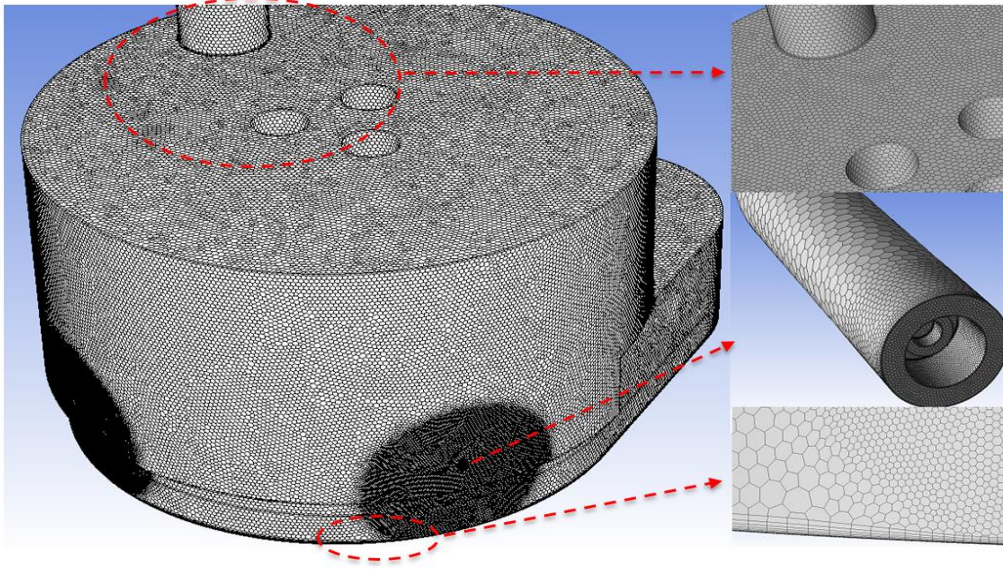
Şekil 4.8. Bacadan çıkan ve ocak içerisindeki CO<sub>2</sub> kütleli oranının eleman sayısı ile değişimi

Ocak hacmindeki eleman uzunluğu 0.05 mm ve küresel hacimdeki eleman uzunluğu 0.015, 0.025 ve 0.035 mm seçilerek oluşturulan modellerden elde edilen sonuçlara göre; bacadan çıkan ve ocak hacmindeki CO<sub>2</sub> kütleli oranlarındaki değişim yaklaşık %0.5'dir. Ancak ocak hacminde daha büyük uzunlukta (0.1 ve 0.15 mm) elemanlar kullanılarak hazırlanan modelden elde edilen sonuçlardaki değişim ise ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Bu nedenle en uygun ağ yapısı için tüm ocak hacmindeki eleman uzunluğu 0,05 mm seçilmiştir. Enjektörlerin önünde oluşturulan sık ağ yapılı küresel hacmindeki eleman uzunluğu 0,025 ve 0,035 mm seçilerek oluşturulan modellerde çok sonuçlar elde edilmiştir. Buna rağmen, yeterli bilgisayar kapasitesine sahip olduğu ve enjektörlerden çıkan jet akışında daha düzgün hız profili elde edilebildiği için küresel hacimdeki eleman boyutu/uzunluğu 0,015 mm seçilmiştir.

Sonuç olarak ocak hacmindeki elemanların ve küresel hacimdeki elemanların uzunlukları sırasıyla, 0.05 ve 0.015 mm seçilerek oluşturulan üçgensel ağ yapılı EAO HAD modelinde 22e+06 adet eleman bulunmaktadır. Ayrıca parametrik analizlerde enjektör konum geometrisi ve jetlerden etkilenen bölgeler değişeceğinden, gradyanların büyük olduğu küresel hacmin; jet akışının olduğu bölgeleri ve enjektörlerden gönderilen karbon ve O<sub>2</sub>'nin eriyik yüzeyine temas ettiği bölgeleri, olası tüm enjektör konumlarında, içerisine alabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle sık ağ yapılı kürelerin merkezleri enjektörlerin çıkış kesiti olarak seçilip ve kürelerin hacimleri artırılarak, 28e+06 eleman sayısına sahip bir HAD modeli elde edildi.



Klasik EAO'nda yapılan önceki çalışmalarda farklı ağ yapısı olan polihedral ağ ile üçgensel ağ yapısına sahip modellerin sonuçlarında uyumluluk gözlemlendi. Ayrıca polihedral ağ yapısına sahip modelin, üçgensel yapıya göre 2 kat kısa sürede çözüme ulaştığı görüldü. Bu nedenle, yeni tasarım EAO'nun enjektör optimizasyon çalışmasında polihedral ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 4.9'da polihedral ağ yapısına sahip yeni tasarım EAO ve enjektörler görülmektedir. Optimizasyonda kullanılacak yukarıda seçilen üçgensel ağ yapısında 28e+06 eleman sayılı model, polihedral ağ yapısına dönüştürüldüğünde 9,5e+06 eleman sayısı elde edildi.



Şekil 4.9. Yeni tasarım EAO'nun modelinin polihedral ağ yapısı

Klasik ve yeni tasarım EAO analizlerinde, elektrotlardan ocağa aktarılan elektriksel güç sayısal modelde elektrot yüzeylerinde ısı akısı olarak tanımlanmıştır. Tüm elektriksel güç, HAD simülasyonu başlangıcında modele verildiğinde, simülasyonun hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle elektrotlardaki ısı akısı, simülasyonun başlangıcından itibaren ilerleyen iterasyonlarda kademeli olarak artırılarak, sürekli rejimdeki elektriksel güç değerine kadar yükseltilmiştir. Ayrıca enjektörlerden gönderilen  $O_2$ 'nin giriş sıcaklığı, başlangıçta yüksek seçilerek, yanma reaksiyonlarının erken başlaması sağlanmıştır. İlerleyen iterasyonlarda  $O_2$ 'nin giriş sıcaklığı, tekrar gerçek değeri olan 300K'e düşürülmüştür. Analizlere, endüstriyel uygulamadaki sınır şartlarıyla başlanırsa, çözüm yakınsamayarak hata vermektedir. Yeni tasarım EAO'nun analizinde de aynı yol izlenmiştir. Ancak parametrik çalışmada, simülasyonu durdurup değişkenlere müdahale edilmesi mümkün değildir. Çünkü parametrik çalışma başlatıldığında, kurulum programı (FLUENT) kapanmaktadır. Bu nedenle, yeni tasarım EAO'nun optimizasyon çalışması için simülasyonlar devam ederken otomatik müdahale edecek özel bir komut kodu (execute commands) yazılmıştır (Tablo 4.5). Ayrıca bu

uygulama birçok model analizinin arka arkaya çözülmesine olanak sağlayarak, sürekli yapılması gereken manuel müdahaleler ortadan kalkmış ve çalışmanın süresi kısaltılmıştır.

Tablo 4.5. Yeni tasarım EAO'nun analizinde uygulanan komutlar

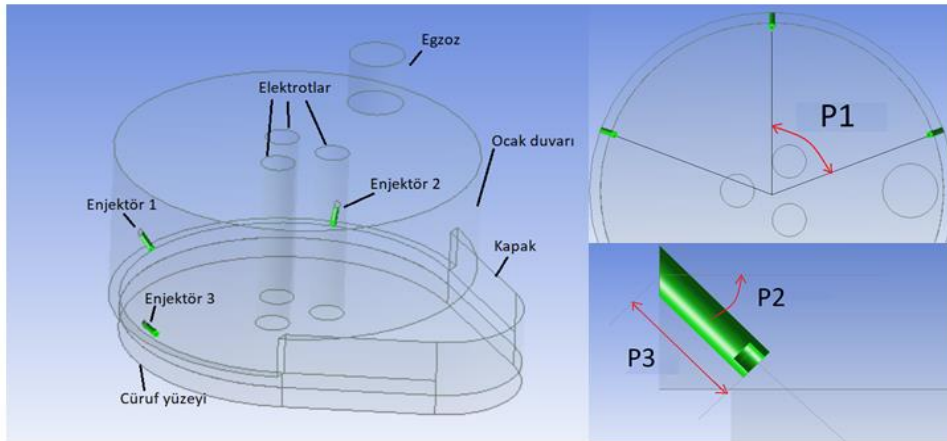
Name	Commands	iteration
<b>Original Settings</b>		50
<b>Modification 1</b>	solve set equations temperature	100
<b>Modification 2</b>	solve set equations p1	150
<b>Modification 3</b>	define boundary-conditions wall 20 0 no 0 no no no 2000000 no no no no 0.9 no 0 no 0.5 no polynomial 1 1 polynomial 1 1 yes yes yes yes yes yes no 1	50
<b>Modification 4</b>	define boundary-conditions wall 20 0 no 0 no no no 5000000 no no no no 0.9 no 0 no 0.5 no polynomial 1 1 polynomial 1 1 yes yes yes yes yes yes no 1	50
<b>Modification 5</b>	define boundary-conditions wall 20 0 no 0 no no no 10000000 no no no no 0.9 no 0 no 0.5 no polynomial 1 1 polynomial 1 1 yes yes yes yes yes yes no 1	50
<b>Modification 6</b>	define boundary-conditions wall 20 0 no 0 no no no 25000000 no no no no 0.9 no 0 no 0.5 no polynomial 1 1 polynomial 1 1 yes yes yes yes yes yes no 1	50
<b>Modification 7</b>	define boundary-conditions wall 20 0 no 0 no no no 50000000 no no no no 0.9 no 0 no 0.5 no polynomial 1 1 polynomial 1 1 yes yes yes yes yes yes no 1	50
<b>Modification 8</b>	define boundary-conditions wall 20 0 no 0 no no no 115000000 no no no no 0.9 no 0 no 0.5 no polynomial 1 1 polynomial 1 1 yes yes yes yes yes yes no 1	50
<b>Modification 9</b>	define boundary-conditions velocity-inlet 12 no no yes yes no 137 no 0 no 300 no no no yes 2.772 0.03789 no no 0 no 1 no 0 no 0 no 0 no 0 yes no 0.3 no	10
<b>Modification 10</b>	define boundary-conditions velocity-inlet 14 no no yes yes no 137 no 0 no 300 no no no yes 2.772 0.03789 no no 0 no 1 no 0 no 0 no 0 no 0 yes no 0.3 no	10
<b>Modification 11</b>	define boundary-conditions velocity-inlet 16 no no yes yes no 137 no 0 no 300 no no no yes 2.772 0.03789 no no 0 no 1 no 0 no 0 no 0 no 0 yes no 0.3 no	1000

Karbon partiküllerinin yanmadan ocak içerisine dağılması için başlangıçta enerji ve radyasyon kapalı tutularak (ilk 50 iterasyon) çözüm yapıldı. Çalışmamızda EAO'nun elektrotlarından aktarılan toplam elektriksel güç 100 MW'tır. Bu güç sayısal modelde, elektrotların alt yüzeylerinden verilen  $1.15e+08$  W/m<sup>2</sup>'lık bir ısı akısı ile tanımlanmıştır. Karbon partikülleri ocağa dağıtıldıktan sonra sırasıyla enerji ve radyasyon komut açılmıştır. Bu aşamada elektrotların alt yüzeyindeki ısı akısı  $1e+06$  W/m<sup>2</sup> 'den başlayıp, kademeli artırılarak 700 iterasyonda  $1.15e+08$  W/m<sup>2</sup> 'ye çıkarıldı. Son olarak enjektörlerden püskürtülen O<sub>2</sub>'nin sıcaklığı, 1500K'den 300K'e düşürülerek, çözüm bu koşullardan itibaren 1000 iterasyon ilerletilerek asıl analiz sonuçları elde edildi.

EAO'nda enjektör optimizasyonu, enjektörlerin ocak içerisindeki konum geometrisinde değişiklikler yapılarak gerçekleştirildi. Ocağın yapısı, enjektör konumlarındaki değişime sınırlamalar getirmekle birlikte, çok geniş aralıklarda değişime olanak da sağlamaktadır. Analiz yapılacak model sayısını ve dolayısıyla simülasyon süresini gereksiz yere artırmamak amacıyla, enjektör konum parametrelerindeki değişim aralıkları bir ön çalışma yapılarak daraltıldı. Sonrasında daraltılmış aralıklar referans alınarak, analiz edilecek modeller otomatik olarak oluşturuldu. Analiz sonuçları RSO metodu kullanılarak değerlendirildi.

#### 4.3 Enjektör Optimizasyon Parametreleri

EAO'nın verimlerini arttırmak için kimyasal enerjiden daha fazla faydalanılması gerekmektedir. Enjektörlerden püskürtülen  $O_2$  ve karbonun bir miktarı, enjektör çıkışından eriyik yüzeyine ulaşana kadar, gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla yanarken geri kalanı eriğin içerisine girmektedir. Dolayısıyla enjektör konum geometrisindeki küçük bir değişiklik; kimyasal reaksiyonların oluşma yerini, açığa çıkan enerji miktarını, tepkimeye giren-çıkan gazların miktarını ve eriğin içerisine giren  $O_2$  ve karbonun miktarını değiştirmektedir. Bu nedenle, enjektörlerin merkezi açısı (EMA), enjektörlerin püskürtme açısı ve enjektörlerin uzunlukları değiştirilerek, enjektörün konum geometrisinin, yanan ve eriğin içerisine giren karbon miktarı açısından optimizasyonu hedeflenmiştir. Şekil 4.10'da optimizasyon çalışması yapılan yeni tasarım EAO'nın geometrisi ve enjektörlerin EAO duvarlarındaki konumu ve açıları görülmektedir.



Şekil 4.10. EAO'nun enjektör optimizasyon parametreleri; EMA P1, püskürtme açısı P2, enjektör uzunluğu P3

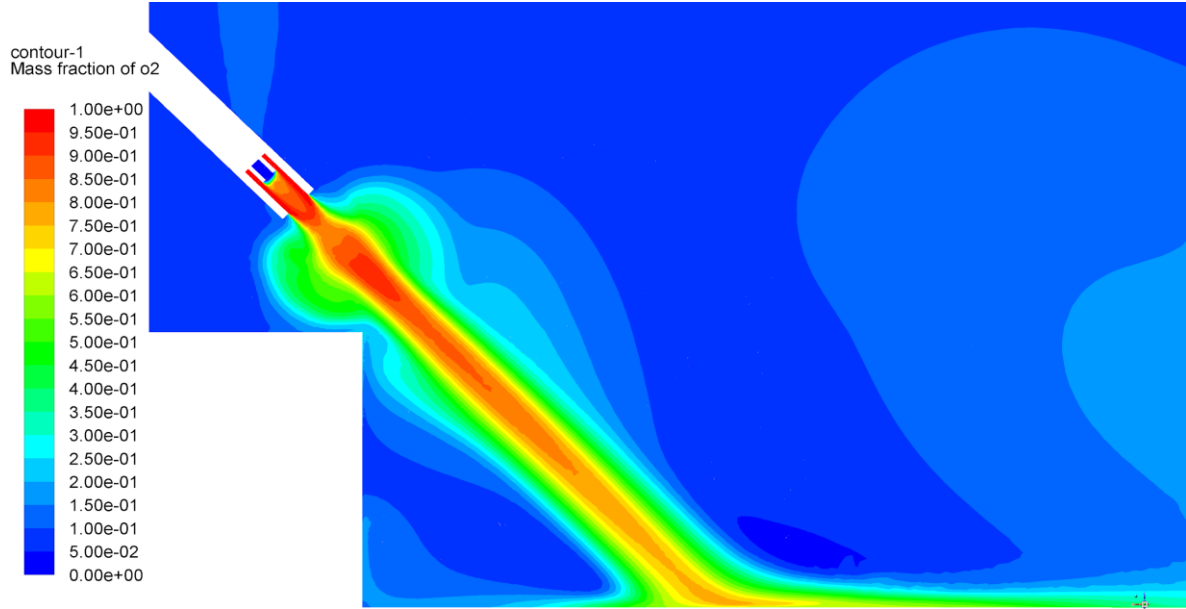
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1 Klasik Geometriye Sahip EAO İçin Doğrulama Çalışması Sonuçları (RANS Türbülans)

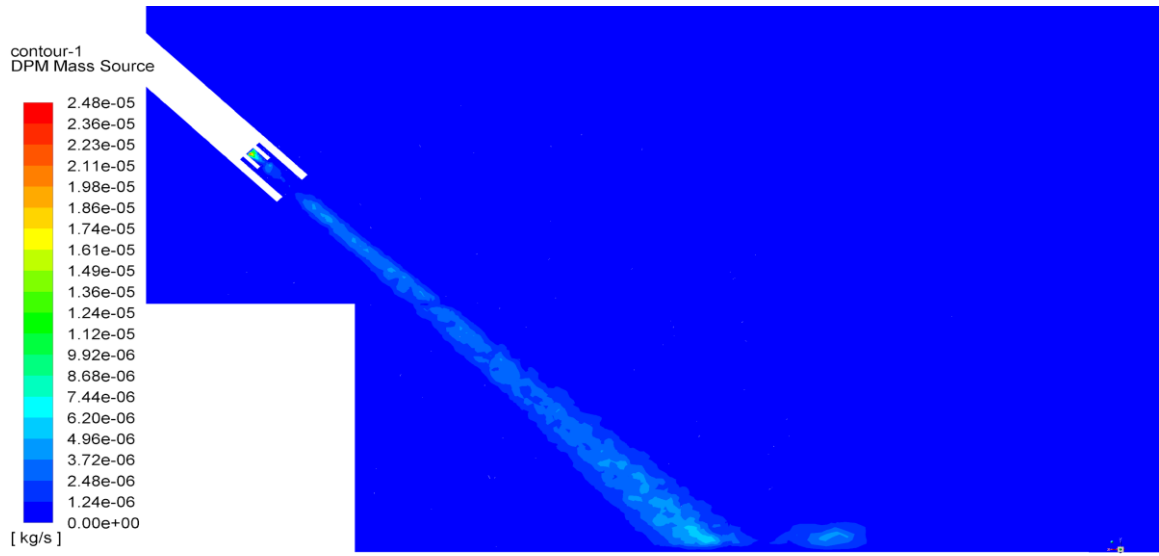
Proje aşamalarında belirtildiği gibi yeni tasarım EAO için analiz ve optimizasyon çalışmaları yapılmadan önce, klasik bir EAO'nun geometrisi üzerinde, sayısal model için doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Doğrulama çalışmasında klasik EAO için kullanılan tüm sınır koşulları, yeni tasarım EAO simülasyonları ile aynıdır. Yani enjektörlerin konumları, uzunlukları ve enjektör açıları başlangıçta aynı alınarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Sınır koşulları ve geometrik bilgiler doğrudan üretici firmadan (CVS Teknolojileri) ve literatür taraması ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise yine literatürden ve üretici firmadan elde edilen veriler ile doğrulanmıştır.

Şekil 5.1'de enjektör 1'i düşey kesen iki boyutlu bir yüzeyden alınan  $O_2$ , kömür enjeksiyonu,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$  ve  $H_2$  görüntüleri verilmiştir. Doğrulama çözümleri için elde edilen bu dört bileşenin yaptığı kimyasal reaksiyonlar göz önüne alındığında ortaya çıkan görsel verilerin oldukça mantıklı ve doğru olduğu anlaşılmaktadır. Bu görüntüleri deneysel olarak elde etmek mümkün olmadığı için doğruluğunu varsayımlarla yapmak gerekmektedir.  $O_2$ 'nin yanma reaksiyonlarına girerek enjektörden eriyik yüzeyine doğru ve enjektör hattından fırın hacmine doğru azaldığı, bununla birlikte eriyik yüzeyine yakın bir bölgede ise  $CO$ 'in arttığı görülmektedir.

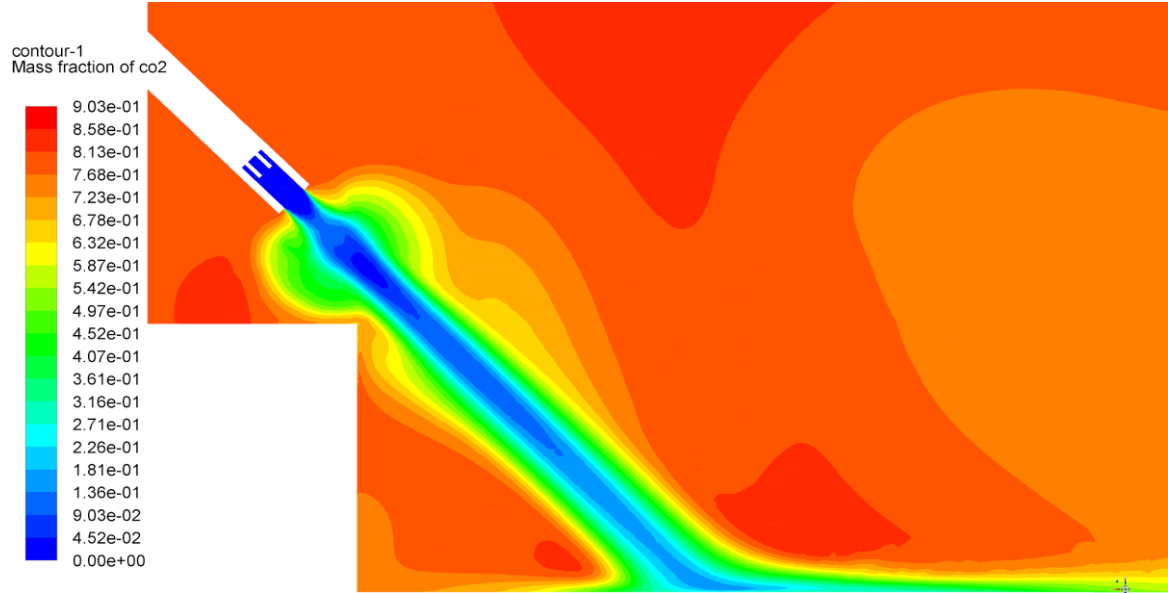
Yine karbonun, enjektörden çıktığı bölgede, bol miktardaki  $O_2$  ile hızlı bir reaksiyona girip azaldığı, fakat daha sonra  $O_2$  konsantrasyonunun gittikçe azalmasından dolayı eriyik yüzeyine doğru konsantrasyonun artmaya başladığı görülmektedir. Hem  $O_2$ 'nin kömür parçacıkları (katı faz ve uçucu bileşenler) hem de  $CO$  ile yaptığı reaksiyonlar neticesinde, EAO hacminin geri kalan kısımlarının yoğun bir şekilde  $CO_2$  ile kaplandığı, hatta bazı alanlarda  $CO_2$ 'in %90 'lık bir konsantrasyona ulaştığı anlaşılmaktadır.



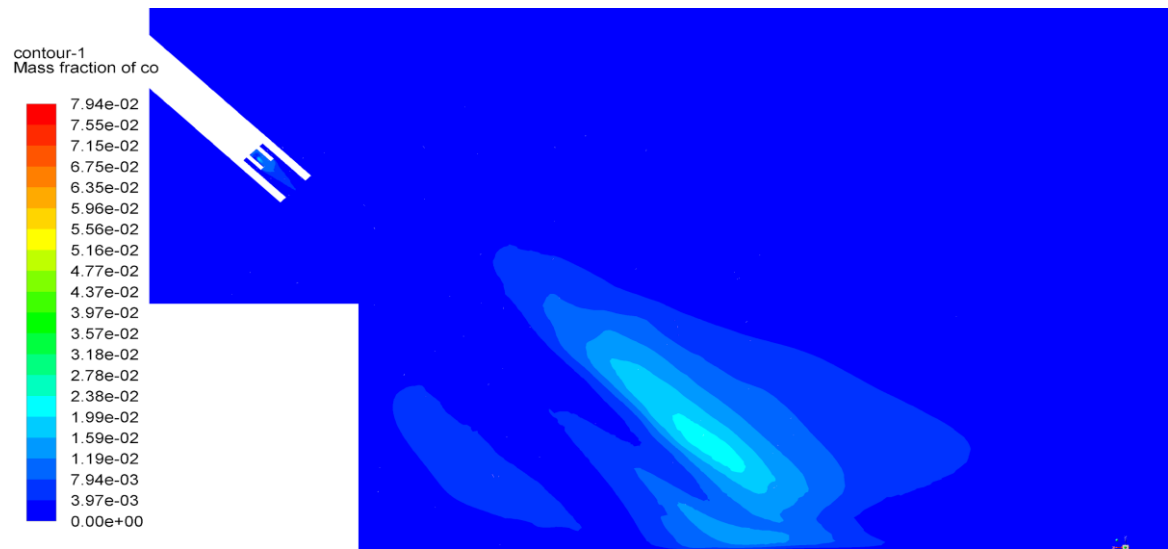
(a)



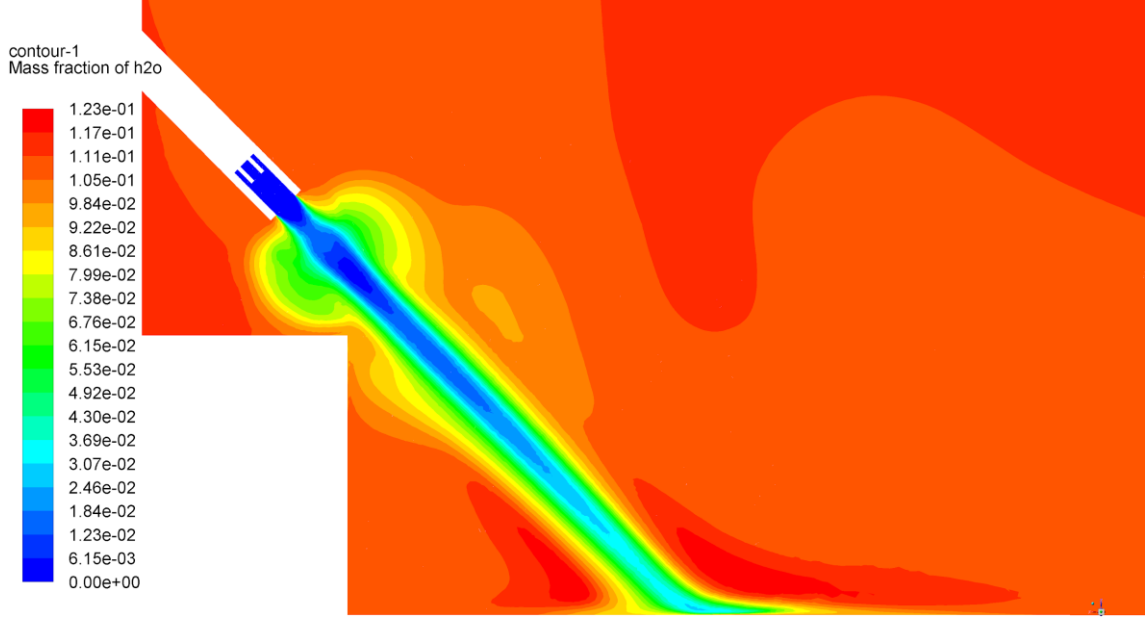
(b)



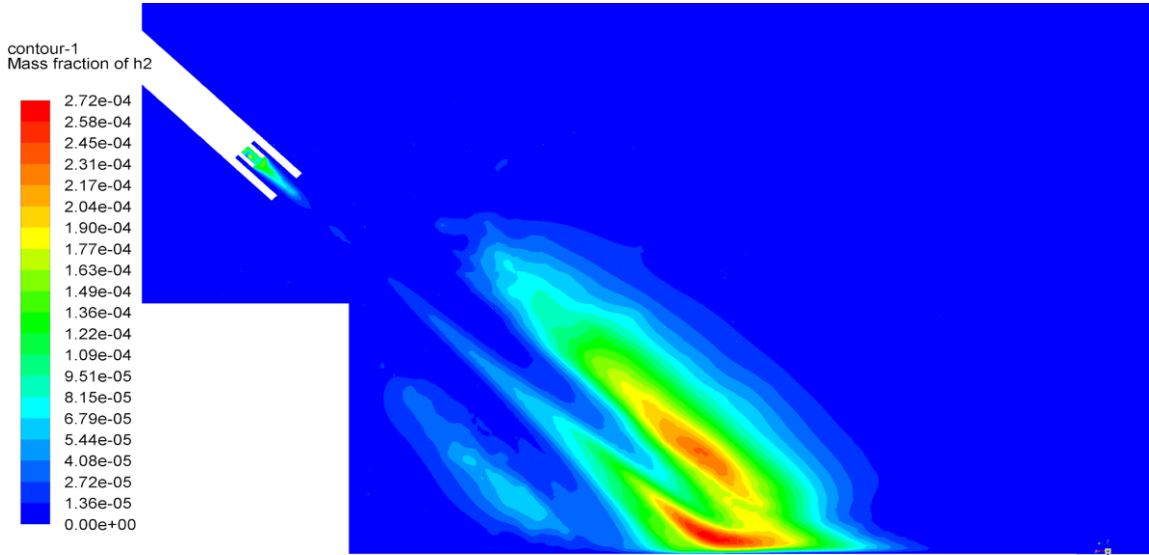
(c)



(d)



(e)

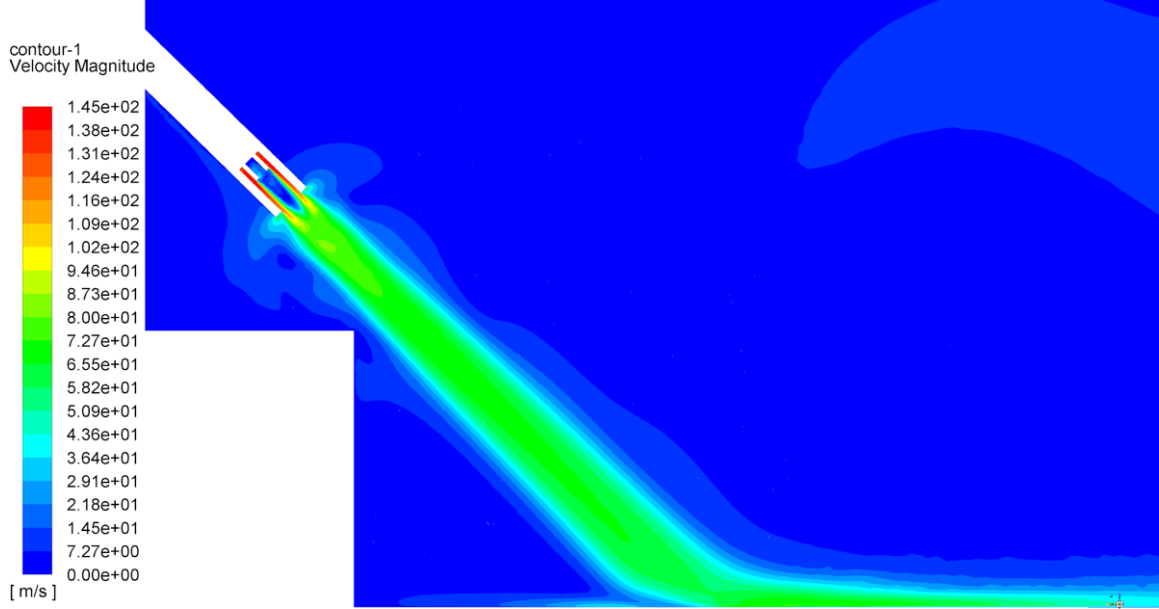


(f)

Şekil 5.1. Enjektör 1'in düşey ekseninden geçen simetri düzleminde alınan; (a) O<sub>2</sub>, (b) karbon (kömür enjeksiyonu), (c) CO<sub>2</sub>, (d) CO, (e) H<sub>2</sub>O ve (f) H<sub>2</sub>'in 2-boyutlu konstantasyon dağılım görüntüleri.

Klasik EAO'na yönelik doğrulama çalışmaları için enjektör 1'den eriyik yüzeyine doğru olan enjeksiyon hızı ile yanma reaksiyonu sonucu oluşan sıcaklık dağılımının, enjektör düşey simetri düzlemindeki 2-boyutlu görüntüsü Şekil 5.2 'de verilmiştir. Bu görsel verilere göre, enjektörden çıkan karbon ve oksijen hız profili beklendiği gibi enjektörden itibaren doğrusal bir

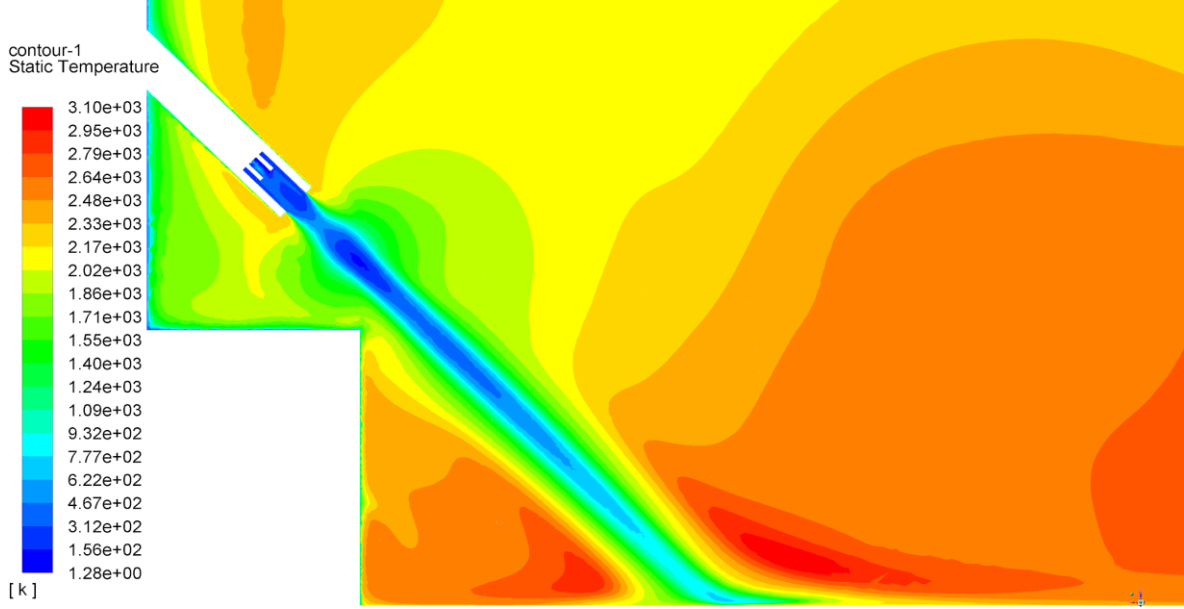
yol izleyerek eriyik yüzeyine ulaşmaktadır. Enjektör çıkışında 137 m/s olan jet hızının, eriyik yüzeyine doğru azaldığı ve eriyik yüzeyinde yaklaşık 65 m/s'ye düştüğü görülmüştür. Eriyik içerisine nüfuz etmesi için yüksek hızda gönderilen oksijen jetinin, yüzeye küçümsenmeyecek bir hızla ulaşması nedeniyle, eriyik içerisinde de bir miktar yol alacağı görülmektedir.



Şekil 5.2. Enjektör 1'i düşey kesen iki boyutlu bir yüzeyden alınan hız dağılımı

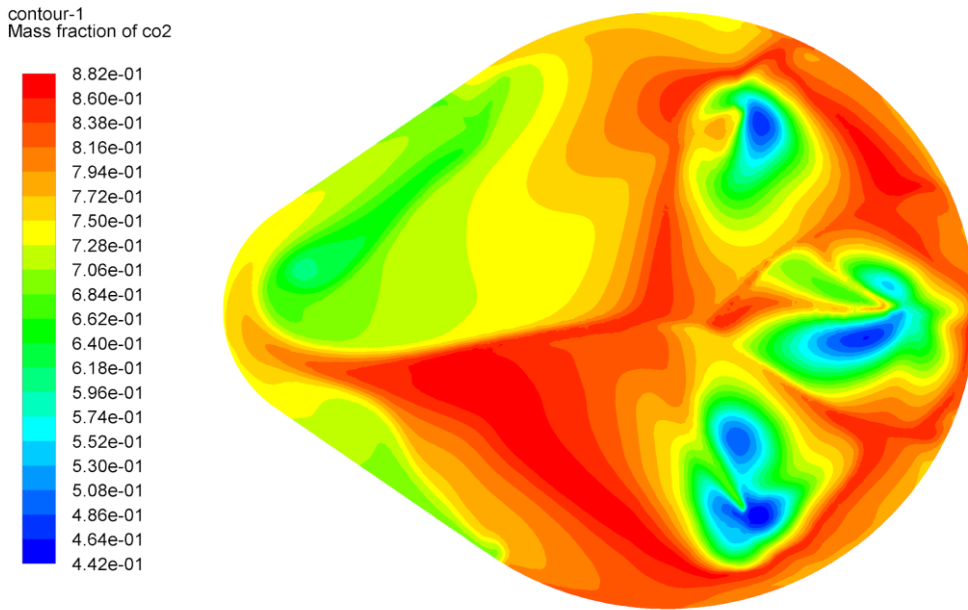
Şekil 5.3 'de görüldüğü üzere; ortam sıcaklığı, yanma reaksiyonları sonucunda, eriyik yüzeyine doğru artarak 3100K'e kadar yükselmiştir. Yine beklendiği gibi, EAO atmosferinden daha düşük sıcaklıkta ve yüksek hızlarla enjekte edilen oksijenin, yanma reaksiyonlarına rağmen, jet ekseninde tam olarak tükenmediği ve yüzeye yakın bir bölgede yerel soğumaya neden olduğu görülmektedir.





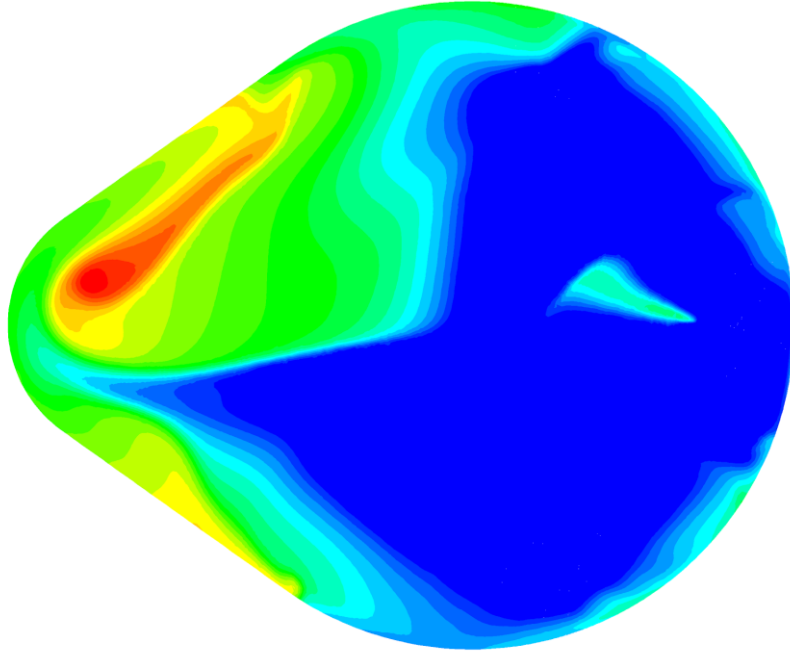
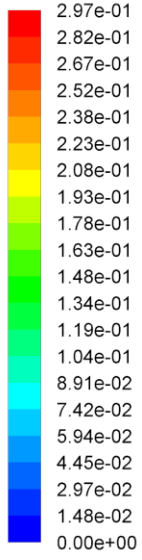
Şekil 5.3 Enjektör 1'i düşey kesen iki boyutlu bir yüzeyden alınan sıcaklık dağılımı

Eriyik yüzeyinden alınan iki boyutlu görsellerde;  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  ve yüzey sıcaklığı verileri Şekil 5.4'de görülmektedir. Enjektörden elde edilen görsel verilerle örtüşen bir biçimde, eriyik yüzeyinde oksijen yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde  $\text{CO}_2$  ve  $\text{CO}$  değerlerinin oldukça düşük olduğu, oksijenin ulaşamadığı bölgelerde ise özellikle eriyik kaynaklı  $\text{CO}$  birikiminin olduğu görülmektedir. Ortalama değeri 2015 K olan yüzey sıcaklığının, yanma reaksiyonlarının gerçekleştiği bölgelerde 2340 K'e kadar yükseldiği anlaşılmaktadır.



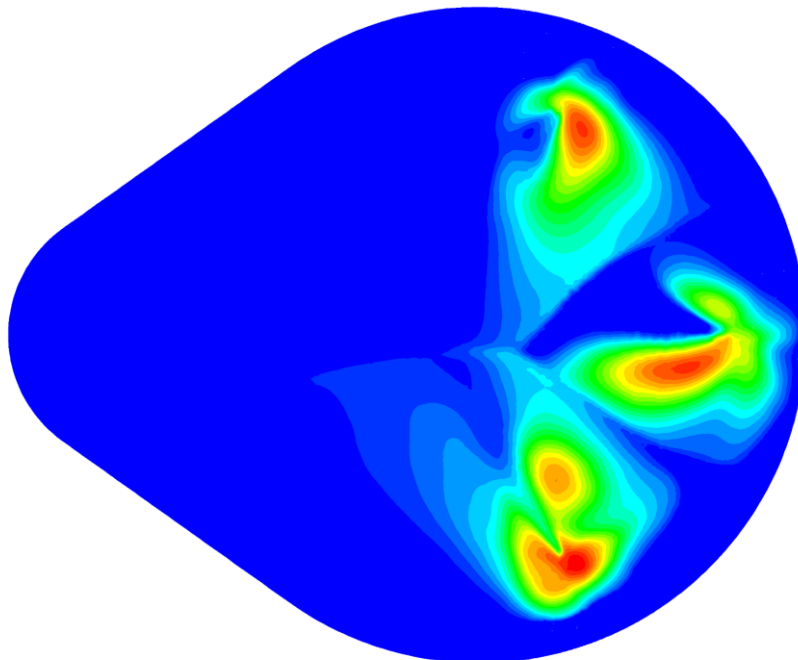
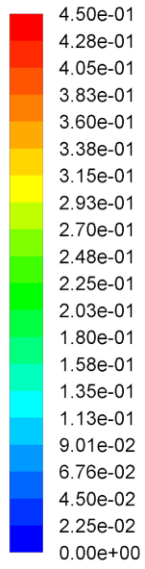
(a)

contour-1  
Mass fraction of co

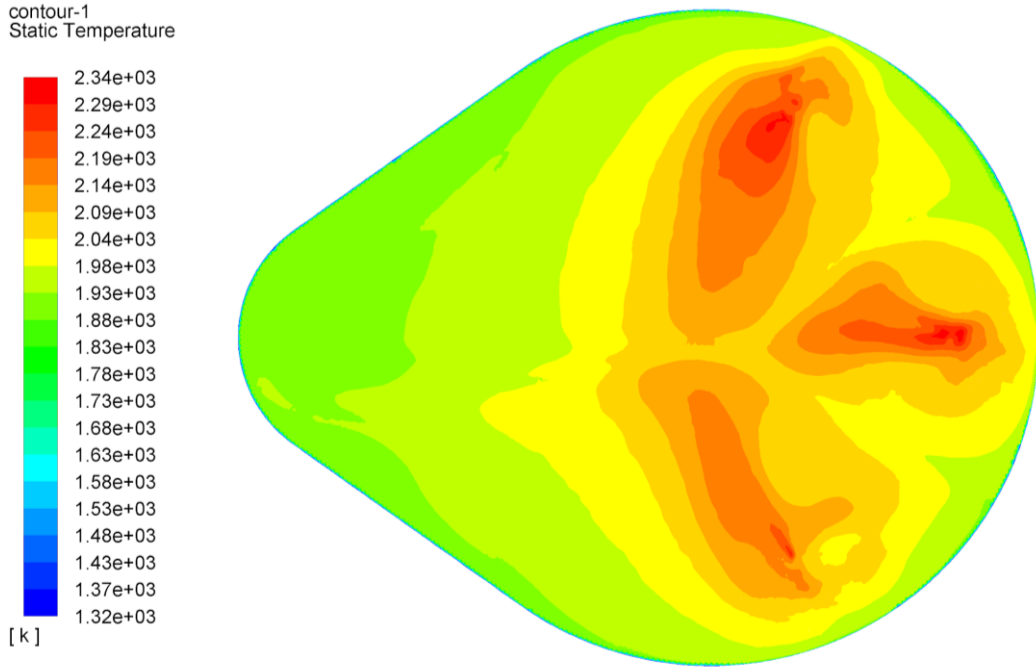


(b)

contour-1  
Mass fraction of o2



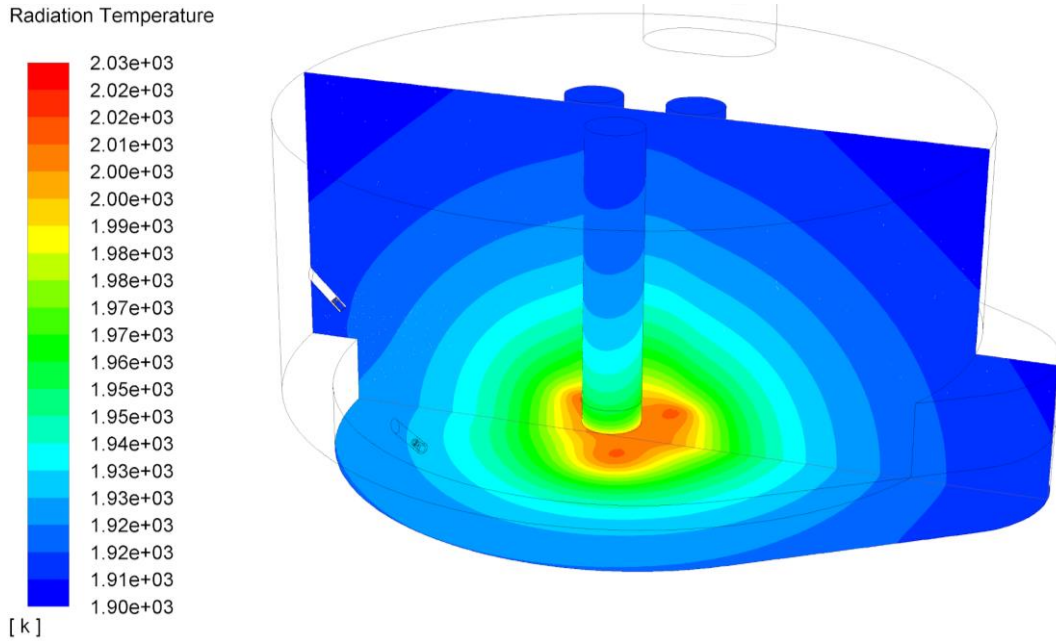
(c)



(d)

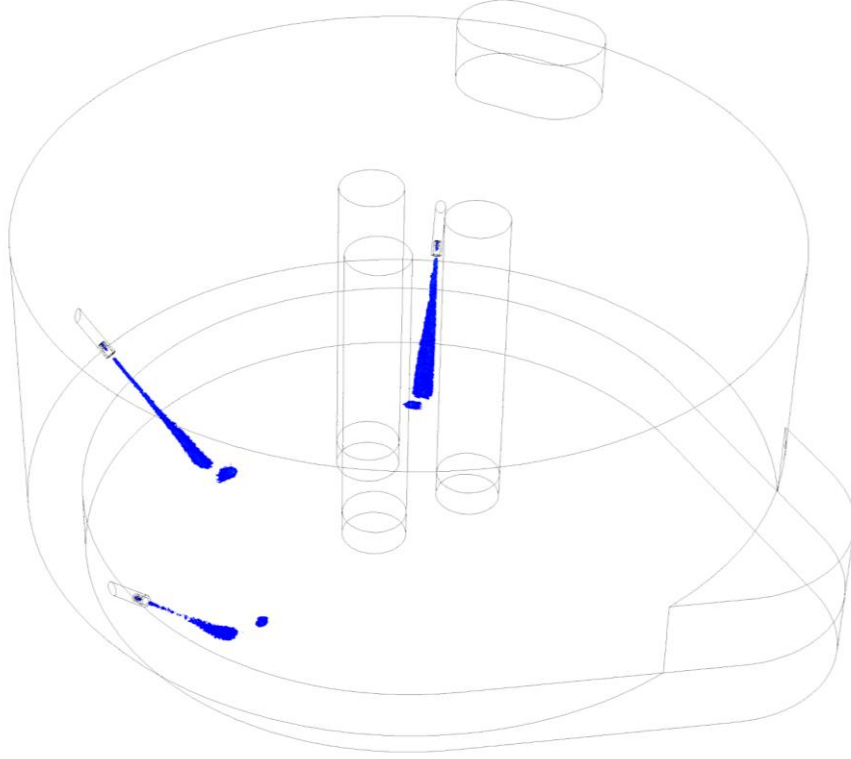
Şekil 5.4. Eriyik üst yüzeyindeki (a) CO<sub>2</sub>, (b) CO, (c) O<sub>2</sub> ve (d) yüzey sıcaklığı dağılımları

Şekil 5.5'de verilen radyasyon sıcaklık dağılımlarından, yüzeydeki ortalama radyasyon sıcaklığının 1937 K'e ulaştığı görülmektedir. Bu durumda yanma reaksiyonları sayesinde, yüzeydeki ortalama radyasyon sıcaklığına göre yaklaşık 80 K'lik ek bir sıcaklık artışı ile ergime sürecinin hızlandığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.5. Radyasyon sıcaklığı için iki boyutlu yüzeylerden alınan görseller

Şekil 5.6'da enjektörlerden eriğe gönderilen karbonun gaz fazındaki dağılımı 3B olarak verilmiştir. Karbonun enjektör çıkışından itibaren gaz fazına geçmeye başladığı, sıcak EAO atmosferinde ilerledikçe daha fazla gaz fazına geçmeye devam ettiği ve oksijen jeti ile birlikte doğrusal bir yol izleyerek eriyik yüzeyine ulaştığı görülmüştür.

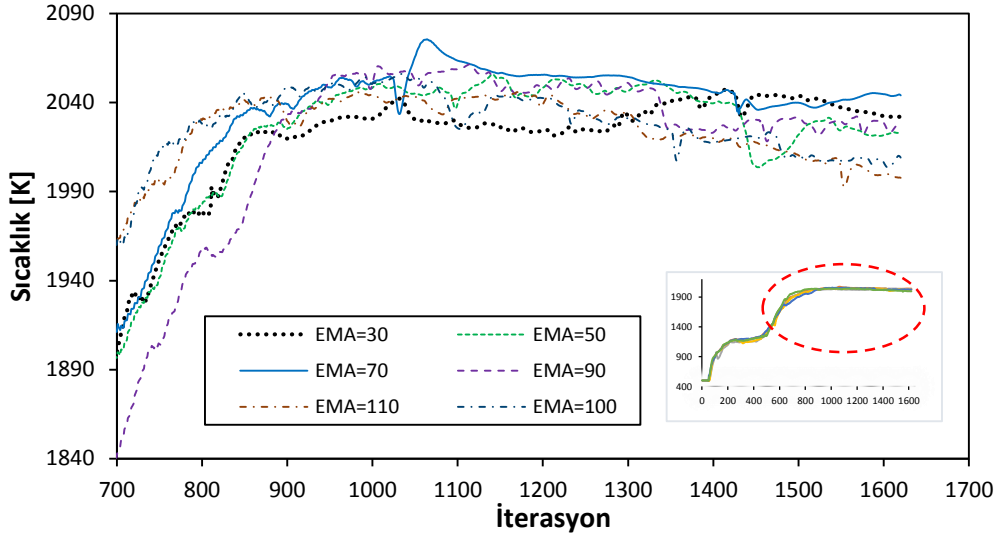


Şekil 5.6. Enjektörlerden gönderilen karbonun, oksijen jeti ile sürüklenirken gaz fazına geçmesi ve eriyik yüzeyine ulaşması

## 5.2 Yeni Tasarım EAO İçin Simülasyon Çalışması Sonuçları

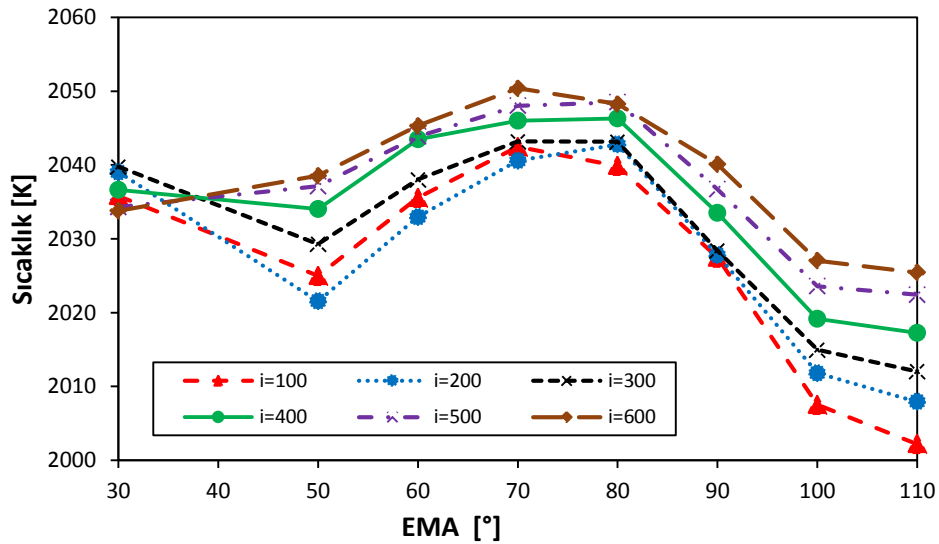
### 5.2.1 Optimizasyon Çalışması

Eriyik yüzeyindeki ortalama statik sıcaklık, enjektör konum parametrelerindeki değişimin EAO verimindeki etkilerini değerlendirebilmek için önemli bir göstergedir. Simülasyon sonundaki (1620 iterasyon) sıcaklık değeri, birkaç iterasyon önceki sıcaklık değeri ile 5-10 K farklılık gösterebilmektedir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Farklı EMA ile konumlandırılmış enjektörlere ait EAO modellerinde eriyik yüzeyindeki ortalama statik sıcaklığın çözümdeki iterasyon sayısı ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)

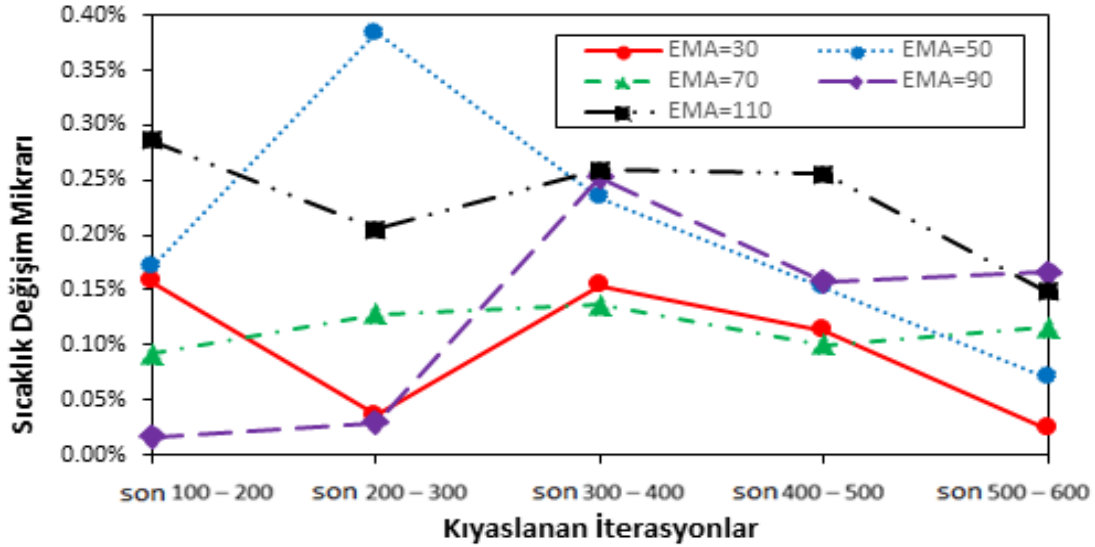
Bu düzensizlik karbon partiküllerinin enjektörden 50 iterasyonda bir gönderilmesinden kaynaklanmaktadır. Karbon partikülleri her bir iterasyonda gönderildiğinde, simülasyon çözüme ulaşmadığı için karbon partikülleri aralıklı olarak gönderilmiştir. Bu düzensizliği giderip simülasyon sonuçlarını daha sağlıklı değerlendirmek amacıyla, performansın incelenmesinde kullanılan değişkenlere ait çözüm sonuçlarının, son 100, 200, 300, 400, 500 ve 600 iterasyona ait ortalamaları alınmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Farklı iterasyon aralıklarından ortalama alınarak hesaplanan ortalama yüzey sıcaklığının EMA ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)

Şekil 5.8’de, enjektörlerin 30°-110° aralığındaki 8 farklı EMA’da konumlandırıldığı, enjektör püskürtme açısının 45° ve enjektör uzunluğu 300 mm sabit tutulduğu 8 farklı modele ait sonuçlar verilmiştir. Son yüz iterasyondan elde edilen ortalama yüzey sıcaklığının; EMA 70° olan model için maksimum ve 110° olan model için ise minimum olduğu görüldü. Bu durum bütün iterasyon aralığındaki ortalama sıcaklık değerleri için geçerlidir.

Farklı iterasyon aralıklarında ortalama alınarak elde edilen ortalama eriyik yüzey sıcaklıklarının, EMA’ya bağlı değişimleri neredeyse aynı davranışı göstermektedir. Ayrıca farklı iterasyon aralıkları seçilerek hesaplanan ortalama sıcaklık değerlerindeki değişimin, farklı EMA açısına sahip her bir model için yaklaşık %0.2 civarında olduğu görüldü (Şekil 5.9). Bu nedenle nihai değerlendirmeler, çözümlerden elde edilen bütün verilerin son üç yüz iterasyondaki ortalama değerleri alınarak yapılmıştır.



Şekil 5.9. İterasyon aralıklarının ortalama eriyik yüzey sıcaklığına etkisi

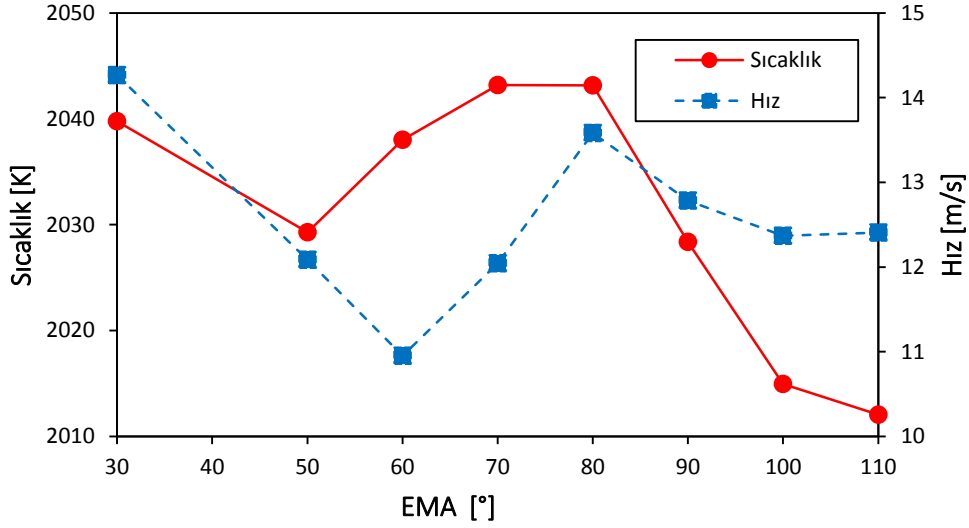
EAO’nda enjektör konum parametrelerinin HAD ile optimizasyonu yapmak amacıyla; EMA, püskürtme açısı ve enjektör uzunluğunun dar bir aralıktaki alt ve üst sınırlarını belirlemek gerekmektedir. Parametrelerin aralıkları geniş tutulursa analiz yapılacak model sayısı artacaktır. Simülasyon süresini gereksiz yere artırmaktan kaçınmak için bu aralıkların daraltılması yoluna gidilmiştir. Bu nedenle optimizasyon çalışmalarına başlamadan önce, parametrelerden biri değiştirilip diğer ikisi sabit tutularak simülasyon çalışmaları yapılmış ve çıkan sonuçlar değerlendirilerek değiştirilen ele alınan parametrenin aralığı daraltılmıştır. Bu uygulama diğer iki parametre için de sırasıyla uygulanmıştır.

### 5.2.2 Enjektörlerin Merkezi Açısı (EMA)

EAO'nda enjektör konum optimizasyonu yapılması amacıyla ilk değiştirilen parametre; enjektörlerin merkezi açısıdır (EMA). Diğer 2 parametre, klasik EAO tasarımında kullanıldığı değerlerde (enjektör püskürtme açısı  $45^\circ$  ve enjektör uzunluğu 300 mm) sabit tutuldu ve sadece EMA değiştirilerek 8 farklı EAO modeli oluşturuldu. Çalışmamızda kullanılan üç enjektörlü yeni tasarım EAO'nda, ilave kapaktan dolayı EMA maksimum  $110^\circ$  minimum ise  $40^\circ$  olarak belirlendi. Şekil 5.10 'de verilen grafikte;  $40^\circ$ - $110^\circ$  aralığında 8 farklı EMA kullanılarak yapılan simülasyonlardan elde edilen, eriyik yüzeyindeki ortalama sıcaklıklar ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızlar gösterilmektedir.

EAO 'nda yüzey üzerindeki jet hızının ve eriyik yüzey sıcaklığının yüksek olması istenir. Çünkü eriyik yüzeyi üzerindeki yüksek ortalama jet hızı; enjektörlerden püskürtülen  $O_2$  ve karbonun (katı), kimyasal tepkimeye girmeden, büyük miktarlarda eriyik yüzeye ulaştığını, yüzeydeki yüksek ortalama sıcaklık ise yanma sonucu açığa çıkan enerjinin eriyiğe geçen miktarının fazla olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmalardan, eriyik yüzeydeki en yüksek ortalama sıcaklıklara (yaklaşık 2043 K)  $70^\circ$  ve  $80^\circ$  EMA sahip modellerde ulaşıldı (Şekil 5.10). EMA  $80^\circ$ 'nin üzerine çıktıkça ve  $70^\circ$ 'nin altına düştükçe eriyik yüzeyinde ortalama sıcaklığın düştüğü görüldü. Klasik ark ocakları için EMA'nın gerçek uygulamalarda  $70^\circ$  alındığı bilinmektedir (CVS Teknolojileri firmasından alınmıştır). Bununla birlikte EMA'nın  $30^\circ$  olduğu durumda da sıcaklık ve hız değerlerinin arttığı görülmüştür. Ortalama yüzey sıcaklığının EMA= $30^\circ$ 'de artması, bir enjektörün püskürttüğü  $O_2$  ve karbonun diğer bir enjektörün püskürttüğü  $O_2$  ve karbonla karışması ve enjektörlerin eriyik yüzeyindeki etki alanının daralmasından kaynaklanmıştır. Dolayısıyla 300 K 'de püskürtülen  $O_2$  ve karbonun eriyik yüzey üzerindeki soğutucu etkisi diğer modellere göre daha az olmaktadır. Benzer şekilde yüzey üzerindeki ortalama hız da enjektörlerin birbirine çok yakın olduğu ve püskürtülen  $O_2$  ve karbonun ilave bileşke hızlar oluşturduğu EMA= $30^\circ$ 'de yükselmiştir. Ancak jetlerin belli bir bölgede yoğunlaşması nedeniyle, yüzeydeki üniform sıcaklık ve hız dağılımı bozulmaktadır. Geri kalan modeller arasında en yüksek ortalama hıza (13,6 m/s) EMA= $80^\circ$  olan modelde ulaşılmıştır.



Şekil 5.10. Eriyik yüzeydeki ortalama sıcaklık ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızın EMA ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)

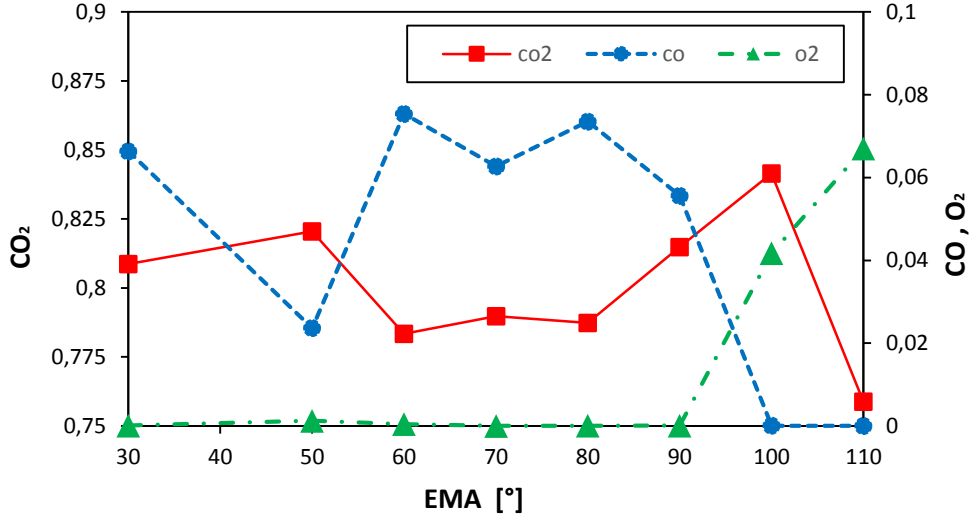
Gerçek uygulamada EAO'nda iyi cürüflü köpük üretiminin sağlanabilmesi için CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir (Li ve Fruehan, 2003). Bunun için eriyiğin içerisine O<sub>2</sub> ve karbon gönderilip, hem FeO Fe'e indirgenir hem CO üretimi artırılır hem de hurda malzeme içerisindeki Al, Ca, Si, Mg, Mn elementleri oksitlenerek cürufun akışkanlığı yönünde kalitesi iyileştirilir. Böylece cürufun viskozitesinin de, CO baloncuklarını yeteri kadar uzun süre tutabilecek akışkanlıkta olması sağlanır (Li ve Fruehan, 2003).

EAO'nun enerji verimliliğindeki artış, cürufun köpürdüğü durumda %60-65 seviyelerindeyken köpürmenin olmadığı durumda %30-35 seviyesindedir. Burada kapağın açılmaması ve karbon enjeksiyonu ile köpüklü cüruf ile çalışılması durumunda, elektrik enerjisi yerine kullanılan kimyasal enerjide %4-5 'lik bir artış sağlandığı bilinmektedir.

Buradaki asıl amaç; enjektör konumları değiştirilerek, püskürtülen O<sub>2</sub> ve karbonun oluşturduğu kimyasal reaksiyonların ürettiği enerjiden daha fazla faydalanılması ve bir miktarının da eriyiğin içerisine girmesidir. Bu amaçla jet EAO atmosferinden geçerken, kimyasal reaksiyonların gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek için bacadan çıkan gazların miktarları ile doğrulama yapılmıştır. Bu kapsamda Şekil 6'da, üç enjektörlü yeni tasarım EAO'nun bacasından çıkan gazların kütle oranlarının EMA ile değişimi 8 farklı model için incelenmiştir. Yanma ürünü CO<sub>2</sub>, 100° EMA'na sahip modelde en yüksek değerine ulaşırken, O<sub>2</sub>'nin bir miktarının kullanılmadan bacadan salındığı görülmektedir. Başka bir ifade ile 90°'lik EMA'na kadar, O<sub>2</sub>'nin çoğunun ortamdaki ve eriyik içerisindeki elementlerin oksidasyonunu sağladığı ve bu açı daha

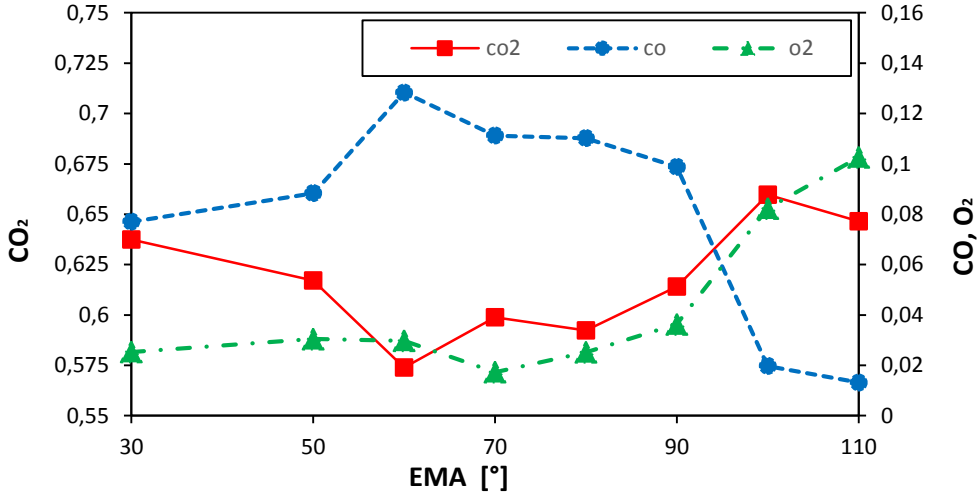


fazla artınca kullanılmayan O<sub>2</sub>'nin diğer gazlar ile birlikte bacadan atıldığı görülmektedir. Yine eriyik yüzeyindeki cüruf oluşumu için gerekli olan CO miktarı da göz önünde bulundurulduğunda, 60° ile 80° arasındaki EMA açılarının sahip modellerin en uygun modeller olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 5.11).

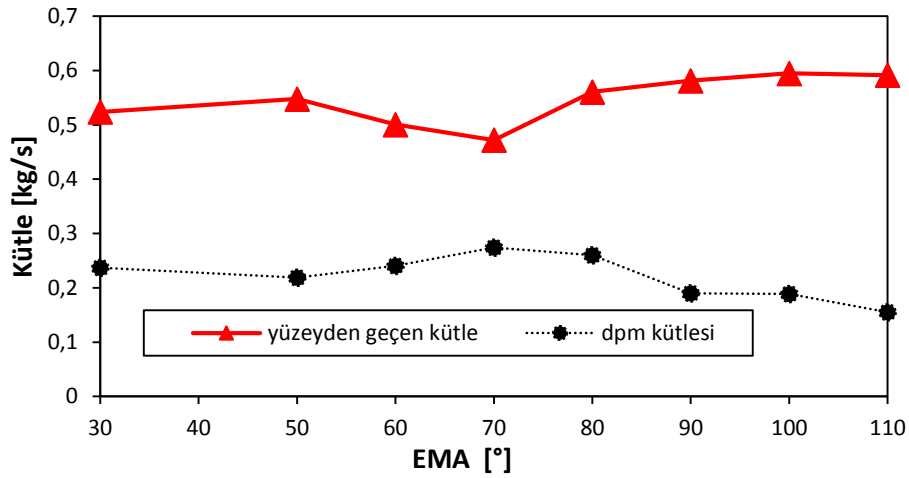


Şekil 5.11. Bacadan çıkan gazların kütle oranlarının EMA ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)

Şekil 5.12'de ise eriyik yüzey, üzerindeki gazların kütle oranları 8 farklı model için gösterilmektedir. Eriyığe giren O<sub>2</sub> ve eriyik içerisindeki reaksiyonların ürünü olan ve yüzeyden fırına geçen CO miktarı göz önüne alındığında, bacadan çıkan gazlar ile eriyik yüzeyi üzerindeki gazların uyumlu olduğu görülmektedir. Bu da yapılan analizleri doğrulamaktadır. Analiz çalışmalarımız kapsamında fırın hacmindeki DPM ve eriyik yüzeyinden geçen karbon miktarı da incelediğimiz bir diğer önemli parametredir (Şekil 8). Fırın hacmindeki dpm ve eriyik yüzeyinden geçen karbon miktarlarının da uyumlu olduğu gözlenmektedir. Başka bir ifade ile bu parametrelerden biri azalırken diğeri artmaktadır (Şekil 5.13).



Şekil 5.12. Eriyik yüzeyi üzerindeki gazların kütesel oranlarının EMA ile değişimi (püskürtme açısı=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)



Şekil 5.13. EAO içerisindeki dpm ve eriyik yüzeyinden geçen kütle miktarının EMA ile değişimi (enjektör uzunluğu=45°, enjektör uzunluğu=300 mm)

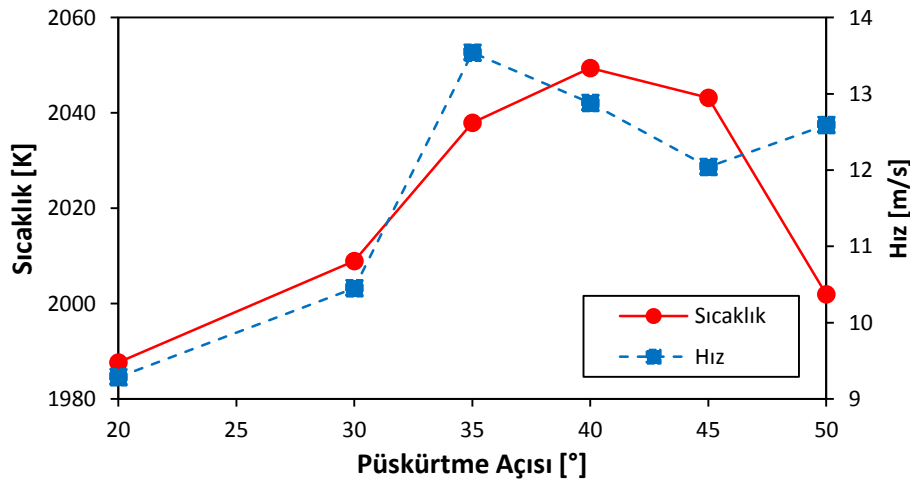
Yukarıdaki çalışmalar kapsamında farklı modeller üzerinde denemeler yapılarak, kimyasal reaksiyon enerjisinden daha fazla faydalanmak hedeflenmiştir. Bu yapılırken, kaliteli cüruf üretimi için eriyiğe girmesi gerekli O<sub>2</sub> ve karbon miktarının azalmaması da hedeflenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre; 60°, 70° ve 80° EMA'larına sahip modellerin ortalama eriyik yüzey sıcaklıkları yüksek çıkarken, 90°'lik modelin sıcaklığı ise diğerlerine göre yaklaşık %0,7 daha düşüktür. Bununla birlikte EMA 90°'nin üzerine çıktıkça, reaksiyona girmeden bacadan çıkan O<sub>2</sub>'nin artışı gibi olumsuz sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle nihai optimizasyon çalışmalarında EMA'nın alt sınırı 60° ve üst sınırı 80°olarak seçilmiştir. Bununla birlikte bir sonraki optimizasyon parametresi olan püskürtme açısı için aralık belirlenirken, 70°'lik EMA ve 300 mm'lik enjektör uzunluğu kullanılarak analizler yapılmıştır.

### 5.2.3 Püskürtme Açısı

EAO'nda enjektör konumlarının optimizasyonu için ele alınan diğer parametre; enjektörlerin püskürtme doğrultularının yatayla yaptığı açıdır (Şekil 4.10). Bu kısımda; enjektör uzunluğu 300 mm ve yukarıdaki çalışmalar sonucunda EMA 70°'de sabit tutularak farklı enjektör püskürtme açıları için modeller oluşturularak analiz çalışmaları yapılmıştır.

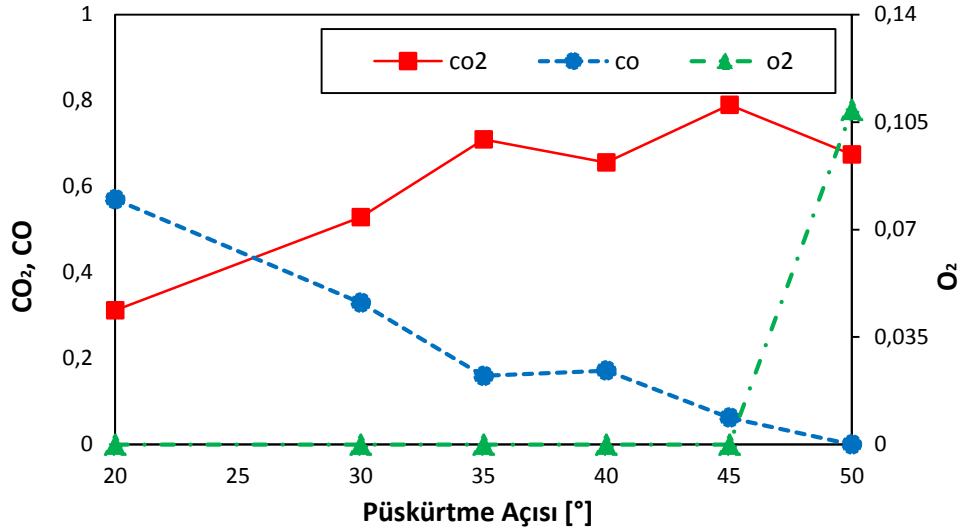
Projemizde modellenen EAO'nun alt kısmında bulunan çıkıntı, enjektörden çıkan jetin akışını bozacağı ve eriyik yüzeyine ulaşmasını engelleyeceğinden, enjektör püskürtme açısı için üst sınır 50° olarak seçilmiştir. Yüksek hızlarla püskürtülen O<sub>2</sub>'nin elektrotlara teması istenmeyen bir durum olduğundan, enjektör püskürtme açısının alt sınırı da 20° olarak seçilmiştir. 20°-50° aralığında 6 farklı püskürtme açısı kullanılarak oluşturulan EAO modelleri ile yapılan simülasyonlardan elde edilen ortalama eriyik yüzey sıcaklıkları ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızlar Şekil 9 'daki grafikte gösterilmektedir.

Projemizde modellenen EAO'nun alt kısmında bulunan çıkıntı, enjektörden çıkan jetin akışını bozacağı ve eriyik yüzeyine ulaşmasını engelleyeceğinden, enjektör püskürtme açısı için üst sınır 50° olarak seçilmiştir. Yüksek hızlarla püskürtülen O<sub>2</sub>'nin elektrotlara teması istenmeyen bir durum olduğundan, enjektör püskürtme açısının alt sınırı da 20° olarak seçilmiştir. 20°-50° aralığında 6 farklı püskürtme açısı kullanılarak oluşturulan EAO modelleri ile yapılan simülasyonlardan elde edilen ortalama eriyik yüzey sıcaklıkları ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızlar Şekil 5.14 'deki grafikte gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Eriyik yüzeydeki ortalama sıcaklık ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızın püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)

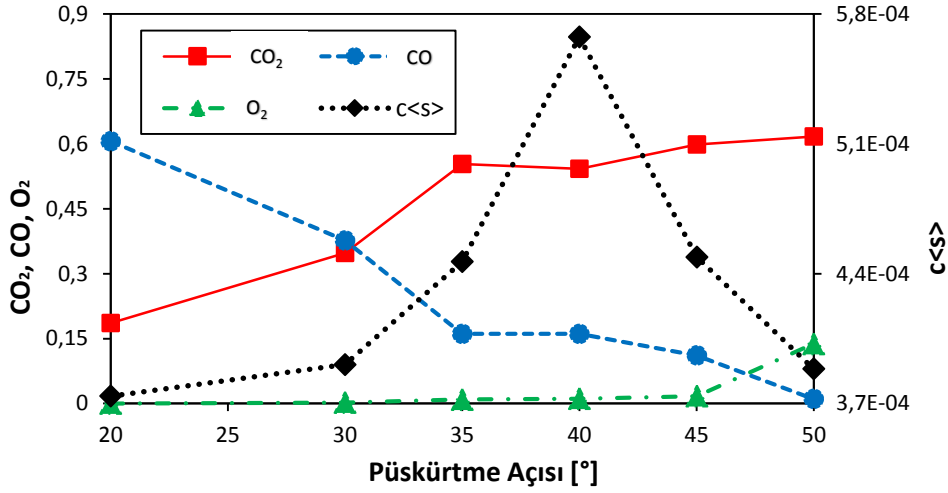
Şekil 5.15’de, üç enjektörlü EAO bacasından çıkan gazların kütleli oranlarının, püskürtme açısı ile değişimi 6 farklı model için incelenmiştir. Yanma ürünü olan CO<sub>2</sub>, 45° püskürtme açılı modelde en yüksek değerine ulaşmıştır. Yine eriyik yüzeyindeki cüruf oluşumu için gerekli olan CO’nin baca gazları içerisindeki miktarı da göz önünde bulundurulduğunda da 45° püskürtme açılı modelin en uygun model olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 50°’lik püskürtme açılı modelde, fırın hacmindeki CO tamamen tükendiği için önemli miktarda O<sub>2</sub>’nin de kimyasal reaksiyona girmeden bacadan çıktığı görülmektedir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. Bacadan çıkan gazların kütleli oranlarının püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)

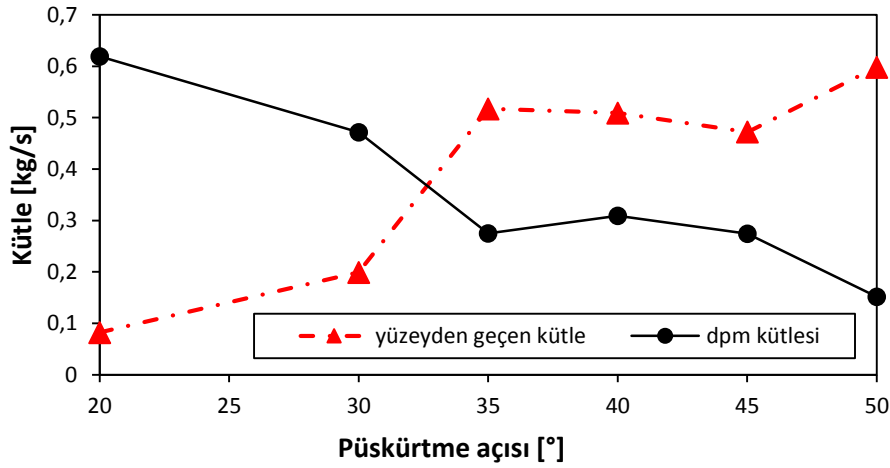
Buharlaştımayan katı karbonun, eriyik yüzeyi üzerindeki kütleli oranı, çeliği beslemek için enjektörlerden gönderilen karbonun eriyiğe ulaşan miktarı hakkında bilgi vermektedir. Şekil 5.16’da eriyik yüzeyi üzerindeki gazlar ile katı karbonun kütleli oranları, 6 farklı püskürtme açısı ile hazırlanan modeller için gösterilmektedir. 40°’lik püskürtme açısına sahip modelde, eriyik yüzey üzerinde en yüksek katı karbon kütleli oranına ulaşılmıştır.

Eriyiğe giren O<sub>2</sub> ve eriyik içerisindeki reaksiyonların ürünü olan ve yüzeyden ocak atmosferine geçen CO miktarı göz önüne alındığında; bacadan çıkan CO<sub>2</sub>’nin kütleli oranı eriyik yüzeyi üzerindeki CO<sub>2</sub>’nin kütleli oranından fazladır. Ayrıca, 6 model için de baca gazlarının ve eriyik yüzeyi üzerindeki gazların kütleli oranlarındaki değişim miktarlarının uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.15-5.16).



Şekil 5.16. Eriyik yüzeyi üzerindeki gazların kütle oranlarının püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)

Şekil 5.17’de püskürtme açısı değiştirilerek hazırlanan 6 farklı model için ocak hacmindeki dpm ve yüzeyden eriyiğe geçen karbon miktarları görülmektedir. Püskürtme açısı arttıkça, enjektörlerden çıkan jetler, direk eriyik yüzeyine yönlendirileceği için eriyiğe geçen karbon miktarının da artacağı öngörülebilir ve çıkan sonuçlar bu öngörüü doğrulamaktadır.



Şekil 5.17. EAO içerisindeki dpm ve eriyik yüzeyinden geçen kütle miktarının püskürtme açısı ile değişimi (EMA=70°, enjektör uzunluğu=300 mm)

Püskürtme açısı değiştirilerek yapılan çalışmalara göre; 35°, 40° ve 45° püskürme açılı modellerin hem eriyik yüzeyi ortalama sıcaklıkları hem de eriyik yüzey üzerindeki ortalama sıcaklıkları yüksek çıkmıştır. Püskürtme açısı 50° olan modelin de yüzey üzerindeki gaz hızı yüksek olmasına rağmen, eriyik yüzey ortalama sıcaklığı bu 3 modele göre yaklaşık %2,5 daha düşüktür. Bununla birlikte 50°'lik püskürtme açısına sahip modelde O<sub>2</sub>'nin reaksiyona

girmeden bacadan çıktığı da görülmüştür. Sonuç olarak; enjektör uzunluğu değiştirilerek yapılacak optimizasyon aralığı daraltma çalışmasında, püskürtme açısının 40° olmasına karar verildi. Püskürtme açısı için ilk aşamada 20°-50° olan aralık; ön simülasyon çalışmaları ile nihai optimizasyon çalışması için 35°-45° olarak daraltılmıştır.

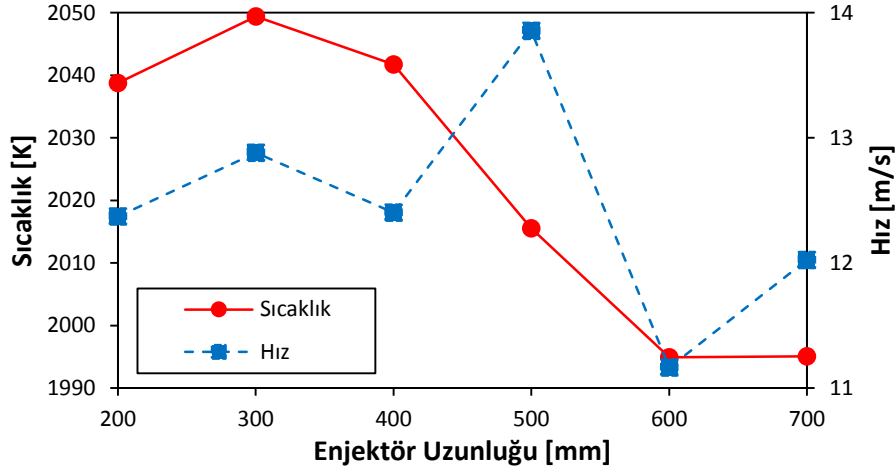
#### 5.2.4 Enjektör Uzunluğu

EAO'nun enjektör optimizasyonu için değiştirilen son parametre, enjektörlerin ocak duvarının iç yüzeyinden başlayarak ocak içerisine kadar uzanan, enjektör uzunluğudur (Şekil 4.10). Diğer parametreler; yukarıdaki sonuçlara göre EMA=70° ve enjektörlerin püskürtme açısı 40°'de sabit tutulup, farklı uzunlukta enjektörler kullanılarak 6 adet model oluşturuldu.

Enjektör uzunluğunun azaltılması, enjektörlerden çıkan O<sub>2</sub> jeti ve taşıdığı karbonunun EAO atmosferinde kat ettiği mesafeyi arttıracaktır. Dolayısıyla eriyiğe giren kütleyi azaltacaktır aşağıdaki sonuçlar da bu öngörüü doğrulamaktadır (Şekil 5.21). Uygulamada enjektörlerin eriyiğin içerisine daldırılmasının sakıncası olmamasına rağmen, yüzey üzerinde karbon yanmasının gerçekleşmesi (kimyasal reaksiyonlar) için yeterli mesafenin olması gerekmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, orijinal modelde enjektör uzunluğunun 300 mm olduğu dikkate alınarak, ön optimizasyon aşamasında; 200-700 mm arasında enjektör uzunluklarına sahip 6 farklı modelin analizleri yapılmıştır. Şekil 5.18'de, 6 farklı model ile yapılan simülasyonlara göre; eriyik yüzeyindeki ortalama sıcaklık ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hızın, enjektör uzunluğuna bağlı değişimleri gösterilmektedir.

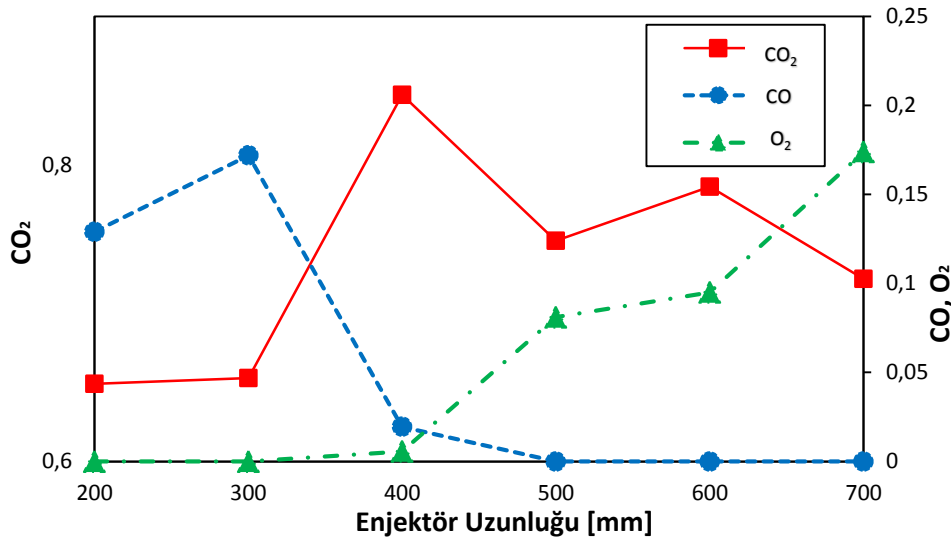
Simülasyon sonuçlarına göre eriyik yüzeydeki maksimum ortalama sıcaklık olan 2049 K'e, 300 mm'lik enjektör uzunluğuna sahip modelde ulaşıldı (Şekil 13). Enjektör uzunluğu 300 mm'nin üzerinde artırıldığında, ortalama yüzey sıcaklığı da azalmaktadır. Bu sonuç; eriyik yüzeyi ile enjektör çıkış kesiti arasındaki mesafesinin kısılması nedeniyle, jetin eriyik yüzeyine daha kısa sürede ulaşması, bağlı olarak yanma reaksiyonlarına girebilen reaktant miktarının azalması ve dolayısıyla açığa çıkan enerjinin de azalmasından kaynaklanmaktadır. Eriyik yüzeyi üzerindeki en yüksek ortalama hız olan 13,85 m/s'ye 500 mm enjektör uzunluğuna sahip modelde elde edilmiştir. 500 mm'den kısa enjektör uzunluklarında, gaz jeti EAO hacminde uzun bir yol kat ettiğinden, EAO atmosferindeki gazların difüzyonu ile jet momentum kaybetmekte ve eriyik yüzeyi üzerindeki ortalama hız düşmektedir. Tam tersine, enjektör uzunluğu 500 mm'nin üzerine çıktığında ise; jet, EAO hacminde daha kısa yol kat etmekle birlikte, EAO hacmindeki gazlara momentumunu aktarmadan, başka bir ifade ile jetteki yüksek hızlı gazların etki alanı henüz yeterince genişlemeden eriyik yüzeyine ulaşmaktadır. Böylece

eriyik yüzeyinde çok yüksek hızlı dar bölgeler oluşmakla birlikte birlikte ortalama gaz hızları düşük kalmaktadır.



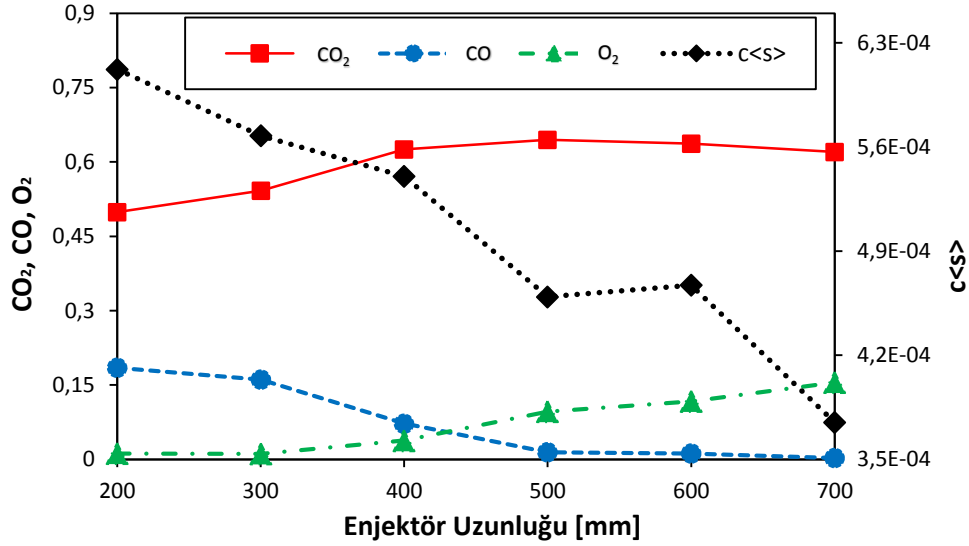
Şekil 5.18. Eriyik yüzeydeki ortalama sıcaklık ve eriyik yüzey üzerindeki ortalama hızın enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)

Şekil 5.19'da, EAO'nun bacasından çıkan gazların kütle oranlarının enjektör uzunluğu ile değişimi 6 farklı model için görülmektedir. Yanma ürünü CO<sub>2</sub>, 400 mm'lik enjektör uzunluğunda en yüksek kütle oranına ulaşmıştır. Ayrıca enjektör uzunluğu 400 mm'nin üzerine çıktığında yanma ürünü CO<sub>2</sub> azalmaktadır. Bu durum yukarıda belirtildiği gibi yanma reaksiyonlarının azalmasından kaynaklanmaktadır ve dolayısıyla O<sub>2</sub>'nin bir miktarı yanma reaksiyonlarına girmeden bacadan direkt çıktığı görülmektedir.



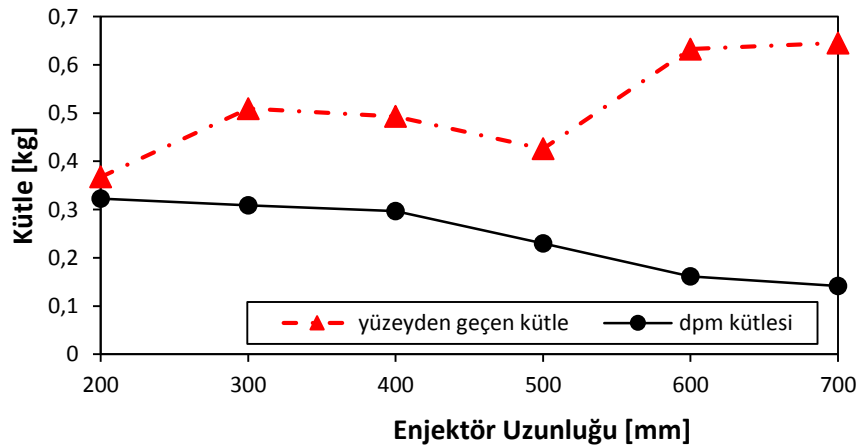
Şekil 5.19. Bacadan çıkan gazların kütle oranlarının enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)

Şekil 5.20’de altı farklı enjektör uzunluğuna sahip modelin eriyik yüzeyi üzerindeki gazlar ile katı karbonun kütle oranına etkisi görülmektedir. Enjektör uzunluğu 300 mm üzerine çıkıldıkça, püskürtülen karbon ve O<sub>2</sub>, yeteri kadar yanma reaksiyonu oluşmadan eriyik yüzeyine ulaştığı ve eriyiğe girdiği için yüzey üzerindeki gazlar ile baca gazlarının kütle oranları arasında uyumsuzluk vardır. Bu nedenle baca gazlarının kütle oranlarına bakılması daha sağlıklı yorum yapmamızı sağlar.



Şekil 5.20. Eriyik yüzeyi üzerindeki gazların kütle oranlarının enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)

Şekil 5.21’de enjektör uzunluğu değiştirilerek hazırlanan 6 farklı model için ocak hacmindeki dpm ve eriyik yüzeyinden geçen karbon miktarları görülmektedir. Enjektör uzunluğu arttıkça, eriyik yüzeyi üzerinde kimyasal reaksiyona girmeden doğrudan eriyik içerisine giren karbon kütlesinin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. EAO içerisindeki dpm ve eriyik yüzeyden geçen kütle miktarının enjektör uzunluğu ile değişimi (EMA=70°, püskürtme açısı=40°)



Enjektör uzunluğu değiştirilerek yapılan çalışmalarımıza göre; en yüksek eriyik yüzey ortalama sıcaklıklarına, 200, 300 ve 400 mm 'lik enjektör uzunluğa sahip modellerinde ulaşıldı. Ancak 400 mm enjektör uzunluğundan sonra sıcaklık değerlerinde ani düşüş gözlenmektedir. Bu durumun yanma reaksiyonlarının azalmasından kaynaklandığı görülmektedir. Çünkü yanma sonucu açığa çıkan CO<sub>2</sub> değerinin düştüğü görülmüştür (Şekil 5.18-5.19). Bununla birlikte özellikle 400 mm'den büyük enjektör uzunluğuna sahip modellerde, O<sub>2</sub> daha yüksek kütleli oranlarda bacadan atılmaktadır. Sonuç olarak, enjektör uzunluğu değiştirilerek elde edilen 6 modelin analiz sonuçları değerlendirildiğinde; başlangıçta 200-700 mm aralığında olan enjektör uzunluk aralığı, nihai optimizasyon çalışması için 200-400 mm aralığına düşürülmüştür.

### 5.2.5 Enjektör Optimizasyonu

Buraya kadar yapılan analizler, enjektör optimizasyonuna başlamadan önce yapılmış ön hazır çalışmalarıdır. Geniş bir aralıkta değiştirilebilen enjektör konum parametreleri (EMA, püskürtme açısı ve enjektör uzunluğu) üzerinde ayrı ayrı yapılan ön simülasyon çalışmaları ile nihai optimizasyon için parametrelerin değişim aralıkları daraltılmıştır. Bu sayede optimizasyona girecek varyasyon sayısı önemli miktarda azaltılabilmiş ve odaklanılması gereken parametre aralıkları içerisinde daha hassas değişimlerinin etkileri ortaya konabilmektedir. Optimizasyon veri aralığı seçimleri, ön optimizasyon çalışmasından elde edilen bilgiler ışığında yapılmıştır. Bu aralıkların seçiminde en önemli parametre olarak görülen eriyik yüzeyinin ortalama sıcaklığı baz alınmıştır. İkinci planda yüzeye gelen jet hızı, tepkimeye girmeden bacadan çıkan O<sub>2</sub> ve CO emisyonları ile eriğin içine yanmadan giren karbon miktarı göz önüne alınmıştır.

#### Optimizasyon parametreleri için seçilen daraltılmış aralıklar şu şekildedir:

- EMA = 60°-80° aralığında
- Enjektör Açısı = 45°-35 ° aralığında
- Enjektör Uzunluğu = 250- 400 mm aralığında

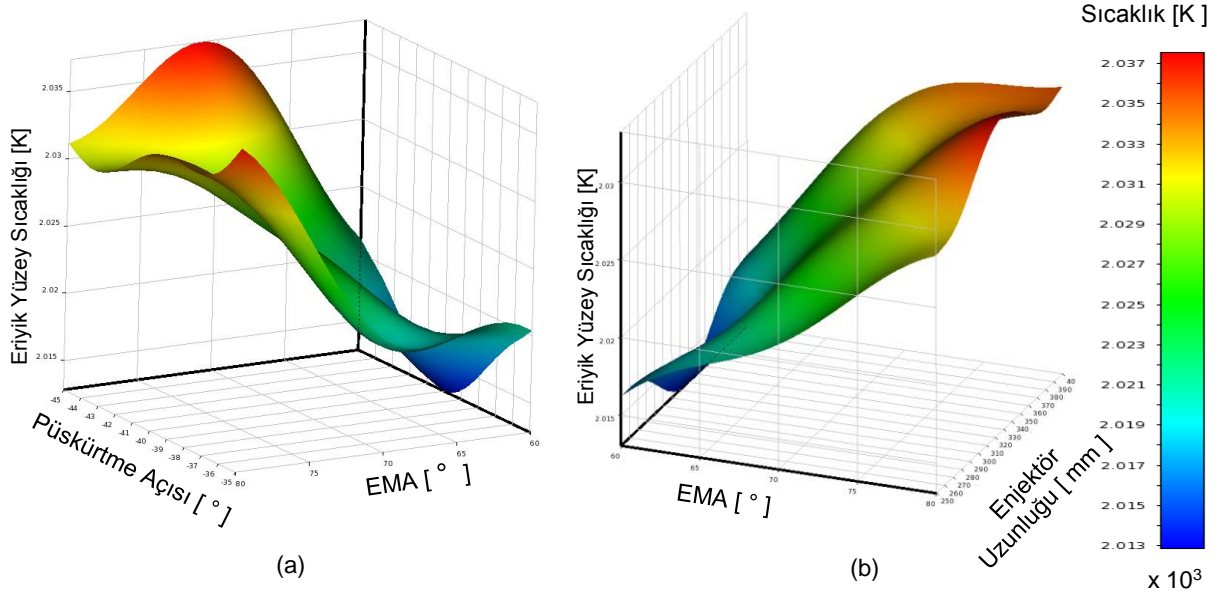
Yukarıda verilen değişkenlerin alt ve üst sınırları programa girilmiştir. Üç değişken için verilen aralıklarda Goal Driven Optimizasyon metotlarından olan Response Surface Optimizasyon (RSO) yöntemi kullanılarak Tablo 5.1' de görüldüğü gibi 14 adet optimizasyon modeli oluşturuldu. 15 adet veri için "central composite design" tipi kullanılmıştır. Bu sayede optimizasyon dataları en uç veri noktaları ile merkezde kesişen veri noktalarının kombinasyonu ile hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan tüm bu veriler için ayrı ayrı simülasyonlar yapılmıştır.

Tablo 5.1. Response Surface Optimizasyon metodu ile oluşturulan 14 adet optimizasyon modeli

Parametre Sayısı	Optimizasyonu Yapılan Parametreler		
	EMA [ ° ]	Püskürtme Açısı [ ° ]	Enjektör Uzunluğu [mm]
1	60	40	325
2	80	40	325
3	70	45	325
4	70	35	325
5	70	40	250
6	70	40	400
7	60	45	250
8	80	45	250
9	60	35	250
10	80	35	250
11	60	45	400
12	80	45	400
13	60	35	400
14	80	35	400

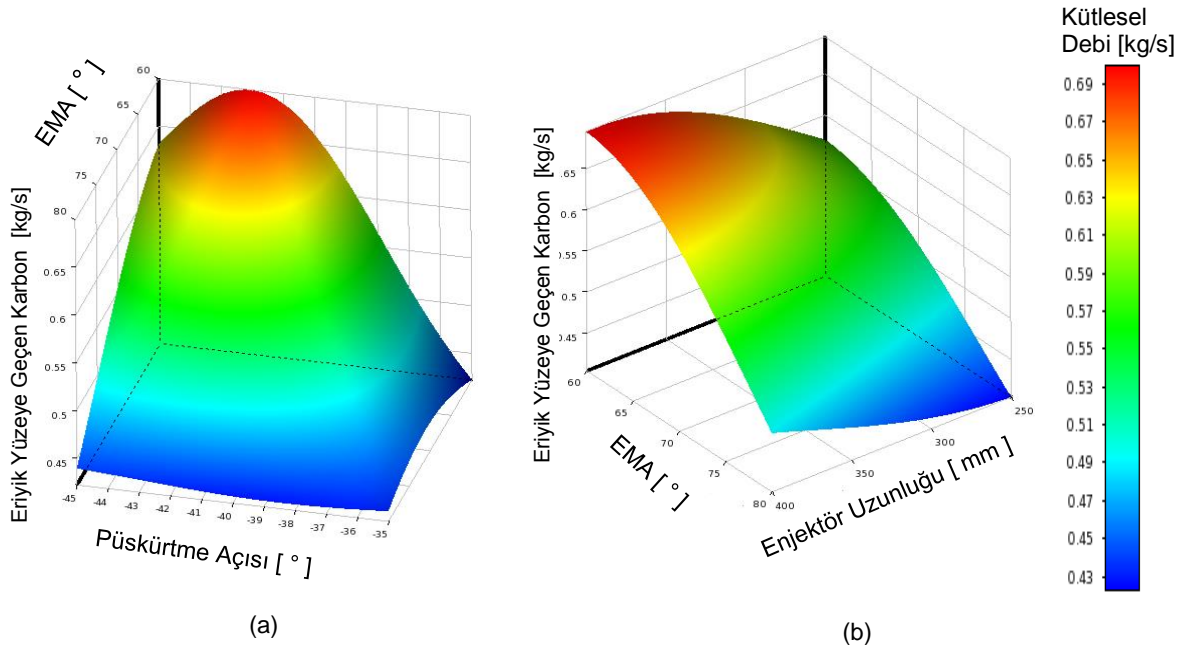
Daha sonra optimizasyon metodu “Screening” kullanılarak, 15 adet modelin analiz sonuçlarına bağımlı olarak eriyik yüzey sıcaklığının ve eriyiğin içerisine giren karbon miktarının maksimum olma durumuna göre genetik algoritma kullanılarak 1000 adet veri noktası ortaya çıkmıştır.

Şekil 5.22 in sol tarafında eriyik yüzey sıcaklığının püskürtme açısı ve EMA ile değişimi, sağ tarafında ise eriyik yüzey sıcaklığının EMA ve enjektör uzunluğu ile değişimi 3B olarak verilmiştir. Şekil 5.22 (a) incelendiğinde EMA değişiminin püskürtme açısında göre eriyik yüzey sıcaklığını çok daha fazla etkilediğini ve EMA değerinin 80° 'ye doğru arttıkça sıcaklıkta genel bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Benzer şekilde yüzey sıcaklığının enjektör uzunluğunun değişiminden çok EMA değerinin 80°'ye doğru değişmesiyle arttığı Şekil 5.22 (b)'den anlaşılmaktadır.



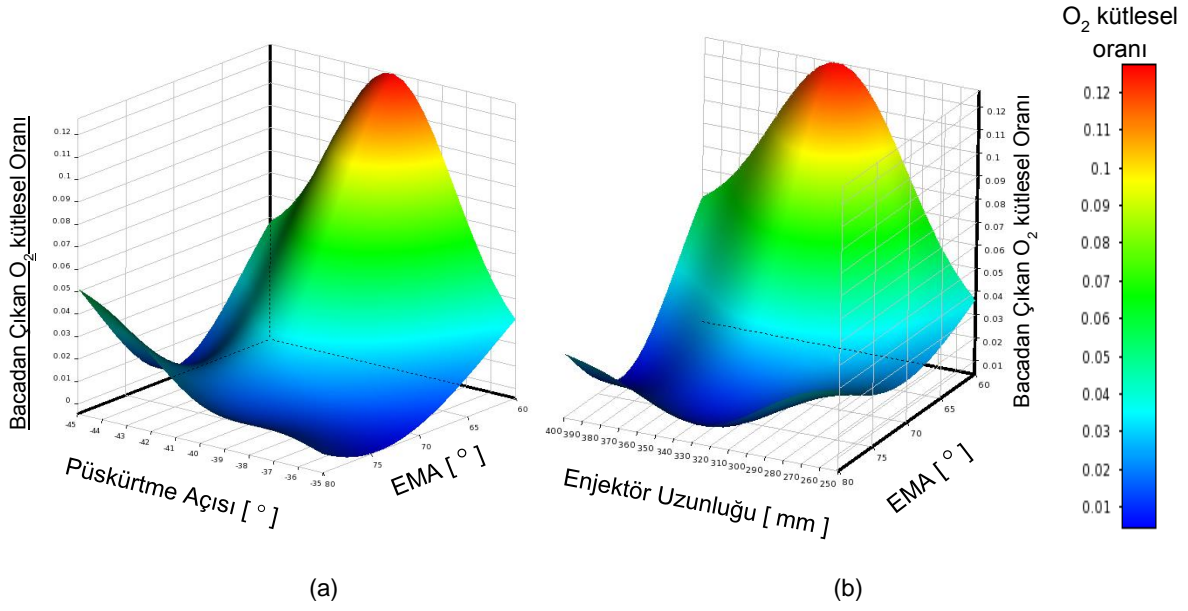
Şekil 5.22. a) Eriyik yüzey sıcaklığının püskürtme açısı ve EMA ile değişimi, b) eriyik yüzey sıcaklığının EMA ve enjektör uzunluğu ile değişimi (sağ ve sol)

Şekil 5.23 (a)'da eriyik yüzeyinden eriğe geçen karbon miktarının EMA ve püskürtme açısı değişimlerinden neredeyse eşit oranda etkilendiği anlaşılmaktadır. EMA değeri 60°'ye doğru geldikçe ve püskürtme açısı da 42°'ye doğru ilerledikçe eriğe geçen karbon miktarının arttığı görülmektedir. Şekil 5.23(b)'de ise EMA azaldıkça ve enjektör uzunluğu arttıkça eriyik yüzeye geçen karbon miktarı artmıştır. Sonuç olarak EMA 80°'ye doğru geldikçe yüzey sıcaklığı artmış fakat eriğe geçen karbon miktarı azalmıştır. Püskürtme açısının yüzey sıcaklığı için belirleyici bir parametre olmazken eriğe geçen karbon miktarı için EMA 60° - 70° aralığında önemli bir etkisinin olduğu anlaşılmıştır.



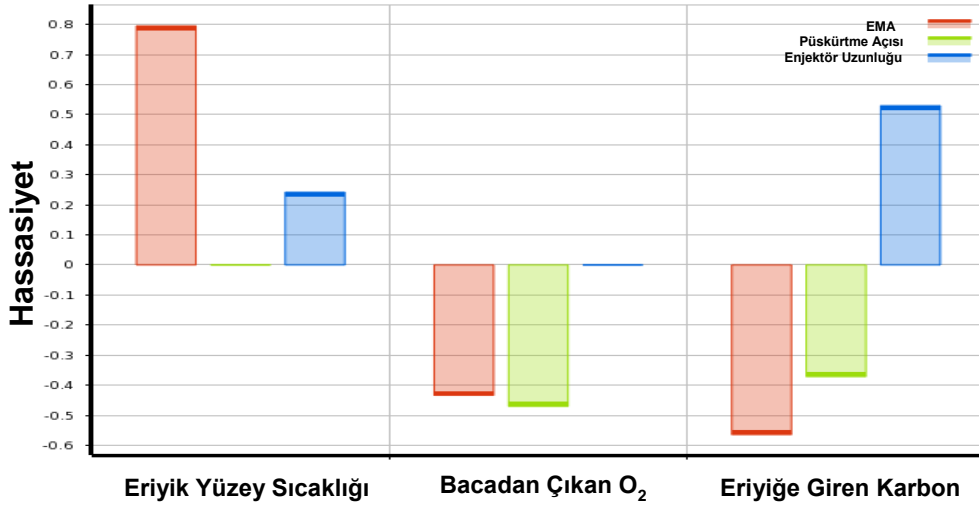
Şekil 5.23. a) Eriyiğe giren karbon kütleli debisinin püskürtme açısı ve EMA ile değişimi, b) eriyiğe giren karbon kütleli debisinin EMA ve enjektör uzunluğu ile değişimi (sağ ve sol)

Şekil 5.24 (a)'da verilen üç boyutlu grafikte EMA 60° 'ye doğru küçüldükçe ve püskürtme açısı 37° - 41° aralığında iken bacadan çıkan O<sub>2</sub> kütleli oranı en yüksek değerine ulaşmaktadır. Şekil 5.24 (b)'de benzer şekilde yine EMA 60° 'ye doğru küçüldükçe ve enjektör uzunluğu 300-350 mm aralığında bacadan çıkan O<sub>2</sub> kütleli oranı en yüksek değerine ulaşmaktadır. Sonuç olarak EMA'nın bacadan çıkan O<sub>2</sub> kütleli oranı üzerindeki etkisi püskürtme açısı ve enjektör uzunluğuna göre daha fazladır.



Şekil 5.24. a) Bacadan çıkan O<sub>2</sub> kütle oranının püskürtme açısı ve EMA ile değişimi, b)eriğe giren karbon kütle oranının EMA ve enjektör uzunluğu ile değişimi (sağ ve sol)

Şekil 5.25’de ele alınan performans parametrelerinin optimizasyon parametrelerine hassasiyetleri verilmiştir. Buna göre eriyik yüzey sıcaklığı üzerinde en etkili parametre EMA ikinci derecede ise enjektör uzunluğu iken püskürtme açısının etkisi yok denecek kadar azdır. Bacadan çıkan O<sub>2</sub> miktarında EMA ve püskürtme açısının etkileri yaklaşık aynıdır, enjektör uzunluğunun etkisi yok denecek kadar azdır. Eriğe giren karbon için ise enjektör uzunluğu ve EMA’nın etkileri yaklaşık aynıdır ayrıca püskürtme açısı da ihmal edilemeyecek bir etkiye sahiptir.



Şekil 5.25. Ele alınan performans parametrelerinin optimizasyon parametrelerine hassasiyetleri

Son olarak 1000 adet veri noktası arasından hedeflenen kriterlere göre en iyi 5 durum için optimum noktalara yönelik sonuç alınmıştır. Eriyik yüzey sıcaklığının ve eriyiğin içerisine giren karbon miktarının maksimum olma durumuna göre elde edilen optimum veri noktaları Tablo 5.2’de görülmektedir. Buna göre girilen optimizasyon kriterleri olan eriyik yüzey sıcaklığı ve eriyiğe giren karbon miktarının en yüksek olduğu değerler; EMA 80°, enjektör açısı 35° ve enjektör uzunluğu 400 mm için elde edilmiştir.

Tablo 5.2 Eriyik yüzey sıcaklığının ve eriyiğin içerisine giren karbon miktarının maksimum olma durumuna göre elde edilen optimum veri noktaları

	Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified)	Candidate Point 2	Candidate Point 3	Candidate Point 4	Candidate Point 5
P59 - enjektör_eksenel aci (degree)	80	80	79.19	69.836	70.346	70.082
P67 - Enjektör_acisi (degree)	-35	-35	-35.083	-45	-45	-44.938
P68 - Enjektör_uzunlugu (mm)	400	400	377.3	327.07	327.95	324.72
P70 - eriyik_yuzey_sicakligi-op (K)	★ ★ 2044.3	★ ★ 2044.3	★ ★ 2041.5	★ ★ 2036.9	★ ★ 2037.1	★ ★ 2037.1
P83 - escaped_mass_surface-op (kg s <sup>-1</sup> )	★ 0.5773	★ 0.5773	— 0.54615	— 0.56038	— 0.55593	— 0.55557

## 5.2.6 Optimum enjektör konum değerlerin EAO içerisinde enerji dağılımına etkilerinin incelenmesi

Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen optimum enjektör konum değerlerinde ve standart durumda; EAO içerisinde gerçekleşen ekzotermik reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan toplam yanma enerjisi, eriyik yüzeyine ve diğer çevre yüzeylere geçen enerjiler karşılaştırılarak, sonuçlar değerlendirilmiştir.

Standart enjektör konumlandırılması için simülasyonda kullanılan ısı geçişi modelleri ve sabitlerinin doğruluğunu tespit açısından, elde edilen veriler literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Literatürde yaklaşık 100 MW elektrik enerjisi tüketen bir EAO’nda eriğe geçen enerji, tüketilen toplam enerjinin %18’i iken, %80’lik kısım EAO’nın yan ve çatı duvarlarından soğutucu akışkana aktarılmaktadır.

Tablo 5.3’de verilen enjektör konumlandırılmasına göre yapılan model çözümüne göre klasik EAO’nda yanma ile ortaya çıkan toplam ısı güç yaklaşık 10,512 MW’tır. Bunun yanında eriyik yüzeyinden ışınlım ve taşınım ile eriğe geçen ısı güç ise 19,783 MW olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.3 EAO simülasyonlarındaki ısı denge ve optimizasyon ile enerji kazanımı

Isının geldiği / transfer olduğu kaynak	EMA= 70° Enjektör Açısı=45° Enjektör Uzunluğu = 300 mm	EMA= 80° Enjektör Açısı = 35° Enjektör Uzunluğu = 400 mm	
	Klasik EAO için Isı Akıları [MW]	Standart Enjektör Konumu için Isı Akıları [MW]	Optimum Enjektör Konumu için Isı Akıları [MW]
<b>Elektrotlardan gelen enerji</b>	100	100	100
<b>Enjektör duvarı</b>	-1,082078	-1,02082557	-1,2431481
<b>Fırın alt yan duvarı</b>	-5.762455	-4,572269	-4,572268
<b>Fırın üst yan ve çatı duvarları</b>	-74,190538	-72,942079	-72,945616
<b>Eriyik üst yüzeyi</b>	-19,783413	-19,977596	-22,071737
<b>Baca Duvarı</b>	-1,914907	-2,4862422	-2,4862855
<b>Bacadan Çıkan</b>	-7,779130	-7,8033684	-9,2014988
<b>Yanma reaksiyonu</b>	10,512482	8,8023881	12,520554

Standart enjektör konumlandırılması kullanılarak yapılan model çözümüne göre yeni tasarım EAO’nda yanma ile ortaya çıkan toplam ısı güç yaklaşık 8,803 MW’tır. Bunun yanında eriyik yüzeyinden ışınlım ve taşınım ile eriğe geçen ısı güç ise 19,978 MW olarak hesaplanmıştır. Yapılan optimizasyon çalışması neticesinde yeni tasarım EAO’nda yanma ile ortaya çıkan toplam ısı güç 12,52 MW’tır. Bunun yanında eriyik yüzeyinden ışınlım ve taşınım ile eriğe

geçen ısı güç ise 22,072 olarak hesaplanmıştır. Buna göre enjektör konumlandırılması optimizasyon çalışması ile yanma ile ortaya çıkan enerjide yaklaşık %30'luk bir artış sağlanmıştır ve bu enerjinin bir kısmı bacadan atılırken bir kısmı da eriğe geçerek sistemin daha verimli çalışmasını sağlamıştır. Bu durumda eriğe geçen ısı miktarında 2,094 MW'lık yani % 10'luk bir artış meydana gelmiştir.

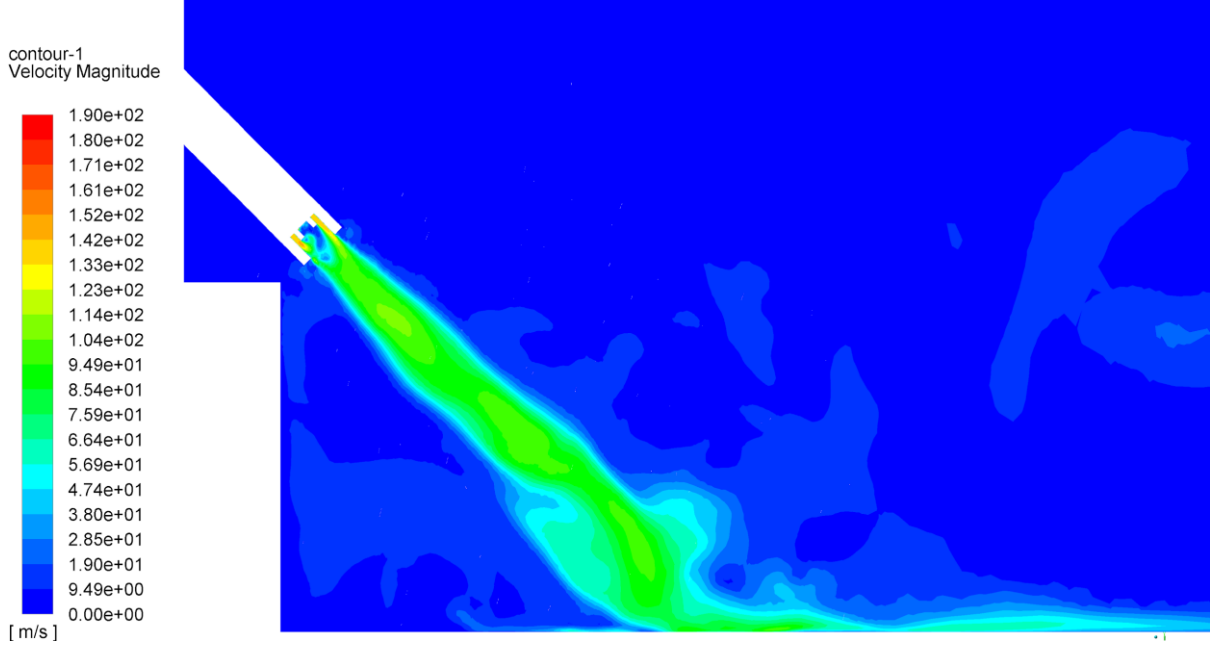
### 5.3 Yeni Tasarım EAO'nun LES Türbülans Modeline Ait Simülasyon Sonuçları

Yeni tasarım EAO'nun enjektör optimizasyonu için yapılan simülasyon çalışmaları zamandan bağımsız olarak öncelikle RANS türbülans modeli ile yapıldı. Bu aşamada yapılan optimizasyon çalışmaları ile enjektör konum parametrelerinin optimum değerleri belirlendikten sonra, enjektörlerden gönderilen gaz fazındaki  $O_2$ 'nin ve karbon yanması sonucu ortaya çıkan ısının yeni geometriye sahip EAO'nun standart enjektör konumlandırılması kullanılarak ocak içerisinde oluşan türbülans hareketi için LES türbülans modeli ile çözümler tekrarlanmıştır. LES modeli ile zamana bağlı olarak çözümlenme yapılmıştır.

Zamana bağlı çözümlerde simülasyonun hatasız ilerlemesi için her bir zaman adımı 0,0001 s olarak çözülmüş ve her bir zaman adımında da maksimum 20 iterasyon yapılmıştır. Bununla birlikte her bir zaman adımı için yaklaşık 12 iterasyon sonunda, çözümlenilen her büyüklüğün istenen bağıl hata oranına ulaştığı görülmüştür. Zamana bağlı LES çözümlerinden önce model, zamandan bağımsız olarak RANS türbülans denklemleri ile 1620 iterasyon çözdürülmüş ve tüm koşullar dengeye getirilmiştir. Daha sonra çözüm zamana bağlı hale getirilmiş ve LES türbülans modeli aktif hale getirilmiştir. LES çözüm süresi çok uzun olduğundan, simülasyon 1,375 saniyeye ulaşıncaya kadar yaklaşık 1 ay boyunca çalıştırılmıştır. Bu zamana ulaştığında zaman durdurularak görsel sonuçlar alınmıştır.

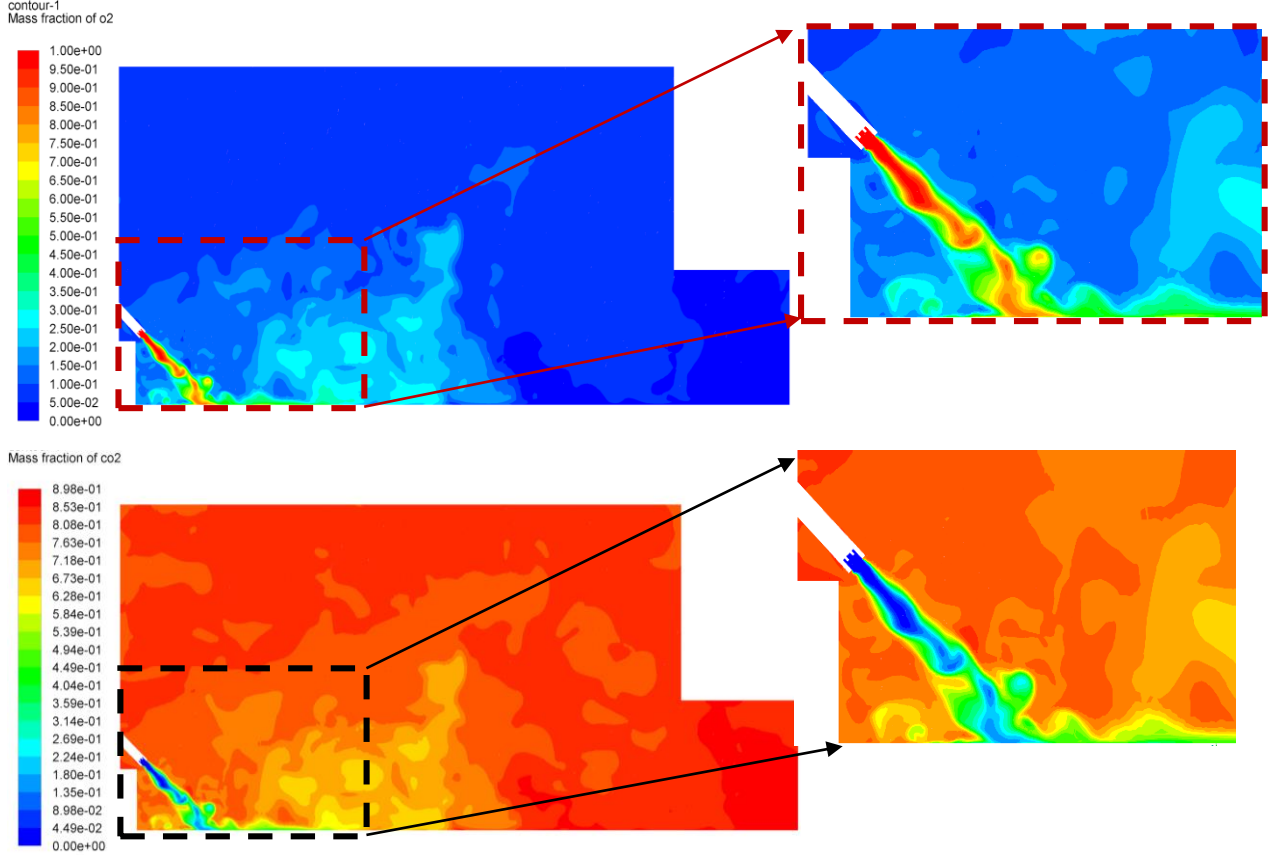
Şekil 5.26'da enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu yüzeyde enjektör 1'de hız dağılımı verilmiştir. LES türbülans modelinin etkisi ile enjektör çıkışından uzaklaştıkça vortekslerin ortaya çıkışı daha gerçekçi bir şekilde hesaplanabilmiştir. Eriyik yüzeyine yaklaşıldıkça  $O_2$  enjeksiyon hızının azaldığı görülmüştür. Bunun durumun, buhar fazına geçen karbon ve eriyik yüzeyinden çıkan CO ile oksijenin yanma reaksiyonlarına girmesinden ve oluşan vortekslerden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.





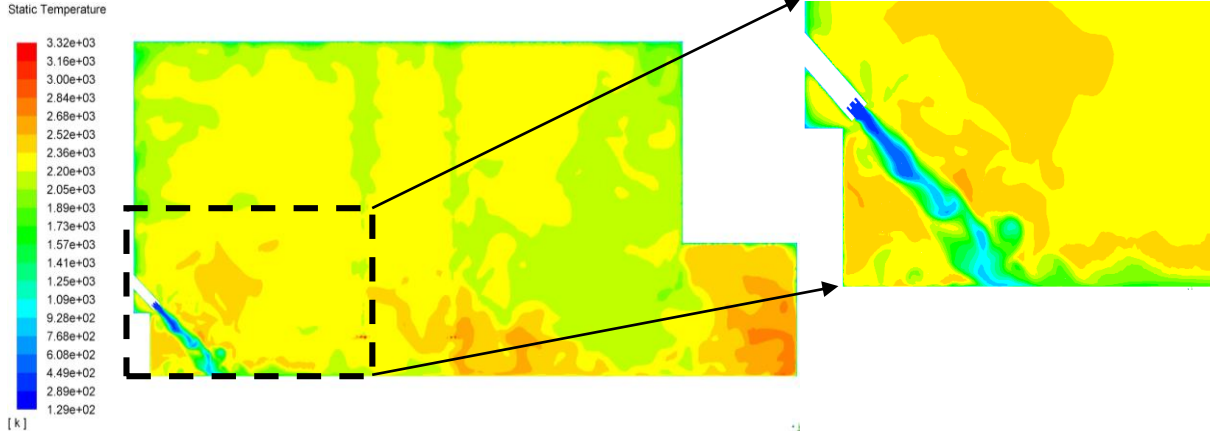
Şekil 5.26. Enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu düzlemde hız dağılımı

Şekil 5.27' de enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu yüzeyde tüm EAO'nun ve enjektör 1'e doğru yaklaşmış bölgede O<sub>2</sub> (üstte) ve CO<sub>2</sub> (altta) kütle oranlarının dağılımı verilmiştir. Zamana bağlı LES türbülans modeli simülasyon çözümlerinden, beklendiği gibi yanma reaksiyonlarının anlık olarak daha türbülanslı gerçekleştiği görülmüştür. Fakat RANS türbülans modelindeki gibi sürekli hal çözümlerinde, ortalama bir veri olarak yanmanın ele alınması durumunda, üniform alanların daha geniş olduğu değerlerin elde edilmesi beklenen bir durumdur. EAO süreci belli bölgeler dışında büyük bir yaklaşıklıkla sürekli bir süreç olarak ele alınabilir. Sürekli koşullarda, EAO hacminde belirli bir kısmın çözümü istendiğinde, bu çalışmada yapıldığı gibi, zamandan bağımsız RANS türbülans modeli çözümlerinin kullanılması, daha hızlı ve genel sonuçlar almak için kullanışlıdır. Eğer süreç daha ayrıntılı, yerel ölçekte ve gerçek zamanlı olarak modellenecekse, ki burada mevcut yazılım ve bilgisayar teknolojisinin sınırlamaları göz önüne alınmalıdır, modellemede LES türbülans modeli de kullanılabilir.



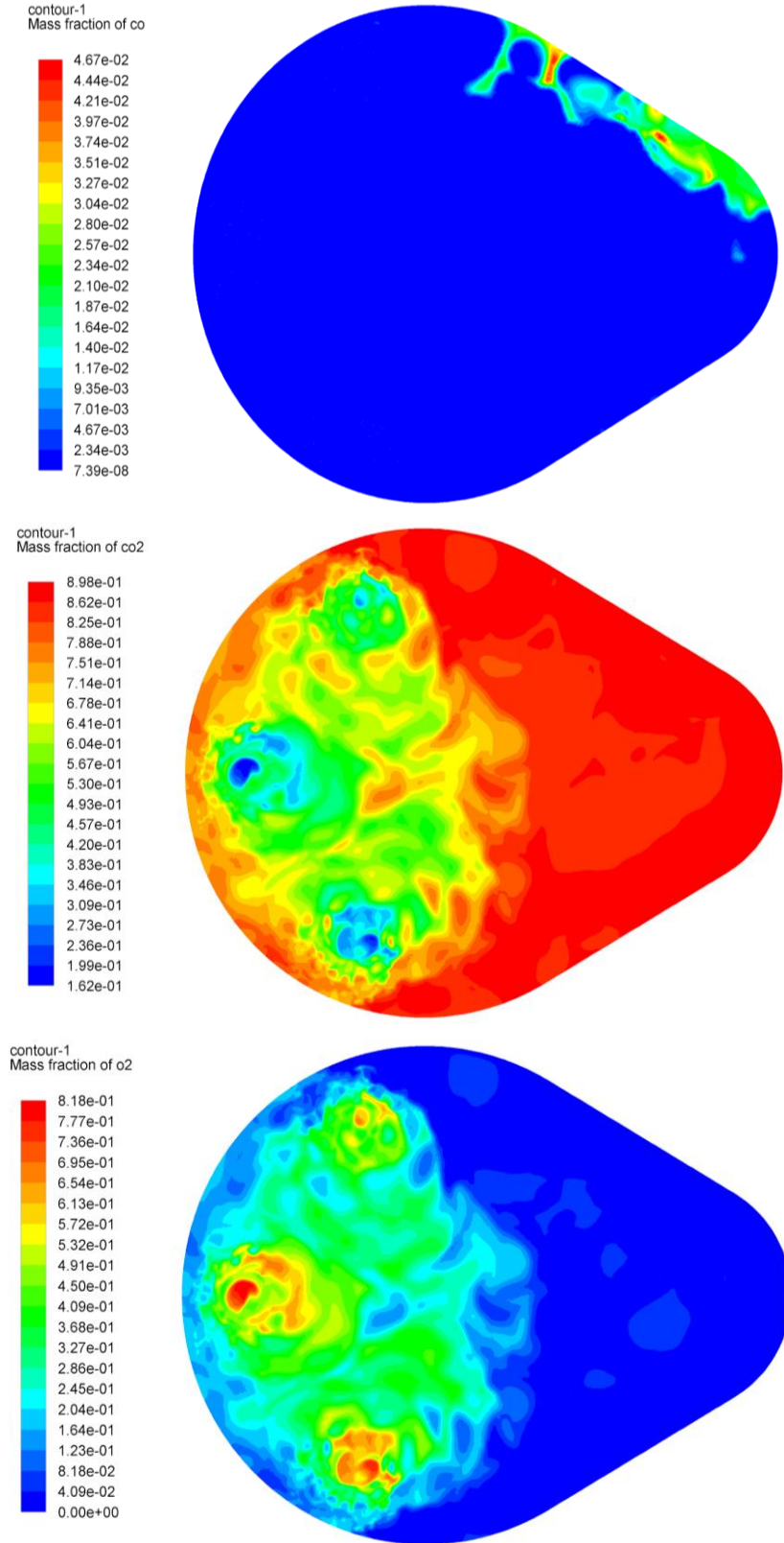
Şekil 5.27. Enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu düzlemdeki tüm EAO'nun ve enjektör 1'e doğru yaklaşılmış bölgede O<sub>2</sub> (üstte) ve CO<sub>2</sub>'nin (altta) kütle oranlarının dağılımı

Şekil 5.28'de enjektör 1'den gelen O<sub>2</sub> ve kömür tozunun sisteme girdikten sonra oluşan yanma reaksiyonu ve ayrıca O<sub>2</sub>'nin EAO içerisindeki CO ile girdiği reaksiyonlarla yanma sürecinin tamamlanmasıyla (post combustion) ortaya çıkan sıcaklık verileri gösterilmiştir. LES türbülans modeli ile yapılan çözümden 1,375 saniyenin sonunda EAO içerisinde oldukça kaotik bir sıcaklık dağılımının olduğu anlaşılmaktadır. Zaman ortalamalı RANS çözümlerinden en yüksek sıcaklığın 3100 K - 1280 K aralığında olduğu, zamana bağlı LES çözümünde ise iki boyutlu yüzeyde sıcaklığının 3320 K - 1290 K aralığında olduğu hesaplanmıştır. Çözüm zamanı uzadıkça bacadan atılan ısı gücünün, sistem içerisindeki reaksiyonların ve yüzeylerden olan ısı geçişlerinin daha da dengeye gelmesi ile LES çözümündeki ortalama sonuçlarının, RANS çözümü değerlerine yaklaşacağı düşünülmektedir.



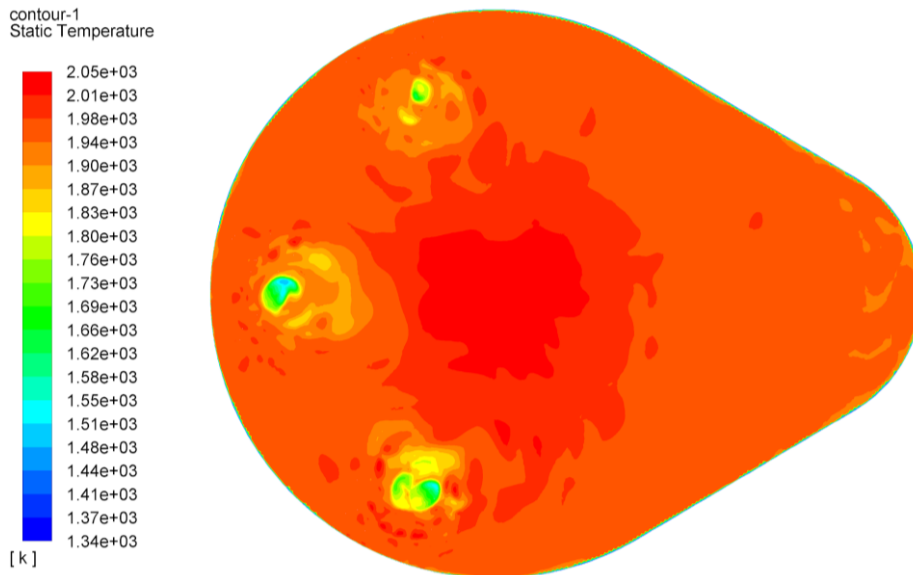
Şekil 5.28. Enjektör 1'i dik kesen iki boyutlu düzlemde tüm EAO'nun (üst) ve enjektör 1'e doğru yaklaşmış (alt) sıcaklık dağılımı

Şekil 5.29'da eriyik yüzeyindeki yanma reaksiyonları sonucunda tükenen veya biriken kimyasal bileşenlerin kütle oranları yukarıdan aşağı sırasıyla CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> için verilmiştir. Modelde eriyik yüzeyinden EAO atmosferine giren CO'nun büyük oranda tükendiği, sadece enjektörlere uzak bir bölgede oldukça az bir miktarda CO'nun kaldığı görülmektedir. Zamandan bağımsız RANS modeli ile karşılaştırıldığında eriyik yüzeyinde çok daha az CO'nun bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu durum tersi olarak CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>'nin RANS çözümüne göre zamana bağlı LES çözümlerinde daha yoğun bir şekilde yüzeyde biriktiği gözlemlenmiştir. Çözüm süresinin daha uzun tutulmasıyla kimyasal bileşenlerin yüzeydeki kütle birikimlerinin RANS çözümlerine yaklaşacağı düşünülmektedir.



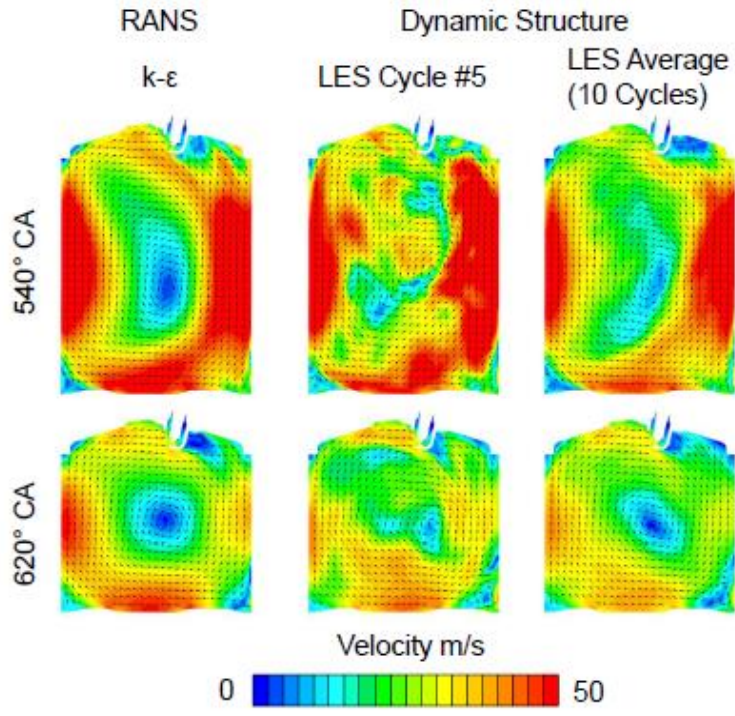
Şekil 5.29. Eriyik yüzeyindeki CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>'nin kütle oranları

Şekil 5.30'da eriyik yüzeyindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. 2050 K - 1340 K aralığındaki sıcaklıklar, elektrik arkının hemen altındaki merkeze doğru maksimum değerlerine ulaştığı ve O<sub>2</sub> enjeksiyonun yüzeye ulaştığı bölgelerin merkezlerinde daha düşük sıcaklıklar görülmektedir. Bu sonuçların ile görsel RANS çözümleri arasındaki benzerliğin fazla olduğu anlaşılmaktadır. RANS çözümlerinde yüzey sıcaklıkları 2340 K - 1320 K aralığında elde edilmiştir. LES çözümlerinde yüzeyde biriken O<sub>2</sub> fazlalığı nedeniyle ortalama yüzey sıcaklığının da düştüğü düşünülmektedir. Yine çözüm süresi uzadıkça sistemin biraz daha dengeye ulaşır, ortalama sonuçların RANS çözümlerinden elde edilen değerlere ulaşacağı düşünülmektedir.



Şekil 5.30. Eriyik yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Yapılan modelleme çalışmaları sonrasında LES çözümlerinin zamanla RANS sonuçlarına yakınsayacağı görülmüştür. Bu çıkarımımızı destekleyecek bir adet literatür çalışması da bulunmaktadır. Mally vd. (2018)'nin yaptığı çalışmada şekil 5.31'de görüldüğü üzere bir motorun CFD simülasyonunun RANS ile çözümünü yapıldıktan sonra sırasıyla 5 çevrim ve 10 çevrim LES ile yapılan çözümleri karşılaştırılmışlardır. Buldukları sonuçlara göre 10 çevrim sonunda LES çözümü ile iki farklı krank mili açısı için elde edilen silindir için hız değerleri RANS sonuçlarına oldukça yakın hale gelmiştir. Aslında RANS sürekli akış sistemleri için oldukça doğru türbülans çözümü yapabilmektedir. Eğer akış dinamikse ve zamana bağlı değişiklik gösteriyorsa bu durumda LES türbülans modelini kullanmak daha mantıklı olacaktır. EAO simülasyonunda sürekli bir rejim göz önüne alındığından dolayı RANS türbülans modeli ile elde edilen sonuçların yeterli doğrulukta olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.31. RANS ve LES türbülans modelleri ile elde edilen silindir için hız dağılımları (Mally vd. 2018)

## 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tamamlanan projede, ısı ve enerji kaybını azaltarak verimi artırmak amacıyla ergitmeyi durdurmadan sürekli hurda şarjı yapılabilen 70 ton kapasiteli yeni tasarım EAO'da, enjektör konum parametreleri optimize edilmeye ve EAO'nun enerji verimi geliştirilmeye çalışılmıştır. EAO'nun simülasyon çalışmaları için tanımlanan sınır şartları sonrasında elde edilen ısı gücü değerlerinin literatür çalışmaları ile benzer sonuçların elde edilmiş olması projenin önemli çıktılarından biridir. Yapılan simülasyon çalışmalarından elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

### Klasik EAO'nun doğrulama çalışmaları

Literatür çalışmalarının daha ileri seviyeye taşınmasını sağlamak için simülasyonlarda kullanılan ağ yapısının, çözüm zamanının ciddi oranda azaltılmasına olanak veren polihedral ağ yapısına dönüştürülmesi ile alınan sonuçlar üçgensel ağ yapısı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3'de verilen, bacadan çıkan CO<sub>2</sub>'in eleman sayısı ve ağ yapısı ile değişimi incelendiğinde, 4 milyon ve üzeri eleman sayısına sahip modelin üçgensel ağ yapısı polihedral ağ yapısına dönüştürüldüğünde kütle oranların oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kurulan sayısal model ve yapılan kabuller, klasik EAO modelinden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ele alınan enjektör konum parametreleri, enjektörlerin merkez açısı (EMA: 40°-110°), enjektörlerin püskürtme açısı (20°-50°) ve enjektörlerin uzunluğu (200-700 mm) geniş bir aralıkta değişmektedir.

### Gerçek şartlarda klasik EAO 'nda enjektör konum parametre değerleri;

- EMA = 70°
- Enjektör Açısı = 45°
- Enjektör Uzunluğu = 300 mm

şeklinde olduğu bilinmektedir (CVS Teknolojileri firmasından alınmıştır)

Klasik EAO standart enjektör konumlandırılması için yapılan model çözümüne göre; yanma ile ortaya çıkan toplam ısı gücü 10,512 MW'tır. Bunun yanında eriyik yüzeyinden ışıma ve taşınım ile eriyiğe geçen ısı gücü 19,783 MW olarak hesaplanmıştır. Böylece sistemdeki toplam enerjinin %9.5'i yanma reaksiyonlarından sağlanırken %18'i de ışıma ve taşınım yoluyla eriyiğe geçtiği belirlenmiş olup literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür (Alexis vd., 2000)

## Yeni tasarım EAO için elde edilen sonuçlar

Açık literatürde EAO ile ilgili sayısal çalışmalar genellikle bu modellerin kullanılabilirliğini tespit edip, sistemin çalışması esnasında gelişen olayları incelemeye yöneliktir (Molintas ve Gupta, 2011; Zhang vd., 2013; Kim vd., 2014). Proje çalışmalarında kullanılan ANSYS yazılımı içerisinde, HAD çözümleriyle birlikte çalışabilen optimizasyon yöntemleri ile farklı konularda yapılmış optimizasyon çalışmaları literatürde mevcuttur (Abdelhamed vd., 2015; Ismail vd., 2014; Benajes vd., 2016). Ancak literatürde, EAO'larında yanma ve enerji verimliliğinin artırılması için yapılan optimizasyonlarda, enjektörlerin yerleşim geometrisinin (konumu ve açısı) optimizasyonu amacıyla HAD analizleriyle etkileşimli olarak yürütülmüş herhangi bir optimizasyon uygulamasına rastlanmamıştır. Bu projede yürütülen sayısal çalışmalarda, açık literatürden tamamen farklı ve ilk olarak, sürekli hurda şarjı için yapılan yeni bir EAO tasarımında, enjektörlerin geometrik konumlandırması optimize edilerek, enerji veriminin iyileştirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında RSO yöntemi kullanılarak optimum enjektör konum ve açıları belirlenmiştir.

Yeni tasarım EAO'nın standart enjektör konumlandırılması için yapılan sayısal çözülemeye göre; yanma ile ortaya çıkan toplam ısı güç 8,803 MW'tır. Bunun yanında eriyik yüzeyinden ışınım ve taşınım ile eriyiğe geçen ısı güç 19,978 MW olarak hesaplanmıştır.

Üzerinde çalışılan yeni tasarım EAO geometrisinden yararlanılarak alınan enjektör konum parametreleri aşağıdaki gibidir.

### EAO geometrisi üzerinde enjektör konum parametre aralıkları;

- EMA = 40° - 110° aralığında
- Püskürtme Açısı = 20° - 50° aralığında
- Enjektör Uzunluğu = 200 - 700 mm aralığında

Ön parametrik analizlerden sonra ele alınan enjektör konum parametreleri için daraltılmış aralıklar aşağıda verilmiştir.



Ön optimizasyon için seçilen daraltılmış aralıklar için enjektör konum parametreleri;

- EMA = 60° - 80° aralığında
- Püskürtme Açısı = 35° - 45° aralığında
- Enjektör Uzunluğu = 250 - 400 mm aralığında

Nihai optimizasyon (RSO) çalışması sonucu elde edilen enjektör konum parametreleri;

- EMA = 80°
- Püskürtme Açısı = 35°
- Enjektör Uzunluğu = 400 mm

olarak belirlenmiştir.

Yapılan nihai optimizasyon çalışması neticesinde yeni tasarım EAO'nda yanma ile ortaya çıkan toplam ısı güç 12,52 MW iken eriyik yüzeyinden ışıınım ve taşınım ile eriyiğe geçen ısı güç ise 22,072 MW olarak hesaplanmıştır.

Buna göre yeni tasarımda standart ve nihai optimizasyon enjektör parametrelerinin konumlandırılmasına göre; yanma ile ortaya çıkan enerjide yaklaşık %30'luk bir artış sağlanmıştır ve bu enerjinin bir kısmı bacadan atılırken bir kısmı da eriğe geçerek sistemin daha verimli çalışmasını sağlamıştır. Nihai optimizasyon değerlerine göre eriğe geçen ısı değerindeki fark 2,094 MW olarak elde edilmiştir yani yaklaşık % 10 değerinde bir iyileşme sağlanmıştır.

Yanma verimindeki bu artış daha fazla karbon partikülünün sistem içerisinde yanarak enerjiye dönüşmesi sayesinde gerçekleşmekte ve bu durumda eriğe geçen karbon miktarında azalma olmaktadır. Yeni tasarım standart enjektör konumlandırılmasında yapılan simülasyonlara göre, eriğe yaklaşık 0,6725 kg/s karbon girerken optimizasyon çalışması ile konumları belirlenen çalışmada ise eriğe 0,5773 kg/s karbon girişi olmuştur. Yani eriyik karbonlanması yaklaşık % 14 azalmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre EAO sistemi çalıştırılırken eriğin istenen sıcaklığa ulaşmasına katkı sağlama amacıyla enjektör konumlandırılması için bulunan optimum değerler kullanılmalıdır. Daha sonra eriğin istenen metalürjik özelliklere daha hızlı ulaşabilmesi için EMA değeri 60° ve altındaki değerlere çekilebilir, enjektör uzunluğu artırılabilir ve enjektör açısı 40° - 42° aralığına getirilebilir. Mevcut teknoloji ile enjektörlerin EMA açılarını değiştirmek mümkün olmasa da enjeksiyon açısının ve uzunluğunun ayarlanabildiği enjektör sistemlerinin tasarlanabileceği düşünülmektedir.

LES türbülans modeli ile yapılan çözümden 1,375 saniyenin sonunda EAO içerisinde oldukça kaotik bir sıcaklık dağılımının olduğu anlaşılmaktadır. Zaman ortalamalı RANS çözümlerinden en yüksek sıcaklığın 3100 K - 1280 K aralığında olduğu, zamana bağlı LES çözümünde ise iki boyutlu yüzeyde sıcaklığının 3320 K - 1290 K aralığında olduğu hesaplanmıştır. Çözüm zamanı uzadıkça bacadan atılan ısı gücün, sistem içerisindeki reaksiyonların ve yüzeylerden olan ısı geçişlerinin daha da dengeye gelmesi ile LES çözümündeki ortalama sonuçların RANS çözümü değerlerine yaklaşacağı görülmüştür. (Şekil 5.31). Bu konudaki benzer irdeleme bir başka araştırmacı tarafından da ifade edilmiştir (Mally vd. 2018).

Projede çalışılan klasik ve yeni tasarım EAO'larındaki yanma sonrası reaksiyonlarını, akış, radyasyon ve konvektif ısı geçişini eşzamanlı çözümü başarı ile tamamlanmıştır. Yukarıdaki değerlendirmeler kapsamında EAO'nun enerji verimliliğini iyileştirme çalışmaları için önem arz eden nihai enjektör konumlandırılması sonrası enerji giriş ve çıkış değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür (Guo ve Irons, 2003; Alexis vd., 2000).

## **Öneriler**

### ***Simülasyonu yapılan modele pota hacmi ve pota içerisindeki eriyik eklenebilir:***

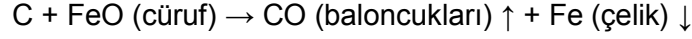
Tamamlanan projemiz sayesinde elde edilmiş olan sınır şartları ile daha kompleks ve zaman alan karmaşık modellerin çözümüne yönelik çalışmalar yapılabilecektir. Bu sayede enjektörlerden püskürtülen kömür partiküllerinin ve O<sub>2</sub> lansının eriyik içerisine ne kadar nüfuz ettiği modellenilebilir. Ayrıca kaliteli çelik üretimini sağlamak için önem arz eden ve eriyik içerisinde oluşan metalurjik kimyasal tepkimeler de modele girilerek eriyikten EAO'na çıkan CO miktarı daha gerçekçi olarak hesaplanabilir.

### ***Eriyik hacmi tanımlanarak metalurjik reaksiyonların modele dahil edilmesi ile gerçek çalışma şartlarına yaklaşım yapılabilir:***

Bilindiği üzere köpüklü cüruf oluşumu için CO gazı da eriyik içerisinde istenmeyen elementleri eriyikten uzaklaştırarak yüzeye doğru baloncuklar halinde çıkmasını sağlar. Bunun için oksijen ve kömür tozu (karbon) birlikte enjekte edilir. Bu projede bu yöntem uygulanmıştır.

Bazı durumlarda ise kaliteli çelik üretimi ve cürufun viskozitesini ayarlayabilmek için hurda ile birlikte demir cevheri, magnezyum ve kireç de pota içerisine konur. Böylece karbon eriyik içerisindeki FeO ile reaksiyona girerek CO gazını üretir. Bununla birlikte, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, FeO cürufu çok akışkan yaparken, CaO ve MgO cürufun koyulaşmasına neden olurlar. Cürufun

bazılik seviyesi ikinin altına düştüğünde, MgO çözünürlüğünde önemli bir artış meydana gelmektedir. EAO'da başlangıçta oluşan cürufun bazılığı düşüktür. Bu da yüksek MgO çözünürlüğü anlamına gelmektedir. İlk hurda sepeti ile birlikte dolomit ilavesi cürufun doygunluğu için gerekli MgO miktarını sağlar ve böylece ocaktaki refrakter aşınması minimize edilir (CVS Teknolojileri Firmasından alınmıştır).



reaksiyonu gereği oluşur.

Bununla birlikte, simülasyonlara eklenecek eriğin içerisinde oluşan reaksiyonlar ve enjeksiyonlar ile eriğe gelen kömür tozu ve O<sub>2</sub>'nin eriğin karışması ve homojenliğe üzerine etkileri de incelenebilir.

### **Yeni bir projenin başlatılması**

Çalışmalarımızın devamı niteliğinde olacak olan ve TÜBİTAK 1505 kapsamında yapmayı düşündüğümüz "Şebeke Regülasyon Uyumlu Yüksek Enerji Verimine Sahip Bir Elektrik Ark Ocak Tasarımı ve Prototip İmalatı" isimli yeni bir proje başlatılması ön görülmektedir.

Bu yeni proje, AC / DC elektrikli ark ocakları için yanma ve radyasyon ile enerji üretiminin ve ısı geçişinin modellenmesi yapılarak ve öneriler kısmında bahsedilen hususlara ek olarak;

- Şebeke harmoniklerinin de minimize edilmesi ile enerji kayıplarının en az %5 daha azaltılmasını sağlayacak,
- Ani sıcak nokta oluşumunun ortadan kaldırılarak ocağın ısıya dayanımını en az % 20 arttırılmasını,
- Ergitme prosesi elektrotların birer faz metallere teması ile başlatılıp sırası ile ikili ve üçlü tüm temas kombinasyonları ve tekrarlı ve tekrarsız permütasyonları oluşturularak ergitme süresince meydana gelen 5, 7, 11 ve 13 nolu harmonik oluşumlarının incelenmesi,
- Reaktif güç dengesizliğinin en az %20 azaltılması,
- Ergitilen metalde homojen sıcaklık ve kompozit oluşumunun sağlanması,
- Şarj süresinde daha yüksek DRI oranına sahip ergitme sağlanması,
- SVC ve TCSC gibi pahalı güç kontrol teçizatına en az ihtiyaç duyacak bir tasarımın yapılması,
- Güç sisteminde ani akımların ve bozulmaların oluşmasını minimize ederek yüksek ark kararlılığını sağlayacak tasarımının yapılması yani şebeke regülasyonlarına uyumlu verimli bir elektrik ark ocak tasarımının yapılması,
- ve prototip üretiminin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

## Kaynaklar

Abdelhamed, A.S., Yassen, Y.El-S., ElSakka, M.M. 2015. "Design optimization of three dimensional geometry of wind tunnel contraction", *Ain Shams Engineering Journal*, 6 (1), 281–288.

Alexis, J., Ramírez, M., Trapaga, G., Jonson, P. 2000. "Modeling of a DC electric arc furnace-Heat transfer from the arc", *ISIJ Int.* 40, 1089-1097.

Benajes, J., Novella, R., Pastor, J. M., Hernández-López, A., Hasegawa, M., Tsuji, N., Emi, M., Uehara, I., Martorell, J., Alonso, M. 2016. "Optimization of the combustion system of a medium duty direct injection diesel engine by combining CFD modeling with experimental validation". *Energy Conversion and Management*, 110, 212–229.

Biswas, G., Eswaran, V. 2002. "Turbulent flow", *Alpha Science Int.*, Kanpur.

Broukal, J., Hájek, J. 2011. "Validation of an effervescent spray model with secondary atomization and its application to modeling of a large-scale furnace", *Applied Thermal Engineering* 31, 2153-2164.

Campolo, M., Andreoli, M., Tognotti, L., Soldati, A. 2007. "Modelling of a multiphase reacting turbulent jet: Application to supersonic carbon injection in siderurgic furnaces". *Chemical Engineering Science* 62, 4439-4458.

Eastep, L.N., Fruehan, R.J. 2000. "The Kinetics of the Reaction of CO<sub>2</sub> with Solid Iron at Elevated Temperatures" *Electric Furnace Conf. Proc.*, 49–62.

Guo, D., Irons, G. 2003. "Modeling of radiation intensity an EAF", *Third international conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia, 10-12.

Hookyung, L., Choi, S., Kim, B.J. 2010. "Coal gasification and combustion modeling in general purpose CFD code" *J. Korean Soc. Combust.*, 15(3), 15–24.

Ismail, N.I., Zulkifli, A.H., Abdullah, M.Z., Basri, M.H., Abdullah, N. S. 2014. "Optimization of aerodynamic efficiency for twist morphing MAV wing", *Chinese Journal of Aeronautics* 27 (3), 475–487.

Kim, D., Choi, S., Shaddix, C. R. 2014. "Manfred Geier. Effect of CO<sub>2</sub> gasification reaction on char particle combustion in oxy-fuel conditions" *Fuel* 120, 130–140.

Kipepe, T.M., Pan, X. 2014 "Importance and Effect of Foaming Slag on Energy Efficiency", *71st World Foundry Congress*, Bilbao.

Launder, B.E., Spalding, D.B. 1972. "Lectures in mathematical models of turbulence", *Academic Press.*, London, England.

Li, Y., Fruehan, R. 2003. "Computational fluid dynamics simulation of postcombustion in the electric arc furnace", *Metallurgical and Materials Transactions*, 34 (3), 333-343.

Magnussen, B., Hjertager, B. 1981. "On the structure of turbulence and a generalised eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow", AIAA Aerospace Meeting, 12-15.

Mally, Max Paul; Günther, Marco; Pischinger, Stefan. Numerical study of knock inhibition with cooled exhaust gas recirculation, Converge EU User Conference 2018 Bologna 2018-04-19 - 2018-04-23

Marchisio, D. L., Barresi, A. A. 2003. "Understanding Coal Gasification and Combustion Modeling in General Purpose CFD Code", IEEE Trans. Plasma Sci. 58, 3579-3587.

Matveev, I.B., Serbin, S.I. 2007. "Modeling of the Coal Gasification Processes in a Hybrid Plasma Torch", IEEE Transactions on Plasma Science, 35(6), 1639-1647.

Molintas, H., Gupta, A.K. 2011. "Kinetic study for the reduction of residual char particles using oxygen and air", Applied Energy, 88, 306–315.

Morsi, S-A., Alexander, A-J. 1972. "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems", Journal of Fluid Mechanics, 55 (2), 193-208.

Odenthal, H.-J., Kemminger, A., Krause, F., Vogl, N. 2017, "A Holistic CFD Approach for Standard and Shaft-Type Electric Arc Furnaces", AISTech 2017 Proceedings, 1101-114.

Odenthal, H.J., Kemminger, A., Krause, F., Sankowski, L. 2018. "Review on Modeling and Simulation of the Electric Arc Furnace (EAF)", Steel Research International, 89, 1700098.

Özkan Özdemir (Doç. Dr.), Çelik üretim prosesi ders notları; Son erişim tarihi: 25 Kasım 2018. <http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/70504/49477>

Patankar, S.V. 2007. "Numerical heat transfer and fluid flow", Taylor & Francis Inc.

Rahman, M.M. 2010. "Fundamental Investigation of Slag/Carbon Interactions in Electric Arc Furnace Steelmaking Process", Doktora Tezi, The University of New South Wales, School of Materials Science and Engineering.

Rahmanian, B., Safaei, M.R., Kazi, S.N., Ahmadi, G., Oztop, H.F., Vafai, K. 2014. "Investigation of pollutant reduction by simulation of turbulent non-premixed pulverized coal combustion" Applied Thermal Engineering, 73 (1) 1222–1235.

Sanchez, J. L. G., Conejo, A.N., Ramirez-Argaez, M. A. 2012. "Effect of Foamy Slag Height on Hot Spots Formation inside the Electric Arc Furnace Based on a Radiation Model", ISIJ International, 52(5), 804–813.

Scheepers, E., Yang, Y., Adema, A.T., Boom, R., Reuter, M.A. 2010. "Process modeling and optimization of a submerged arc furnace for phosphorus production", Metallurgical Mater. Trans. B, 41, 990-1005.

Singh, R. I., Brink, A., Hupa, M. 2013. "CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification", Applied Thermal Engineering, 52(2), 585–614.

Story, S.R., Fruehan R.J. 1998. "Modeling Post Combustion in the EAF", Proceedings of the Biennial Materials Conference of The Institute of Materials Engineering, 77–82.



Szekely, J., McKelliget, J., Choudhary, M. 1983. "Heat-transfer fluid flow and bath circulation in electric-arc furnaces and de plasma furnaces", *Ironmaking Steelmaking*, 10(4), 169–179.

Ushio, M., Szekely, J., Chang, C. W. 1881 "Mathematical modelling of flow field and heat transfer of high current arc discharge", *Iron making and Steel making*, 8, 279–286.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. 1995. "An introduction to computational fluid Dynamics", Longman Scientific & Technical.

Yigit, C., Coskun, G., Buyukkaya, E., Durmaz, U., Güven, H.R. 2015. "CFD modeling of carbon combustion and electrode radiation in an electric arc furnace", *Applied Thermal Engineering*, 90, 831–837.

Zhang, J., Prationo, W., Zhang, L., Zhang, Z. 2013. "Computational Fluid Dynamics Modeling on the Air-Firing and Oxy-fuel Combustion of Dried Victorian Brown Coal", *Energy and Fuels*, 4258-4269.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. EKREM BÜYÜKKAYA
Proje No:	216M295
Proje Başlığı:	Yeni Tasarlanmış Bir Ark Ocağında Enerji Veriminin Cfd Analizi Ile Geliştirilmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	GÖKHAN COŞKUN, HASAN KÜÇÜK
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2017 - 01/10/2018
Onaylanan Bütçe:	89212.0
Harcanan Bütçe:	73375.78

TÜBİTAK

<p>Öz:</p>	<p>Sanayi tipi elektrik ark ocağındaki (EAO) hurdanın, ergime sıcaklığına çıkarılabilmesi için büyük miktarda kimyasal enerjiye ve elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Yüksek kapasiteli modern bir ocak her yüklemde maksimum 350 ton kadar hurda işleyebilir. Bu işlem yaklaşık 60 dakika sürer ve EAO'da üretilen her ton çelik için yaklaşık 8 GJ'luk enerji tüketilir. Bu tüketim, entegre tesislerde yapılan çelik üretimi esnasındaki tüketimin yarısı olmakla birlikte 100.000 nüfuslu bir şehrin elektrik enerjisi tüketimine eşdeğerdir. Dünyada toplam çelik üretim kapasitesi 1,5 milyar ton/yıl olduğu düşünüldüğünde küçümsenmeyecek kadar yüksek tüketimlerin olduğu görülmektedir. Günümüzde ergitme süresini azaltan ve enerji maliyetini düşüren çözümler kadar EAO'ların verimlerini arttırmak için kimyasal enerjiden daha fazla faydalanılması da önemlidir. Bu amaçla ön ısıtmada kullanılan brülörün tasarım parametrelerinin belirlenmesi, ergitme işlemi devam ederken enerji kaybına sebep olmadan ilave hurdanın ocağa yüklenebilmesi, gerektiğinde ek yüksek gücün elde edilebilmesi, ocağın ideal şartlarda ve hızla boşaltılabilmesi gibi düzenlemelerin de yapılması gerekir.</p> <p>Klasik EAO'nda, katı haldeki hurdanın ocağa ilk yüklemde yüksek yoğunluklu yüklenememesi nedeniyle, ilk yüklemeyi takiben ikinci yükleme yapılabilmektedir. Üstteki tek kapaktan hurda ilavesi yapılırken ergitme işlemi durdurulur. Ocak kapağının açılması ile büyük miktarda enerji kaybı olduğu için ergime süresi uzar. Ocaklardan bu yolla kaybolan ısı güç 10-20 kW-h/ton mertebelerindedir. Enerji maliyetinin düşürülmesi amacıyla, şaft ocakları ve yandan beslemeli ocaklar gibi değişik EAO tasarımları yapılmış olsa da istenen başarı tam olarak sağlanamamıştır.</p> <p>Tamamlanan bu projede, ısı ve enerji kaybını azaltarak verimi artırmak amacıyla ergitmeyi durdurmadan sürekli hurda şarjı yapılabilen yeni tasarım EAO, enjektör konum parametreleri optimize edilmeye ve EAO'nun enerji verimi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, ANSYS hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak, EAO'ndaki yanma, ısı ve kütle geçişi gibi çok karmaşık süreçlerin sayısal bir modeli kurulmuştur. Bu sayısal model ile yapılan simülasyonlardan; EAO'daki yanma ve elektrik arki ile enerji üretimi, eriyiğe, yan duvarlara ve üst kapağa, iletim, taşınım ve ışınlama olan ısı geçişleri ve bacadan olan ısı kayıpları sürekli rejim şartlarında hesaplanmıştır.</p> <p>Klasik EAO standart enjektör konumlandırılması için yapılan çözümlere göre; yanma ile ortaya çıkan toplam ısı güç 10,512 MW'tır. Bunun yanında eriyik yüzeyinden ışınlım ve taşınım ile eriyiğe geçen ısı güç 19,783 MW olarak hesaplanmıştır. Böylece sistemdeki toplam enerjinin %9.5'i yanma reaksiyonlarından sağlanırken %18'i de ışınlım ve taşınım yoluyla eriyiğe geçtiği belirlenmiş olup literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür</p> <p>Optimizasyon çalışmaları için ele alınan enjektör konum parametreleri; enjektörlerin merkez açısı (EMA: 40°-110°), enjektörlerin püskürtme açısı (20°-50°) ve enjektörlerin uzunluğu (200-700 mm) geniş bir aralıkta değiştiği belirlenmiştir. Bu nedenle, nihai optimizasyon çalışmasından önce yapılan parametrik analizlerde ele alınan EMA 60°-80°, püskürtme açısı 35°-45° ve enjektör uzunluğu 250 mm-400 mm aralığında çalışılmıştır. Bunun için yazılımda mevcut olan Response Surface Optimizasyon yöntemi kullanılarak ele alınan parametrelerin optimum değerleri belirlenmiştir. Yeni tasarım ocağın nihai optimizasyon çalışması sonrasında elde edilen enjektör konum parametreleri; EMA 80°, püskürtme açısı 35° ve enjektör uzunluğu 400 mm olarak belirlenmiştir.</p> <p>Böylece yeni tasarım EAO'nun standart enjektör konum parametrelerine yönelik yapılan çalışmalar ile nihai optimizasyon sonrası elde edilen enjektör konum parametrelerinin sonuçları karşılaştırıldığında; yanma ile ortaya çıkan enerjide yaklaşık %30'luk bir artış sağlanırken eriyiğe geçen ısı miktarında ise yaklaşık % 10'luk bir iyileşme olduğu görülmüştür.</p>
<p>Anahtar Kelimeler:</p>	<p>Elektrik ark ocağı, Elektrot radyasyonu, Karbon yanması, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Optimizasyon</p>
<p>Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:</p>	<p>Hayır</p>
<p>Projeden Yapılan Yayınlar:</p>	<p>1- Elektrik Ark Ocağı HAD Simülasyonlarının Farklı Ağ Yapıları İle Modellenmesi (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p>