

KARBONSUZLAŞMA SÜRECİ: SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇELİK ÜRETİMİNE DOĞRU GEÇİŞTE EAF ÇELİK ÜRERİM SÜREÇLERİNİN DEĞİŞİMİ

DECARBONIZATION PROCESS: CHANGE of EAF STEEL PRODUCTION PROCESSES in the TRANSITION TOWARDS SUSTAINABLE STEEL PRODUCTION

Uğur Cengiz¹, Muammer Bilgiç¹

¹ Bilecik Demir Çelik San. Tic. A.Ş., Türkiye

Anahtar Kelimeler: Demir, Çelik, Karbonsuzlaşma, Emisyon, Enerji

Abstract

Climate change has prompted a radical transformation in all industrial activities, transportation, lifestyles, and consumption patterns that rely on fossil fuels, the cornerstone of our civilization. Due to the predominantly carbon-based nature of classical steelmaking processes, "Decarbonization" processes pose one of the most challenging hurdles for the steel industry. There is a vast gap in carbon footprint between the two primary steel production methods, with the BOF (*Basic Oxygen Furnace*) route, accounting for approximately 70% of total steel production, being the most problematic in terms of carbon emissions. However, this observation is often incomplete, and the decarbonization transformation in scrap-based EAF (*Electric Arc Furnace*) steelmaking processes is considered an unquestioned and seamless steelmaking process.

This study focuses on examining what the decarbonization goals of EAF processes using scrap and various ore derivatives as raw materials will be, what kind of challenges will arise, and how these will be addressed in terms of production, quality, metallurgical processes, costs, and emission values.

The topics covered in this study include:

- General definition of the carbon footprint of the EAF steelmaking process and possible decarbonization processes.
- Assessment of the current status and evaluation of energy and mass balances in EAFs.
- Changes in chemical energy use, alternatives, problems, and causes in EAFs.
- Examination of decarbonization in scrap-based EAF processes, problems with metallic and energy efficiency, and analysis from the perspective of the circular steelmaking process.
- Metallurgical implications of using hydrogen instead of fossil fuels in DRI production and EAF's.
- Possible changes and effects in the application of fundamental metallurgical instruments such as carbon boiling, carbon injection, decarburization, and slag practice.

vii. Relationships between metallic efficiency, metallurgical balance, cost, emissions, and product quality parameters with oxidation and chemical energy use.

viii. Proposals for changes in the EAF process from the perspective of circular steelmaking principles.

This study aims to provide insights into the challenges and potential solutions for achieving decarbonization goals in the steel industry, particularly in EAF processes.

Özet

İklim değişimi ile küresel mücadelede medeniyetimizin yakıtı olan fosil yakıtlara dayalı tüm endüstriyel faaliyet, ulaşım, yaşam ve tüketim biçimi kökten değişime uğramaktadır.

Klasik çelik yapım proseslerinin ağırlıklı karbona dayalı olması nedeniyle "Karbonsuzlaşma" süreçlerinin en zorlularından biri çelik endüstrisidir. İki temel çelik üretim biçimi arasında karbon ayak izi açısından çok geniş bir aralık söz konusudur, toplam çelik üretiminin yaklaşık %70'ini oluşturan YF – BOF (*Basic Oxygen Furnace*) rotası bu anlamda en sorunlu üretim biçimidir. Ancak bu tespit eksik algılanarak, hurda esaslı EAF (*Electric Arc Furnace*) çelik yapım proseslerindeki karbonsuzlaşma dönüşümü çok tartışılmayan ve sorunsuz bir çelik yapım prosesi olarak kabul edilmektedir.

Hazırlanan bu bildiri, hurda ve değişik oranlarda cevher türevlerinin hammadde olarak kullanılacağı EAF proseslerinin, karbonsuzlaşma hedeflerinin ne olacağı, ne tür sorunların gündeme geleceği, bunun üretim, kalite, metalürjik proses, maliyet ve emisyon değerleri açısından irdelenmesini ele almaktadır.

Kapsam dâhilinde olan konu başlıkları ise;

- Genel olarak EAF çelik yapımı prosesinin karbon ayak izi ve olası karbonsuzlaşma süreçlerinin tanımlanması,
- EAF enerji & kütle dengelerinin mevcut görünümü ve değerlendirilmesi,
- EAF'ler de kimyasal enerji kullanımındaki değişimler, alternatifler, sorunlar & nedenleri,

- iv. Hurda esaslı EAF prosesinde karbonsuzlaşma, metalik ve enerji verimliliği sorunları & döngüsel çelik yapım prosesi açısından irdelenmesi,
- v. DRI üretiminde & EAF’de fosil yakıtlar yerine hidrojen kullanımının metalurjik yansımaları,
- vi. Karbon kaynaması, karbon enjeksiyonu, dekarburizasyon ve cüruf pratiği gibi temel metalurjik enstrümanların uygulanmasındaki olası değişimler ve etkileri,
- vii. Metalik verim, metalurjik denge, maliyet, emisyon ve ürün kalitesi parametrelerinin oksidasyon ve kimyasal enerji kullanımı ile ilişkileri,
- viii. Döngüsel çelik yapım prosesi ilkeleri açısından EAF prosesinde değişim önerileridir.

Bu çalışma, çelik endüstrisinde, özellikle EAF süreçlerinde, karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmaya yönelik zorluklar ve potansiyel çözümler hakkında bilgi sağlamayı amaçlamaktadır.

1. Giriş

İklim değişimi mücadelesi temel olarak bir enerji dönüşümü sorunudur. İki - üç yüzyılda oluşan fosil yakıt esaslı bir uygarlığın yaklaşık 35 yılda fosil yakıtları tümüyle sosyal ve ekonomik hayattan çıkarması çok zorlu, ancak kaçınılmaz bir süreçtir. Bu süreçte küresel emisyonun % 7 - 9’unu oluşturan çelik üretim sektörünün de karbonsuzlaşması ve 2050’de karbon nötr olabilmesi de diğer sektörlerde olduğu gibi çok zorlu bir dönüşümü gerektirmektedir. Çelik sektörü farklı enerji türlerini, metalik hammadde türlerini ve metalurjik prosesleri kapsayan enerji ve dolayısıyla emisyon yoğun bir sektördür, karbonsuzlaşması en zor olan bir sektör olacaktır.

Yapısı itibarıyla C ve Fe alaşımı olan çelik üretim prosesini karbonsuz çelik yapımı şeklinde tanımlamak teknik olarak sorunlu bir tanımlama olmaktadır. Daha doğru tanımlama “karbon nötr” ya da “düşük karbonlu çelik” yapımıdır.

Küresel toplam çelik üretiminin %70’ini oluşturan YF&BOF rotasının karbonsuzlaşması çelik dünyasının gündeminde iken, göreceli daha düşük, yaklaşık (1/4) karbon ayak izine sahip olan hurda esaslı EAF’lerin karbonsuzlaşma dönüşümü çok konu edilmemektedir.

Kullanılan hurda miktarına ve cinsine, üretilen çelik cinsine bağlı olarak değişen oranlarda karbon emisyonuna sahip olan EAF’ler, fosil yakıt temelli YF’lere kıyasla ciddi düzeyde düşük karbon ayak izine sahip olsa da, sonuçta tüm dünya için 2050 hedefi net sıfırdır ve EAF prosesinde net sıfır için uzun bir yolculuk söz konusudur.

Çelik sektörü için karbonsuzlaşma dönüşümü enerji tipi ve yeni enerji türlerinin dikte edeceği hammadde ve metalurjik proses dönüşümü olacaktır.

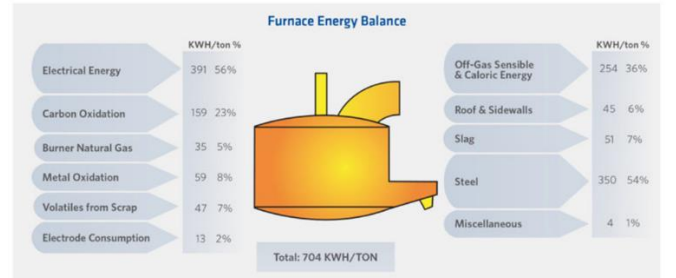
Zaten ismi üstünde Elektrikli bir ocak tipi olan EAF prosesinde en önemli dönüşüm kullanılan elektriğin üretiminde neden olduğu ayak izi ile ilgili düşünülmüştür. Gerçekten de örneğin ülkemizdeki yüksek şebeke emisyonu nedeni ile EAF emisyonunda önemli bir yer kaplar, ancak

yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik kullanımı da sorunu tek başına çözemeyecektir, çünkü kapsam 1 proses emisyonu ve kapsam 3 ekosistem emisyonu da bir çok durumda önemli bir orana sahiptir.

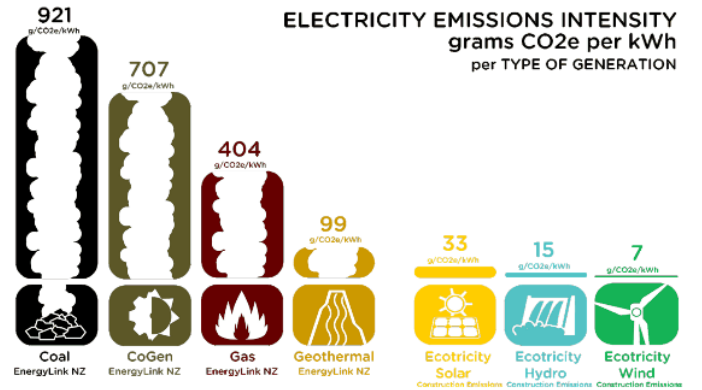
EAF’ler için göreceli rahat bakışın 2030 yaklaştıkça, iklim değişiminin somut etkileri daha fazla görüldükçe, çevresel yaptırımlar etkisini artırdıkça karbonsuz çelik yapım teknolojileri ve prosesleri çok daha fazla tartışılır hale gelecektir.

1.1 EAF enerji profili

Tipik hurda esaslı bir EAF’nin enerji dengesi Şekil 1’de belirtilmiştir. Bu örnekte toplam enerjinin % 48,5 u elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisi emisyonu kapsam 2 içinde değerlendirilmekte ve ülke şebekesinin ortalama gr CO₂/kwh emisyon değerine ve eğer varsa üretim sahasında üretilen yenilenebilir elektrik oranına bağlıdır. Ortalama emisyon elektrik üretiminde kullanılan yakıt türlerinin ve teknolojilere paralel bir şekilde değişmektedir, Şekil 2’de ve Şekil 3’de bu teknolojilerin ortalama değerlerini ve ülkeler arasındaki değişimleri vermektedir.

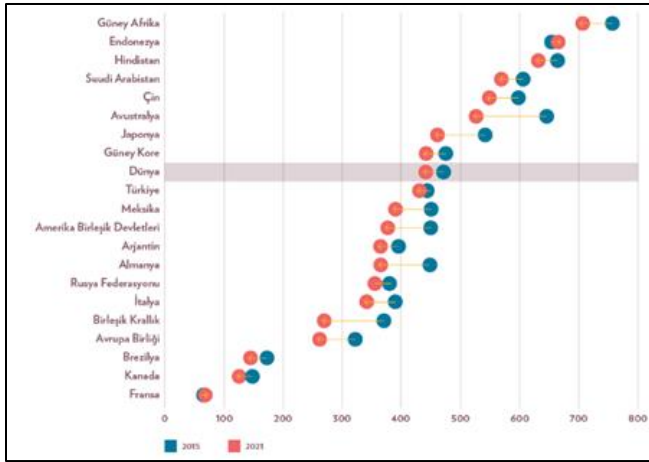


Şekil 1. Hurdaya dayalı bir EAF’nin enerji dengesi örneği



Şekil 2. Elektrik üretim türlerinin emisyon değerleri

Ülkemizin ortalama değeri 2022 yılında 484 gr CO₂/kwh olarak AB ortalamasının çok üstünde ve dünya ortalamasına yakın bir değerdedir.



Şekil 3. Ülkelerin elektrik şebekesi emisyon değerleri

Süreç içinde yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin artması ile kapsam 2'nin EAF toplam emisyonundaki % 40 - 50 civarındaki payı azalacaktır. Çözüm bellidir, yoğun bir yatırım ve dönüşüm diğer tüm sektörlerde olduğu gibi EAF'lerde de etkisini gösterecektir. Elektrik tüketimine ve şebeke emisyon ortalamasına bağlı olarak kapsam 2'nin payı azalacaktır. Kuşkusuz en doğru yöntem, prosesin ve yan uygulamaların gerektirdiği enerji ihtiyacının azaltılmasıdır, bu konu gelişmeye çok açık bir alan olarak not edilmelidir. EAF karbonsuzlaşma dönüşümünde en zorlu ancak ne yapılacağı henüz çok konuşulmayan konu, düşük karbonlu/ayak izli hammadde ve enerji kullanımı ve bu koşullar için oluşturulmuş yeni bir metalürjik prosesin geliştirilmesi ve uygulanması yani kapsam 1 emisyon içeriğidir.

1.2. EAF'ler de enerji kullanımı dönüşümü

EAF'ler de enerji kullanımı dönüşümü & öneriler;

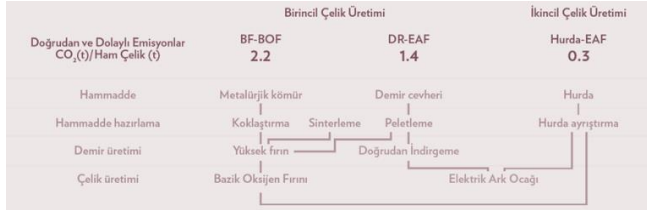
- EAF'ler elektrik ve kimyasal enerjinin yarı yarıya kullanıldığı bir ergitme ocağı haline gelmiştir. EAF kapsam 1 emisyonunun en önemli etmeni değişik teknolojiler ile uygulanan doğal gaz, karbon verici ve oksijen kullanımı kaynaklıdır. Net sıfır yolcuğunun ana unsuru fosil yakıtlardan tümü ile çıkıştır. EAF'lerde de, klasik elektrik maliyetine göre daha düşük maliyeti nedeniyle tercih edilen kimyasal enerji, hem oransal olarak, hem de cins olarak değişime uğrayacaktır. Kimyasal enerjinin bu kadar yüksek düzeyde kullanılmasının nedeni metalürjik gerekçeler değil, ekonomik avantajlarıdır. Ancak emisyon maliyetinin önemli bir etken hale gelmesi ile emisyon değeri yüksek kimyasal enerji kullanımının EAF lerde azalması ve süreç içinde ortadan kalkması zorunlu gözükmemektedir.
- Emisyon katkısı yüksek kimyasal enerjiden vazgeçmek birim elektrik tüketimini artıracak olsa da, ucuz, emisyon değeri düşük yeşil elektrik bu

kullanım artışının getirebileceği emisyon artışını elimine edecektir.

- Enerji türü değişimi ile birlikte olması gereken enerji tüketiminin azaltılması sorunu çok tartışmalıdır. Enerji ve hammadde verimliliği; enerji ihtiyacı ve diğer tüketim malzemelerinin miktarını da belirleyen bir unsurdur. Enerji türü ve EAF metalik verimliliği iç içe konulardır ve bu noktada en çok tartışılması gereken metalürjik sorun ise EAF'de metalik oksidasyondur. Fosil yakıtlara dayalı kimyasal enerji kullanımı EAF'de oksidasyon kayıplarının ana nedenidir. Sıvı çelik çözünmüş oksijen seviyesi, cüruf miktarı, kompozisyonu, baca gazı ve soğutma suyu sistemi ısı kayıpları, elektrot, refrakter, ferro alyaj tüketimini belirlemektedir ve oksidasyon şiddeti ile paraleldir. Yeşil elektrik daha düşük maliyeti ile kimyasal enerjinin yoğun kullanım nedenini de ortadan kaldıracaktır.
- EAF'ler de verimlilik termodinamik yasalar ışığında ve karbon ayak izini önceleyen bir bakış ile metalürjik olarak tekrar değerlendirilmelidir, bu değerlendirme ve uygulamada dijitalleşme, modelleme ve proses kontrol sensörizasyonu destek unsurlarıdır. Araştırma kurumları ve çelik üreticilerinin önündeki en önemli çalışma alanlarından biri budur.
- EAF de kimyasal enerji kullanımı ısı kayıplarını artıran bir unsurdur, üretim hızını artırmak için kontrolsüz bir şekilde oranı artırılan kimyasal enerji, yanma ürünlerinin hacminin ve sıcaklığının artmasına neden olur, oluşan yüksek gaz hacimleri, yüksek kapasiteli toz tutma ve su soğutma sistemlerini ve tüketimlerini zorunlu tutmuştur. Şekil 1'deki örnekte görüldüğü gibi girdi enerjinin %36'sı baca gazı ile birlikte atılmaktadır. Tartışmalı miktar ve türdeki bir enerji girdisinin neden olduğu atık ısıyı geriye döndürmek için hurda ön ısıtma ve atık ısı çevrim teknolojileri bir önlemdir ancak her türlü enerji dönüşümü bir verimlilik faktörü ve kayıp içerir, EAF enerji türleri ve oranları tüm bu parametreleri dikkate alan bir şekilde tekrar değerlendirilmelidir.
- H₂'nin, ekonomik ve yenilenebilir elektrikten üretilmesi koşulu ile yanma enerjisi olarak doğal gaz ile yer değiştirmesi çok mümkündür. Kuşkusuz ister doğal gaz, ister H₂ esaslı olsun yanma prosesine alternatif olarak, indüksiyon veya doğrudan elektrikli ısıtma teknolojileri gündeme gelecektir. Her türlü enerji dönüşümü verimlilik ve çevrim kaybını gerektirecektir, bu nedenle doğrudan ve optimize edilmiş bir şekilde tüm yanmaların elektrifikasyona dönüşmesi çok mümkündür.

1.3. EAF'lerde hammadde dönüşümü

- Hurda esaslı EAF prosesi en düşük karbon ayak izine sahiptir, bu nedenle cevher esaslı endüstri, geri dönüşüm kaynaklı bir endüstriye doğru dönüşmektedir, ancak hurda miktar olarak sınırlı ve içerik olarak bazı çelik türleri için uygun değildir.
- Bu nedenle cevher esaslı ancak EAF'lerde kullanılabilecek demir cevheri türevi hammadde kaynakları yani DRI bu açığı kapatacak tek çözüm olarak görülmektedir. DRI, geçmişte özel koşullarda kullanılan alternatif bir çelik hammadde türü iken artık kaçınılmaz bir seçenek haline gelmiştir.
- Ancak klasik doğal gaz esaslı DRI, hurdadan çok yüksek, YF'lerden daha düşük bir karbon ayak izine sahiptir. Hurda EAF 0,3-0,6, DRI EAF 1,4-1,6, YF-BOF ise 2,2-2,6 ton/ton ham çelik CO₂ emisyon değeri sıralaması ile karbonsuzlaşma açısından DRI henüz yetersiz bir alternatiftir. Bu nedenle DRI üretiminde Doğal gaz yerine indirgeyici olarak yenilenebilir elektrikten üretilmiş H₂ kullanımı sıfır emisyon değerine sahip bir seçenektir. H₂'nin yoğun elektrik ihtiyacı ve bu elektriğin ancak yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi halinde karbonsuz bir alternatif olması şimdilik en önemli sorundur. H₂DRI-EAF rotasını, mevcut teknolojik alt yapı ile 3,48 MWh/ton ham çelik olan elektrik tüketimine rağmen seçenlerin geleceğe ve karbonsuzlaşmaya dair algısının da altı çizilmelidir.



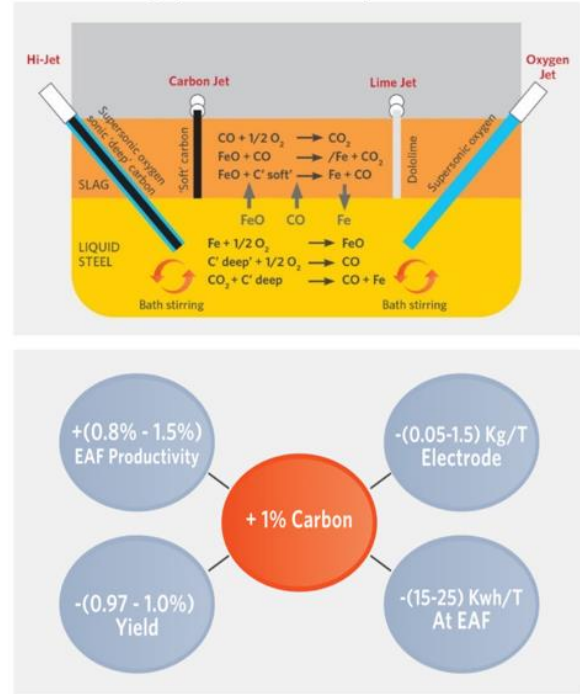
Şekil 4. Birincil ve ikincil çelik yapım proseslerine ait CO₂ emisyonu yoğunluğu değerleri (CO₂ ton/ton ham çelik)

- H₂DRI-EAF, ilk yatırım maliyeti ve göreceli çok yüksek yeşil elektrik ihtiyacı gibi sorunların dışında metalürjistler için de tümüyle yeni bir dönemi işaret etmektedir. Karbonsuz hammaddeye dayalı bir ark ocağı prosesi bir örnek dışında endüstriyel boyutta hiç denenmemiş ve birçok yeni zorluğu içeren bir prostestir. Bu konu yeterince çalışılmamıştır ve dönüşüm sürecinin çok zorlu olacağı açıktır.

1.4. EAF'lerde metalürjik proses dönüşümü

- Karbon enjeksiyonu, EAF ler için hem cüruf düzenleyici, hem de kabarık cüruf nedeniyle arkın gizlenmesi işlevini görmektedir, ancak kullanılan karbon miktarı önemli bir enerji kaynağı olmakla beraber, aynı zamanda en önemli emisyon

kaynağıdır, bu nedenle sentetik, biomass, charcoal, geri dönüştürülmüş karbon taşıyıcılar karbon enjeksiyonu amacıyla kullanılacaktır. Karbon enjeksiyonunun bir diğer fonksiyonu da oksidasyona karşı antioksidant ve indirgeyici görevi görmesidir. Karbon enjeksiyon malzemesi kullanım miktarı, cüruf FeO miktarı, ocak atmosferi ve kimyasal enerji kullanım miktarına göre değişmektedir, tüm bu parametreler değişecektir ve termodinamik modelleme ve dijital ikiz uygulamaları ile yönetilen bir EAF metalürjik prosesinde bu aşamalar minimum karbon ayak izi ile çalışabilecektir. Şekil 5'de klasik EAF prosesinde enjeksiyon reaksiyonlarını ve %1 karbon değişiminin sonuçlarını vermektedir.



Şekil 5. Karbonun ve enjeksiyonunun EAF prosesindeki önemi

- Sıfır karbonlu bir EAF prosesi henüz çok iddialı olmakla beraber, azaltılmış bir enjeksiyon düzeyi mümkündür. Her türlü enjeksiyon, geliştirilmiş baca gazı analizlerinden gerçek zamanlı alınacak verilerle beslenen bir termodinamik modelleme ile yapılacaktır. Termodinamik modelleme, dijital ikiz olarak dizayn edilmiş bir metalürjik prostesten referans alabilecektir. Metalürjik prosesin optimizasyonu ve belirsizliklerin azaltılması mümkündür. İndüksiyon ile banyo hareketi, göreceli olarak çok yüksek sabit sıvı metal ile çalışma, primer demir yapım ünitesinden gelen düşük karbonlu proses ürünü sıvı metal ilavesi diğer teknolojik seçeneklerdendir.
- Klasik hurda verimliliği ve cüruf miktarı doğrudan EAF kimyasal enerji kullanımının bir

fonksiyonudur, bu nedenle miktarı azalmış ve niteliği değişmiş bir enjeksiyon prosesinde, oksidasyonun denetimi ilk hedef olacaktır. Karbon ayak izinin azaltılması hurda ve DRI dâhil tüm girdilerin veriminin artırılması ve kayıpların minimizasyonu ile mümkündür.

- d. Metalürjik prosesin karbonsuzlaşması özel bir yatırımdan fazla, yeni proses tercihlerini gerektirecektir. Kimyasal enerjinin azalması ile düşük karbonlu hammadde ve yakıtlar arasında C dengesini kurmak en çok zorlanılacak konudur. Çelik, tanımı itibarıyla Fe ve C alaşımdır, bu nedenle sıfır karbon mümkün değildir, proste düşük karbon oksidasyon nedenli kayıplara neden olacağı için kritik bir konudur.
- e. Metalürjik prosesin daha düşük kimyasal enerji kullanımına doğru evrilmesi her anlamda verimlilik artırıcı bir tercih olacaktır, düşük emisyonu geçişin gerektireceği finansman ihtiyacına bu verimlilik artışının destek vermesi mümkündür.

2. Sonuçlar ve Öneriler

EAF çelik yapım prosesinin karbonsuzlaşması, tüm değer zincirinin karbonsuzlaşma çalışmalarında ne fazla zorlanılacak konudur. EAF prosesinin son 30 yılında geçirdiği değişimin bir kenara bırakılması ve tümüyle yeni ve karbonsuz bir proses dizaynı metalurjistler için zorlu bir dönemi işaret etmektedir. Karbonsuzlaşma çalışmaları söz konusu olduğunda öncelikli söylem olarak teknolojik değişim ve bunu gerektirdiği teknolojik alt yapı yatırımı öne çıkar, oysa konunun metalürjik proses yönünün neden olacağı zorluklar en az diğer etmenler kadar önemlidir.

Karbonsuzlaşma dönüşümü, konunun tüm yönlerinin ve öncelikle proses tasarlayıcı ve uygulayıcılarının tümüyle farklı yeni bir bakışı geliştirmelerini gerektirmektedir. Tüm endüstrinin ve sosyal hayatın temel enerji tipinin değişimi, mutlaka üretim proseslerinin de değişimini gerektirecektir. Bu değişim de en zorlanılacak konu da çok az zamanımız kalmış olmasıdır.

Referanslar

[1]<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080969886000134>

[2]<https://www.midrex.com/tech-article/impact-of-hydrogen-dri-on-eaf-steelmaking/>