

SİNTER TESİSLERİNDE ENERJİ KULLANIM NOKTALARI VE ENERJİYİ VERİMLİ KULLANACAK YÖNTEMLERİN BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF ENERGY UTILIZATION POINTS AND THE METHODS USING THE EFFICIENT ENERGY FOR SINTERING PLANTS

Adem KAYA*, Emin Taner ELMAS**

ÖZET

Geliş Tarihi/Received: 25 Ocak 2022
Kabul Tarihi/Accepted: 21 Haziran 2022

Araştırma Makalesi/Research Article

*
İSDEMİR - İskenderun Demir Çelik Fabrikaları
A.Ş., 31200 İskenderun/Türkiye

ISDEMİR - Iskenderun Iron and Steel
Factories Inc., 31200 Iskenderun/Turkey

ORCID: 0000-0002-0621-8495

**

Otomotiv Teknolojisi Programı, Motorlu
Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü,
İğdır Teknik Bilimler M.Y.O

Biyomühendislik ve Bilimleri Anabilim Dalı,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İğdır
Üniversitesi, İğdir/Türkiye

Department of Bioengineering and Sciences,
Graduate School of Education, İğdir
University, İğdir/Turkey

ORCID: 0000-0002-7290-2308

Sinterleme işlemi toz cevherlerin aglomerasyon ile yüksek fırın için istenen parça iriliğine, mukavemete ve gaz geçirgenliğine sahip duruma getirilmesi prosesidir. Sinterleme, diğer bir ifade ile, pudra kütlesi içindeki partiküllerin atomlarının, ısının etkisi sonucu oluşan çekimle birbirine bağlanmasıdır. Sinterleşme genellikle pudraların erime noktalarının altında meydana gelir. Sıcaklık arttıkça pudra kütlesinin sertliği artarken elektriksel direnci ve gözenekliliği azalır. Tane yapısında bazı değişiklikler meydana gelir ve yeniden kristalleşme ile tane büyümesi olur.

Sinterleşmenin amaçlarından biri; sinterleme esnasında cevherin kimyasal yapısında zararlı miktarda bulunan elementleri bertaraf etmektir. Sinterleme neticesinde elde edilen mamul cevherin yüksek fırına şarj edilmesi halinde yüksek fırın ham demir kapasitesinde artış olur, ayrıca kok sarfiyatında ve oluşacak cüruf ve baca tozlarının miktarlarında da azalmalar gözlenir.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Sinter tesisleri, Kok verimliliği, Enerji

ABSTRACT

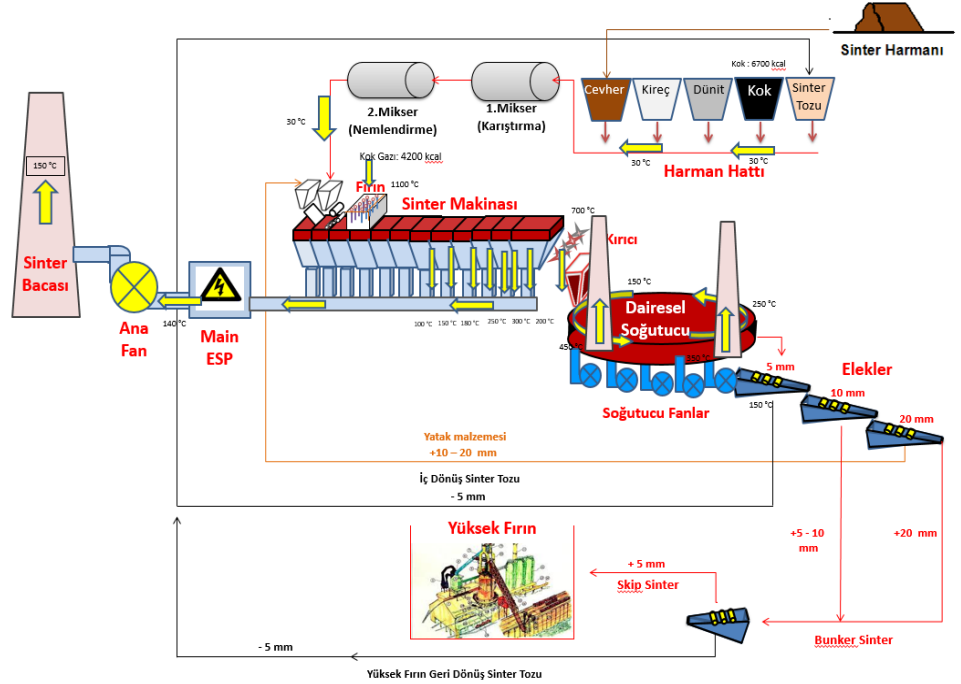
It is the process of bringing the powdered ores into agglomeration with desired strength, strength and gas permeability for the blast furnace. Sintering can be defined as the bonding of the atoms of the particles in the mass of the powder to the attraction resulting from the effect of heat. Sintering generally occurs below the melting points of the powders. As the temperature increases, the hardness of the powder mass increases and the electrical resistance and porosity decrease. There are some changes in grain structure and grain growth with recrystallization. One of the purposes of sintering; is to eliminate the harmful amount of elements in the chemical structure of the ore during sintering. When the finished ore obtained from sintering is charged to the blast furnace, the blast furnace capacity of the blast furnace increases and also the amount of coke consumption and the amounts of slag and chimney dust to be formed decrease.

Keywords: Energy efficiency, Sinter facilities, Coke productivity, Energy

1. GİRİŞ

Sinterleme işlemi toz cevherlerin aglomerasyon ile yüksek fırın için istenen parça iriliğine, mukavemete ve gaz geçirgenliğine sahip duruma getirilmesi prosesidir. Sinterleme, diğer bir ifade ile, pudra kütlesi içindeki partiküllerin atomlarının, ısının etkisi sonucu oluşan çekimle birbirine bağlanmasıdır. Sinterleşme genellikle pudraların erime noktalarının altında meydana gelir. Sıcaklık arttıkça pudra kütlesinin sertliği artarken elektriksel direnci ve gözenekliliği azalır. Tane yapısında bazı değişiklikler meydana gelir ve yeniden kristalleşme ile tane büyümesi olur. Endüstriyel sinterleme 1100-1200 OC sıcaklıkta toz demir cevherlerinin kok tozu ve diğer ilavelerle pişirilmesi sonucu Yüksek Fırınların yarı mamulünü yapmaktır. İsdemir A.Ş. Endüstriyel Sinter Tesisi Örneği Şekil 1 ile gösterilmektedir. Endüstriyel sinterleme ünitesi başlıca üç bölümden meydana gelir [4].

- Dozajlama Ünitesi
- Sinterleme Tesisleri(1. Ve 2.Sinter Fabrikaları)
- Çamur Hazırlama ve Kurutma Tesisi
- Dozajlama Ünitesi (OP-3)



Şekil1. Endüstriyel Sinter Tesisi Örneği (İsdemir A. Ş)

1.1. Dozajlama Ünitesi

Dozajlama ünitesinde (170 no'lu ünite) her sırada 20 bunker olmak üzere 2 sıralı 40 adet bunker mevcuttur. K ve L hattı olarak isimlendirilen bu harman besleme hatları birbirinden bağımsız olarak çalışırlar. Her hat üzerinde bunkerlerin dağılımı 4 adet sinter tozu, 3 adet kok tozu, 2 adet dolomit, 2 adet kireçtaşı ve 9 adet cevher bunkerleri şeklindedir. Her bunker altında hızı değiştirilebilir dozajlama kantarları bulunmaktadır. Malzemeler bunkerlerden bilgisayar kontrollü kantarlı iletim bantları vasıtası ile alınarak toplama konveyörlerine boşaltılır. Kireçtaşı, dolomit ve dunit ise 0-3 mm'ye kırılıp elenmesi için 184 no'lu üniteye bulunan eleklerle kapalı devre çalışan 3 adet çekiçli kırıcı bunkerlerine alınır. 0-3 mm aralığına kırılıp elenmesi ise; ebat dağılımının düzgün olması içindir. Aksi takdirde bu flukslar kısmen kalsine olacak ve kireç (CaOCO₃) ile Mağnezyumoksit (MgO) sinter harmanının diğer gang mineralleriyle birleşemeyecektir. Böylece Fluks sinter tozuna daha fazla geçecek ve sinter bağ yapıları zayıf olacaktır. Bunun sonucu olarak da sinter tozunda artışa sebep olacaktır. Eğer Fluks gereğinden fazla ince ise sinter makinesini geçirgenliğini bozacak ve yatak içerisinden emiş ile elektrofiltreden geçecektir. İsdemir'de ise hedef değer olarak Fluks malzemelerde +3mm ebadı %12'yi geçmemesi istenir. Elenen kireçtaşı, dolomit ve dunit tozları dozajlama ünitesi bunkerlerine stok edilir.

Yakıt olarak kullanılmakta olan kok tozu, kok bataryalarından ve stoktaki kok tozundan sağlanır. Bunlar 184 no'lu üniteye bulunan 6 adet merdaneli kok kırıcı bunkerlerine taşınır. Bu kısımda 16 ton/saat kapasiteli 6 adet kırıcıdan geçilerek 0-3 mm ebatlarına düşürülür. Sinter tozu harmana katılmış olarak sinter eleme ünitesinden gelir. Ayrıca Yüksek Fırınlarda elenen sinter tozları da aynı şekilde dozajlama ünitesindeki bunkerlere stok edilir. K ve L hatlarının her birinden maksimum 900 ton/saat harman karışımı almak mümkündür. Sinterlik harman 900 t/saat kapasiteli 2 adet primer mikserde karıştırılarak Sinter 1 ve Sinter 2'e gönderilmektedir.

1.2. Sinterleme Tesisleri

1.Sinter Fabrikası (176) Sinter bölümü 176 no'lu sinter ünitesi, 177 no'lu sinter soğutma ve eleme ünitesi, 191 no'lu sinter yükleme ve analiz ünitesi, 200 Egzoster fan ünitesi ve 205 no'lu elektrofiltre ünitesinden meydana gelmektedir. Sinterleme bölümündeki makinaların çalışmalarını OP-4 kumanda odasından izlemek mümkündür. Harman malzemeleri dozajlama ünitesinden tartılarak toplama konveyörüne alınır ve 3,2x8 m. lik mikserden geçirilerek karıştırılır. Bu kısımda, mevsime ve harmanın rutubet durumuna göre su verme

işlemi uygulanır. Mikserden çıkan malzemeler konveyör bantlar vasıtası ile 176 no'lu sinter ünitesine taşınır. Sinter ünitesine gelen bu karışım A1 üzerinde bulunan triper arabalar vasıtasıyla sinter makinalarına dağıtılır. Triper arabaları ile bunker harmanının dağıtımı uzaktan kumandalı ve otomatik olarak gerçekleşir. Bunker seviyeleri ultrasonik seviye ölçme cihazları ile kontrol edilir ve buradan triper arabalara kumanda verilir. Sinter bölümünden aynı özelliklere sahip 4 adet sinter makinası mevcuttur. Bir sinter makinası şunlardan meydana gelir. Harman Bunkeri: 90 m³ kapasiteli 2 adet bunkerden meydana gelir.

Kantarlı Bant Besleyicileri: Harman malzemesi bunkerlerden bant besleyiciler vasıtası ile alınır. Her besleyici 230 ton/saat malzeme verecek kapasitededir.

II. Kademe Mikser: 3 kademe hıza sahip olan mikserde harman malzemesinin nemlendirmek için su püskürtülür. 0-8 mm arasında değişen toz parçaları yuvarlanma sırasında birbirine yapışarak topaklanır (peletlenir), böylece sinter makinasında hava geçişini kolaylaştırır. Mikseri terk eden malzeme hareketli bir konveyör vasıtası ile sinter makinası üzerinde bulunan yaklaşık 15m³ hacmindeki bir bunkere alınır. Bu bunkerde doluluk seviyesi ultrasonik seviye ölçme cihazıyla kontrol edilir. Malzeme bu bunkerden tamburlu besleyici vasıtasıyla alınır.

Yatak Malzeme Bunkeri: Mikser yanında bir adet yatak malzemesi bunkeri bulunur, yatak malzemesinin makinalara dağıtımı triper araba ile otomatik olarak yapılır. Seviye göstergeleri ile doluluk durumu takip edilen yatak bunkerleri malzeme alamaz hale gelince otomatik yatak bantları durur ve fazla olan 8–13 mm arası malzeme Yüksek fırınlara gönderilir.

Sinter Makinası: Sinter makinası raylar üzerinde yürüyen, üzeri ızgaralı, 2,5 m genişlik, 1 m uzunluğunda birbirinden bağımsız 80 adet paletten oluşur. Sinter makinası başlangıcında refrakter malzemedan yapılmış ve tek sıra halinde toplam 24 adet brülörü olan içinde kok gazı yakılan bir ocak mevcuttur. Yakılan gaz debisi yaklaşık 500 m³/h, hava debisi ise 1750 m³/h dir. Gaz, hava ve sıcaklık otomasyon cihazları ile kontrol edilir. Sinter harmanı paletler üzerindeki 30–40 mm kalınlıktaki yatak malzemesi üzerine yaklaşık 350–400 mm kalınlıkta otomatik olarak serilir. Sinterleme işi harmanın ocaktan geçerken kok gaz tarafından tutuşturulması ile başlar. Ocak sıcaklığı 1100–1200°C ye kadar yükselebilir. Bu yüksek sıcaklık sayesinde gözenekli bir yapı elde edilir. Harman üst tabakalarında başlayan yanma, kırıcı rampasında tabana kadar inmiş olur. Sinter makinası hızı doğru ayarlanınca, kırıcı rampasına dökülen sinter külçesi bütün palet eni ve kalınlığı boyunca aynı seviyede sinterleşmiş olur. Sinterleme sırasında hava emişinin çok önemi vardır. Sinter paletlerinin altından 15 adet hava emiş kasasından 2 MW gücünde bir fan tarafından emiş yapılır. Fan yanında 1000–1100 mm.SS değerinde olan bu emiş, emiş kasalarında 700–800 mm.SS'na kadar düşer.

Sinter Kırıcısı ve Soğutucu Makinası: Makinayı terk eden sinter külçeleri soğutucuya gitmeden önce 100–150 mm'ye mahmuzlu kırıcılar vasıtası ile kırılır. Sinter makinasının dönüşünde dökülen malzemeler sıyırma tertibatı yardımıyla kırıcı altındaki şuta gönderilir. Mamul sinterin kauçuk bantlarda taşınmasını sağlamak için sinter, düz bant tipi bir soğutucuda soğutulur. Soğutma işi alttan verilen basınçlı hava ile yapılır. Soğutucu paletleri üzerine sıcak sinter 500–700 mm yüksekliğinden bir tabaka halinde beslenir, 8 adet soğutucu fanlar alttan hava üfler. Soğutucunun hızı, mamul sinterin 100–150°C sıcaklığa düşmesini sağlayacak şekilde gözle ayarlanır.

Sinterin Elenmesi: Soğutucudan çıkan sinter perde delik açıklığı 17–23 mm olan eleklerden elenir. Eleklerden alınan 17–23 mm'nin üzerindeki malzeme doğrudan konveyör bantlar vasıtasıyla yüksek fırınlara gönderilir. Elek altına geçen 17 mm den küçük parçalar iki katlı elek yardımıyla 7 ve 12 mm'ye elenir. 12–17 mm arası malzeme yatak malzemesi olarak kullanılır. 7–12 mm arası malzeme yüksek fırınlara gönderilmektedir. Her biri 4 Sinter Makinesi üretimini eleyebilecek kapasitede 2 Adet yatak malzemesi eleği mevcuttur.

Sinter tesisleri teknik özellikleri şu şekildedir;

Mikser

- Kapasite : 800 ton/saat
- Nem : % 8
- Mikser boyu : 18 m
- Mikser çapı (iç) : 4,4 m
- Dönüş hızı : 6,5 d/d
- Doluluk oranı : % 13

Sinter Tesisi

- Emiş alanı : 300 m²
- Sinterleme boyu : 75m
- Palet sayısı : 128 ad.
- Palet eni : 1,5 m
- Palet boyu : 4,0m
- Malzeme yüksekliği : 0,63m
- Makine hızı : 1,5 – 4,5m/dak
- Ana emiş fanı : 2 X 15000 m³/dak.
- Ana emiş fanı gücü : 2X5200 Kw
- Ana emiş basıncı : 1550mmSS
- Tesis kapasitesi : 3.200.000 ton/yıl
- Sinter baziklik değeri : 1,7-2,1
- Thumblar index : asagari %81
- Yakıt türü : kok gazı
- Enerji sarfiyatı (kok gazı) : <15.000 kcal/ton
- Soğutucu çıkışındaki sinter sıcaklığı : <100 °C
- Filtrelenmiş atık gazdaki toz miktarı: <50mgr/Nm
- Kok gazı : 43.200 m³/gün
- Elektrik kurulu gücü :1 X 25 MVA
- Sinter elek analizi
- -5 Malzeme oranı maksimum : Maksimum % 5
- +50 malzeme oranı maksimum : Maksimum % 10

Dairesel soğutucu

- Soğutucu tipi : + Basıncılı, Cebri hava soğutmalı dairesele
- Toplam alan : 418 m²
- Etkif alan : 360 m²
- Ortalama çap : 38 m
- Palet genişliği : 3,5 m
- Palet yan duvar yüksekliği : 1,5 m

- Palet sayısı : 72 adet
- Malzemenin soğutma süresi : ~ 80 dak.
- Malzemenin soğutucuya giriş sıcaklığı : 700 – 850 C°
- Malzemenin soğutucudan çıkış sıcaklığı : Maksimum 120 C°
- Soğutucu havası çıkış sıcaklığı : 200 ~ 350 °C
- Üfleyici sayısı : 5 adet
- Üfleyici debisi : 8066 m²/dak
- Basınç : 3648 Pa

Soğuk elekler

- Elek sayısı : 3 adet (2 hat)
- Elek boyutları : 1.Elek 9 x 3 m
: 2.Elek 9 x 3 m
: 3.Elek 7,5 x 3 m
- Elek açıklığı : 1.Elek 5 mm
: 2.Elek 10mm
: 3.Elek 20mm
- Elek kapasitesi : 1.Elek 750 t/h
: 2.Elek 565 t/h
: 3.Elek 440 t/h

2.Sinter fabrikasında 3 katlı sıralı elek bulunmaktadır. 5 mm göz açıklığına sahip birinci elekten çıkan –5mm boyutlu sinter tozu iç sinter tozu olarak tekrar Dozajlama ünitesine geri dönmektedir. 10–20 mm boyutundaki yaklaşık 1000–1500 ton sinter yatak malzemesi olarak sinter makinasına alınmaktadır, + 5 mm boyutundaki sinter ise Yüksek Fırınlara şarj malzemesi olarak gönderilmektedir.

Elektrofiltreler (ESP)

Sinter'e ait 5 ayrı bölgede ESP bulunmaktadır. Bunlar sırası ile Ana ESP: 2.Sinter Fabrikasında bulunan 300 m² 'lik sinter makinası için 2 adet ESP bulunmaktadır. Sinter makinasını altından emilen yanmış gazların içerisinde bulunan metalik tozları tutmaktadır.. A ve B grup olmak üzere 2 ESP bulunmaktadır, her bir ESP 4 hücrelidir.

- 1) İkincil Toz Toplama (Discharge ESP): İkincil toz toplama sistemi, 2.Sinter fabrikasının kırıcı bölgesi, dairesel soğutucu ve konveyörlerinden çıkan tozları toplamaktadır. A ve B grup olmak üzere 2 ESP bulunmaktadır, her bir ESP 4 hücrelidir.
- 2) Elek Toz Toplama (Sizing ESP) : 2.Sinter fabrikasının eleme noktalarından çıkan tozları tutmaktadır, tek grup EsP bulunmaktadır ve 4 hücrelidir.
- 3) Ana ESP(1.Sinter fabrikası) : 1.Sinter fabrikasına ait 4 adet Ana ESP bulunmaktadır. 1.Sinter fabrikasında bulunan 4 makine için ayrı bir ESP mevcuttur.
- 4) Bu ESP'ler sinter makinasının altından emilen gazların içerisindeki metalik tozları tutmaktadır. Her bir ESP 4 hücrelidir.
- 5) 205 Elektrofiltre: 1.Sinter fabrikasının kırıcı bölgesi, düz soğutucu, soğuk elek ve yatak elekleri bölgelerinde ortaya çıkan tozları tutmaktadır. 4 adet ESP bulunmaktadır.

Çamur hazırlama ve kurutma ünitesi şu bölümlerden oluşmaktadır.

- 1-Genel dağıtım kamaraları, çökeltme havuzları, radyal koyultucular, poliakrilamid bölümü ile pompa istasyonları.
- 2-Filtre, kurutma ve gaz temizleme bölümünden oluşan susuzlaştırma ünitesi.
- 3-Şarj bunkerleri ve boru hatları.
- 4-Konveyör bantlardan oluşan ünitesi.

Çamur hazırlama bölümü, normal olarak çalıştığı zaman, % 50 demir tenörlü çamurlu sudan yaklaşık olarak 23,3 ton/saat veya 200.000 ton/yıl üretim yapacak şekilde planlanmıştır. Çelikhane çamuru susuzlaştırma tesisinde ise çelikhane gaz temizleme sisteminden gelen yüksek çinkolu çamurun diğer atıklara karıştırmadan ve mevcut çökelticilerden geçirilmeden susuzlaştırılması, kurutulması sonrasında toz, kireç, melas ile karıştırılarak briket yapılması planlanmıştır. Çelikhane çamuru susuzlaştırma ve kurutma tesisi genel olarak:

- Çelikhanedan gelen çamurun çöktüldüğü koyultucu havuz,
- Havuzdan alınan çamurun belli oranda susuzlaştırıldığı 2 adet santrifüj dekantör,
- Dekantör çıkışı çamurun kurutulduğu akışkan yataklı kurutucu,
- Kurutulan malzemelerin preslenip küçük boyutlara getirildiği briketleme presi,
- Yukarıda belirtilen ekipmanlar arası malzeme taşıma sistemleri, doğal gaz ve kok gazı yakıt sistemi, sarf kimyasal malzeme depo ve dozajlama sistemleri, elektrik ve otomasyon sistemlerinden oluşmaktadır.

Kok tozu ve ilave malzemelerle ergitilen toz cevher belirli bir tane büyüklüğüne getirilir ve böylelikle sinterleme işlemi gerçekleşir ve bu işlem demir-çelik üretiminin önemli adımlarından biridir (Kaya, 2018). Yüksek fırının en büyük girdi malzemesi olan sinter malzemesi üretiminde amaç, toz cevheri yüksek fırında kullanım için uygun duruma getirmektir (Beşkardeş, Özdemir ve Yıldırım, 2018). Yüksek fırında sinter kullanımının sıvı ham demir maliyetine doğrudan etkisi mevcuttur. Yüksek fırın verimini önemli ölçüde etkileyen sinter malzemesinin maliyetini istenen seviyede tutmak için sinter tesisini verimli çalıştırmak gerekir.

Sinter tesislerinin temel amacı azami sinter üretimini asgari maliyetle yapmaktır. Bunun için sinter girdileri olan toz cevher, kireçtaşı ve dolomit ve yakıt olarak kullanılan kok tozunun doğru oranlanması gerekir. Kok tozunun doğru oranda kullanılmaması sinter makinesindeki ısı dengesi olumsuz etkiler ve bu durumda istenen kalitede ürün elde edilemez. Akıllı kontrol sistemlerinin kullanılmadığı, operatörlerce idare edilen tesislerde, değişen cevher cinsi, kok tozu kalori değeri, geri dönen sinter tozu ve kireçtaşı oranı parametrelerine göre kok tozu miktarı ayarlanmadığı için kok tozu maliyeti istenen seviyeden yüksek olur. Bunun için verimliliği esas alan birçok işletme, sinter üretimini Seviye 2 Otomasyon Sistemi adı verilen akıllı kontrol sistemleri ile yönetmektedir (Kaya, 2018). İskenderun Demir ve Çelik A.Ş. sinter tesisleri de bunlardan biridir. Yüksek fırınların kullanımına uygun kalitede sinter ürününü en uygun maliyetle üretmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. J.Xiang ve arkadaşları bulanık kontrol uygulamaları ile sinter makinesi ısı kontrolü ve makineye malzeme sağlayan bunker kontrolü üzerine çalışarak sinter makinesi verimini %10 oranında artırmışlardır (Kaya, 2018; Beşkardeş, Türkoğlu ve Acı, 2016). Gonzalez ve arkadaşları Sugeno bulanık sonuç çıkarma sistemi ile istenen RDI (indirgenme parçalanma indeksi) ve Thumber indeksine uygun olacak şekilde girdi malzeme oranlarını ayarlayarak sinter maliyetini ton başına 0,15 € düşürmüşlerdir (Kaya, 2018; Beşkardeş vd., 2018; Beşkardeş vd., 2016; İsdemir, 2022).Kronberger ve arkadaşları ise sinter teknolojileri konusunda yaptıkları detaylı çalışmalar içinde, hedef sinter bazıklığı ve demir tenörüne göre kok tozu oranını hesaplayan bir model üzerinde durmuşlardır (Kaya, 2018; Beşkardeş vd., 2018; Beşkardeş vd., 2016; İsdemir, 2022).

Bu çalışmada ülkemiz ana sanayisinde önemli bir yeri bulunan sıvı ham demirden çelik üretiminde üretim aşamalarında önemli bir etken olan sinterleşmenin sağlanabilmesi için kurulan Sinter tesislerinde enerjinin verimliliği ve enerjinin verimli kullanılması kapsamında yapılan çalışmalar irdelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, İskenderun Demir ve Çelik A.Ş. (İSDEMİR) sinter tesislerinin ürün maliyetini azaltmak için hammadde girdileri ve üretim parametrelerine bağlı olarak kok oranı ayarlama işlemi, doğrusal regresyon ve destek vektör makineleri ile ayrı ayrı modellenmiştir.

Kok tozu, yeterli irilikte olmadığı için yüksek fırınlarda yakıt olarak kullanılamayan ve ancak sinter tesislerinde değerlendirilebilen bir malzemedir. Sinter makinesindeki gaz geçirgenliğini kötü etkilememesi için (0-3) mm aralığında olması istenir. Sinter makinesi üzerine serilen karışım malzeme, aradaki kok tozlarının yanması ile ergitilir ve sinterleşmiş ürün olarak makineyi terk eder. Kok tozunun tüm karışıma oranı % 3,5 ile % 4 arasındadır. Yılda milyon ton mertebelerinde üretim yapılan bir tesiste yapılacak olan en küçük kok oranı iyileştirmesi, önemli verim artışı sağlayacaktır. Ayrıca kok tozu oranının istenen seviyede ayarlanabilmesi, sinter makinesindeki ısı dengeyi doğrudan etkileyeceğinden üzerinde dikkatle durulması gereken bir konudur. Kok tozu oranını tahmin için değerlendirilecek verilere sinter ürünü kalitesi ve maliyeti için çok önemli olan kok tozu oranı gibi birçok parametre de dahil edilmeli ve tüm bunlar bir arada değerlendirilmelidir. Kok tozu oranını tahmin etmek için, sinter işletme deneyimleri ve temel sinter üretim prensipleri ışığında Tablo 1'de verilen parametreler üzerinde çalışılmıştır. Kok tozu tahmini için değerlendirmeye alınan parametreler dozajlama sisteminden, laboratuvar analizlerinden ve sinter üretim verilerinden alınmıştır. Modelin çıkış parametresi olan kok tozu oranı, kok tozunun cevhere (tüm karışıma değil) oranıdır. Sinter tozu oranı sinter makinesinde üretilen fakat istenen tane büyüklüğünde olmadığı için tekrar makineye verilen sinter tozunun cevhere oranıdır. Kireçtaşı oranı sinter bazikliği istenen seviyede tutmak için harmana katılan kireçtaşının cevhere oranıdır. Kalori değeri özel kok laboratuvarında çalışılan ve kokun enerjisini gösteren analiz sonucudur. FeO, sinterleme sırasında meydana gelen tepkimelerden sonra indirgenen demir oksit oranıdır. Değerini sinterleşmiş ürünün içindeki wüstit adı verilen yapının tüm malzemeye oranından alır. T16-T20 sıcaklıkları sinter makinesinin altında bulunan emiş kamaralarına ait sıcaklıklardır. İsdemir sinter makinesinde 20 adet emiş kamarası vardır ve son beş kamaraya ait sıcaklıklar değerlendirmeye alınmıştır. BRP (Burn rising point – Sıcaklık yükselme noktası) noktası sinter makinesi üzerinde ani sıcaklık artışının olduğu yerdir. BTP (Burn through point – Sıcaklık kararlılık noktası) noktası ise sinterleşmenin bittiği ve malzeme sıcaklığının en yüksek olduğu makinenin sonuna yakın bir noktadır. BRP ve BTP noktaları, makine üzerindeki termal dengeyi gösteren önemli teknik parametrelerdir ve İsdemir sinter makinesi için değerleri, Beşkardeş ve arkadaşlarının önerdiği yöntemle göre hesaplanmaktadır (Kaya, 2018; Beşkardeş vd., 2018; Beşkardeş vd., 2016). Ateşleme sıcaklığı malzemenin makineye serildikten sonra yukarıdan tutuşturulduğu fırının sıcaklığıdır.

Uzman bir operatörden, sıcaklık bilgilerini iyi izleyip, analiz değerlerini dikkate alarak geri dönen sinter tozu ve kireçtaşı oranına göre kok tozu oranını doğru bir şekilde ataması beklenir. Bu çalışmanın amacı eldeki verilerle kok tozu oranını doğru bir şekilde modelleyip, değişen işletme parametrelerine bağlı olarak atanması gereken kok tozu oranını hesaplayabilmektir. Böylece sinter tesisinin yakıt yönetimi her vardiya değişen kişilere özgü kararlardan kurtularak çok daha kararlı bir şekilde yapılacaktır.

Enerji Sarfıyatı	Sinter Makineleri	Enerji Türü	Miktar					
		Kok Tozu	Kg/TÜ	46,9090861	45,67281101	45,03086469	46,30711815	
		Kok Gazı	Nm3/TÜ	3,67	3,67	3,64	3,58	
		Elektrik	kWh/TÜ	39,873	42,371	41,784	39,462	
		10b. Buhar	Kg/TÜ	0,00	0,00	0,00	0,91	
		Servis Suyu	Nm3/TÜ	0,01	0,01	0,01	0,01	
		Top. Tüketim	Mcal/TÜ	421,82	354,62	385,73	381,44	
	Sinter Maniplasyon	Y.F. Gazı	Nm3/TÜ	0	0	0	0	
		Kok Gazı	Nm3/TÜ	0,00	0,00	0,00	0,00	
		Elektrik	kWh/TÜ	2,956	3,437	3,344	2,961	
		10b. Buhar	Kg/TÜ	0,00	0,00	0,00	0,00	
		Oksijen	Nm3/TÜ	0,00	0,00	0,00	0,00	
		Azot	Nm3/TÜ	0,03	0,03	0,03	0,03	
		Servis Suyu	m3/TÜ	1,58	2,06	2,04	1,80	
		Benzin	ml/TÜ	0,00	0,00	0,03	0,04	
		Motorin	ml/TÜ	59,57	62,78	60,49	47,20	
		Top. Tüketim	Mcal/TÜ	4,50	4,53	4,85	4,08	

Tablo 1. Sinter tesisleri ortalama günlük enerji girdileri

2.1. Gerekli Verilerin Eldesi ve Kullanımı

Bu çalışma dahilindeki veriler İsdemir sinter tesisinde çalışan ve “Seviye 2” adı verilen otomasyon sisteminden alınmıştır. Kalori analizi haftada bir defa İsdemir kok laboratuvarında çalışılan kok tozu enerji değeridir. FeO analizi İsdemir genel kimya laboratuvarında günlük olarak çalışılan analiz bilgisidir. Kok tozu, sinter tozu ve kireçtaşı adlı şarj bilgileri, dozajlama ünitesinden malzemelerin kullanım oranlarının alındığı ve Seviye 2 sistemi tarafından 5 dakikalık aralıklarla veri tabanına kaydedilen oran bilgileridir. Emiş kamaraları ve fırın sıcaklık bilgileri ise, her saniye programlanabilir mantıksal denetleyici (Programmable Logic Controller - PLC) sistemlerinden okunan verilerin beş dakikada bir veri tabanına kaydedilmesi ile oluşan üretim verileri olmaktadır. BRP ve BTP noktaları Beşkardeş ve arkadaşlarının son beş kamara sıcaklık verilerinden hesapladığı ikili nokta bilgileridir (Kaya, 2018; Beşkardeş vd., 2018; Beşkardeş vd., 2016; İsdemir, 2022). Bu çalışmada 08.12.2014 ile 20.07.2016 tarihleri arasında toplanan analiz, şarj ve üretim verileri kullanılmıştır. Oluşturulan veri kümesinde, şarj ve üretim verilerinin, periyodu en yüksek parametre olan kalori analizinin zaman aralığındaki ortalamaları kullanılmıştır. Yani haftada bir değer alınan kalori analizi için günlük değer alınan FeO değerinin ve 5 dakikalık değerleri olan şarj ve üretim bilgilerinin haftalık ortalamaları değerlendirilmeye alınmıştır. Giriş parametrelerinin periyotları bu şekilde ayarlandıktan sonra sinter tesisinin duruş yaptığı zamanlara ait hatalı ya da anlam ifade etmeyen veriler filtrelendikten sonra 70 adetlik veri elde edilmiş ve bu verilerden 70*14 lük bir veri kümesi oluşturulmuştur. İlk bakışta örnek veri sayısı az gibi görünse de işletme tecrübeleri ışığında doğru bir yöntemle elde edilen veri seti kok oranını modellemeye yetmiştir. Veriler üzerinde yapılan son işlem en iyi alt küme seçimi işlemidir. Kok tozu oranını en iyi şekilde modelleyebilmek için işletme tecrübeleri ışığında sonuca etki edebilecek tüm bağımsız değişkenler değerlendirmeye alınmıştır. Diğer yandan bağımsız değişken sayısının artması tahmin edilen sonucun değişkenliğini artıracak ve fazla veri toplama ve işlemeyi gerektireceği için en iyi alt küme seçimi işlemi yapılmıştır. Tablo 1’de görülen parametreler Minitab uygulaması ile en iyi alt küme seçimi algoritmasına tabi tutulmuş ve çoklu belirleyicilik katsayısı (R2), düzeltilmiş çoklu belirleyicilik katsayısı (R2(adj)), hata kareler ortalaması ve Mallows’un Cp istatistiği ölçütlerine göre en iyi bağımsız değişken alt kümesi seçilmiştir. Buna göre en iyi bağımsız değişkenler ile 70*9 luk bir veri kümesi kullanılacaktır. Tablo 2’de seçilen bağımsız değişkenler ve hesaplanacak olan bağımlı değişkene ait çalışılan zaman aralığındaki istatistik bilgileri verilmiştir.

Kaynak	Parametre	Tanım	En iyi alt küme
Şarj	Kok tozu [%]	Ayarlanmak istenen kok tozu oranı	✓
	Sinter tozu [%]	Geri dönen sinter tozu oranı	✓
	Kireçtaşı [%]	Kireçtaşı oranı	✓
Analiz	Kalori [cal]	Kok tozu kalori değeri	✓
	FeO [%]	Sinterleşmiş ürünün FeO oranı	✓
Üretim	T16 [°C]	16. hava emiş kamarası sıcaklığı	✓
	T17 [°C]	17. hava emiş kamarası sıcaklığı	✓
	T18 [°C]	18. hava emiş kamarası sıcaklığı	☒
	T19 [°C]	19. hava emiş kamarası sıcaklığı	☒
	T20 [°C]	20. hava emiş kamarası sıcaklığı	✓
	BRPx [-]	Sıcaklık sıçrama noktası konumu	✓
	BRPy [°C]	Sıcaklık sıçrama noktası sıcaklığı	☒
	BTPx [-]	Sıcaklık kararlılık noktası konumu	☒
	BTPy [°C]	Sıcaklık kararlılık noktası sıcaklığı	✓
	Ateşleme Sic. [°C]	Malzemenin tutuşturulduğu fırın sıcaklığı	☒

Tablo 2. Kok tozu tahmini parametreleri

2.1.1. Çoklu Doğrusal Regresyon

Bu çalışmada kok tozu oranı, çoklu doğrusal regresyon ve destek vektör makineleri ile ayrı ayrı modellenmiştir. Çoklu regresyon tabiri, bir bağımlı değişkendeki değişimi birden fazla bağımsız değişken ile açıklamak için kullanılır. Bağımlı değişken ve bağımsız değişkenlerin arasında doğrusal bir ilişki tanımlanabiliyorsa, geliştirilen model çoklu doğrusal regresyon adını alır ve aradaki ilişki,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (1)$$

Denklem 1 ile gösterilir. Burada y bağımlı değişken ya da yanıt değişkeni, x1 ve x2 bağımsız değişkenler, β_0 , β_1 ve β_2 regresyon katsayıları ve ε hata terimidir. Bir regresyon modelinde amaç, tahmin edilen değeri gerçek değere olabildiğince yaklaştırmaktır.

Doğrusal regresyonun çok hızlı sonuç vermesi ve işletme pratiklerinin kolayca denenebilmesi bu modeli tercih sebebi yapmıştır.

2.1.2. Destek Vektör Makineleri

Oldukça tercih edilen destek vektör makineleri, çok sayıda bağımsız değişkenle çalışabilmekte, çok az giriş ile öğrenebilmekte, doğrusal olarak ayrılabilen ya da ayrılamayan verilere uygulanıp yüksek doğrulukta sonuçlar verebilmektedir. Hedef olarak bu yöntem ile yapılan regresyonda en düşük genelleştirme hatasına sahip fonksiyonu bulmak esastır (Kaya, 2018; Beşkardeş vd., 2018; Beşkardeş vd., 2016; İsdemir, 2022). Destek vektör makineleri ile regresyonun genel ifadesi aşağıdaki gibi Denklem 2 ile ifade edilir.

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x) + b \quad (2)$$

Burada α_i, α_i^* ve b Lagrange katsayılarıdır ve regresyon risk fonksiyonunu minimum yapacak şekilde hesaplanır. $k(x_i, x)$ ise çekirdek fonksiyonudur. Bu çalışmada çekirdek fonksiyon için yakınlık tipi parametresi polinomsal, yakınlık parametresi ise 1 seçilmiştir.

3. SONUÇLAR VE YORUM

Kok tozu oranı tahmininde önemli bir parametre olan kok kalori analizinin haftada bir yapılmasından dolayı sınırlı sayıda veri ile çalışılmıştır. Hesaplanıp bulunan sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir. Gerçek kok tozu oranı ve iki yöntem tarafından tahmin edilen kok tozu oranı ile iki yöntemin (yüzde) hata oranı değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$KI = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

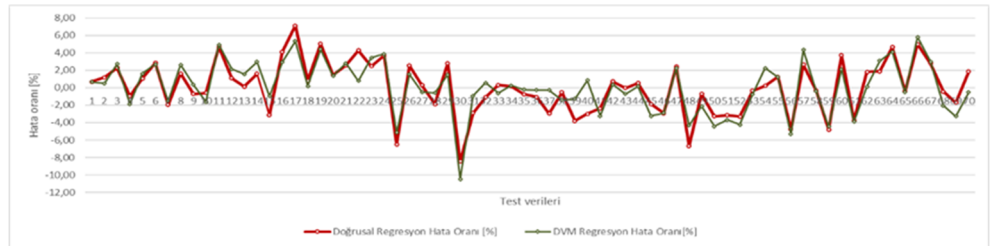
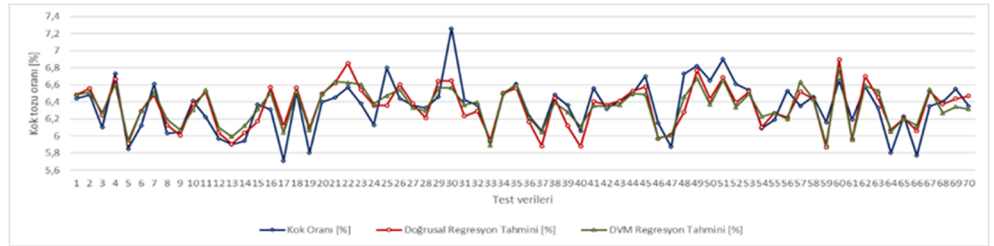
$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (4)$$

$$OHKK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

Bu denklemlerde, x_i hesaplanan, y_i gerçek değeri temsil etmektedir. \bar{x} ve \bar{y} değerlerin ortalamaları, n ise veri sayısı olmaktadır. Çalışılan yöntemlerin başarı göstergeleri ise Tablo 4 ile verilmiştir.

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama	S. Sapma
Kok tozu [%]	5,71	7,26	6,34	0,296
Sinter tozu [%]	17,32	46,26	33,32	8,005
Kireçtaşı [%]	8,56	15,57	11,83	1,533
Kalori [cal]	6472	6885	6685,9	95,2
FeO [%]	6,1	8,87	7,39	0,782
T16 [°C]	151,06	221,8	189,1	15,12
T17 [°C]	182,85	308,34	238,06	21,535
T20 [°C]	238,22	381,32	320,59	29,303
BRPx [-]	16,05	17,95	16,99	0,452
BTPy [°C]	315,7	421,2	371,9	25,61

Tablo 3. Parametrelere ait istatistik bilgileri



Şekil 2. Gerçek kok tozu oranı ve iki yöntem tarafından tahmin edilen kok tozu oranı ile iki yöntemin (yüzde) hata oranı değerleri

Başarı Ölçütleri	Çoklu Doğrusal Regresyon	Destek Vektör Makineleri
Korelasyon İlişkisi	0,763	0,773
Ortalama Mutlak Hata	0,150	0,144
Ortalama Hata Karelerinin Karekökü	0,192	0,187

Tablo 4. Çalışılan yöntemlerin başarı göstergeleri

Sinter tesisinde kok tozu oranının olması gereken seviyede tutabilmek üretimdeki ısı dengeyi yakalamak ve üretim maliyetlerini düşürmek bakımından çok önemlidir. Bu çalışmada tesisin ısı denge durumunu gösteren sıcaklık bilgileri, yakıt olarak kullanılan kok tozunun analiz değerleri ile geri dönen sinter tozu ve kireçtaşı oranlarına bakılarak atanacak olan kok tozu oranı, iki farklı yöntemle hesaplanmıştır. Sinter işletme tecrübesi ve temel sinter üretim prensiplerine göre seçilen parametreler en iyi alt küme seçimi yapılarak sadeleştirilmiş, çoklu doğrusal regresyon ve destek vektör makineleri ile kok tozu oranı tahmin edilmiştir. Sınırlı sayıda veri olmasına rağmen her iki yöntemde de % 77 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Veri sayısının artması ile daha yüksek sonuçlara ulaşılması beklenmektedir (Tamsöz ve Elmas, 2021).

Konu ile ilgili devam eden çalışmamız, geçmiş verilerle eğitilen modelin ürettiği sonucun otomatik olarak sinter dozajlama sistemine gönderilmesi üzerinedir. İsdemir sinter

tesislerinde iki yıldır kullanılmakta olan uzman sistem uygulamalarına adapte edilecek olan bu model ile güncel işletme şartlarına göre kullanılması gereken kok tozu oranı hesaplanıp otomatik olarak atanacaktır (Tamsöz ve Elmas, 2021).

Enerjiyi Verimli Kullanma ile ilgili sonuçlar aşağıdaki gibi belirtilmektedir:

- Toplam enerjiyi etkin kullanmak suretiyle enerji sarfiyatını azaltmak, böylelikle enerji maliyetleri azaltmak,
- Enerji tüketim noktaları arasında iyi bir iletişim ağı temin etmek,
- Etkin izleme, raporlama ve yönetim stratejileri ile enerji kullanım yöntemleri için gelişmeler sağlamak.
- Enerji konusunda AR-GE çalışmaları yaparak enerji yatırımlarının geri dönüş süreçlerini takip etmek ve sürekli iyileştirme yöntemleri oluşturmak.
- Enerji yönetim programının tüm kullanıcılar ile entegrasyonunu sağlamak.
- Enerji sağlamadaki kısıtlama ve kesintileri azaltmak.
- Petrol ve kömür gibi fosil yakıtların hızla tükendiğini ortaya koymak.
- Sera gazları ve diğer emisyonların enerji üretim ve tüketim süreçlerinde ortaya çıktığını ve bu hususların küresel ısınma ve iklim değişikliğine yol açtığını ortaya koymak.
- Enerji sağlamada yerli kaynaklara önem ve öncelik vermek.
- Enerjiyi etkin kullanmak ve bu suretle enerji tüketiminde azalma sağlamak, dolayısıyla maliyetlerin dengelenmesi sürecini geliştirmek.
- Ülkemizde toplam enerji tüketiminin % 41'i endüstriyel tesislerde, % 31'i binalarda ve % 20'si taşımacılıkta gerçekleşmektedir.
- Ülkemizdeki endüstriyel tesislerde yıllık 3,7 milyon TEP (ton eşdeğer petrol) eşdeğeri bir enerji tüketimi vardır. Yapılan bazı çalışmalar, ülkemiz sanayi tesislerinde kullanılan enerjinin %30'unun tasarruf edilebileceğini göstermektedir.
- En fazla enerji tüketen noktalar sanayi tesisleri olmaktadır. Bu sanayi tesislerinde hayata geçirilecek ve uygulanacak enerji verimliliği projeleri ve enerji tasarruf programları sayesinde yıllık tesis işletim maliyetlerinin önemli oranlarda düşürülmesinin mümkün olabileceği öngörülmektedir.
- Bir takım değişiklikler gözlenmek ile birlikte, tesisimizde enerjinin verimliliği sağlanacaktır.

Çalışmamız dahilinde ele alınan kendi tesisimizde enerji verimliliği sağlayacağımız başlıca kullanım noktaları ise aşağıdaki gibi olacaktır:

- Elektrik Motorları
- Sinter Fırınları
- Egzoster ve Üfleme Fanları
- Buhar, su, yakıt tankları
- Isı ve ses yalıtımları
- Buhar ve sıcak su iletim hatları

Bu çalışma ile İskenderun Demir Çelik A.Ş. (İSDEMİR) sinter tesislerinin en modern makinesi kabul edilen yeni sinter makinesinin hız tayininin operatör kontrolünden alınarak otomasyona dayanan kullanımını sağlayacak örüntü tanıma sistemi geliştirilmiştir. Hız tahmininin otomatik olarak yapılması sayesinde sinter makinesinin hız kontrolü için operatör müdahalesinin ortadan kaldırılması, insan ve mesai düzenlemesinden tamamen bağımsız olarak her daim aynı kararlılıkla makinenin sevk ve idare edilmesi ve böylelikle bu makinemin daha verimli çalışması sağlanabilecektir. Bu sayede tesis genelinde;

- Kok Tozu
- Kok Gazı
- Elektrik
- Buhar
- Servis Suyu
- Oksijen

tasarrufları sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Kaya, A. (2018). Sinter Tesislerinde Enerji Kullanım Noktaları ve Enerjiyi Verimli Kullanacak Yöntemlerin Belirlenmesi, Tezsiz Yüksek Lisans Bitirme Projesi, Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Anabilim Dalı, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun Teknik Üniversitesi.

Beşkardeş, A., Özdemir, M. ve Yıldırım, S., "Sinter Makinesinde Isıl Kontrolle Bağlı Hız Kontrolü", 23. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 2018

Beşkardeş, A., Türkoğlu, S. ve Acı, Ç., "Yüksek Fırında Sıcak Metaldeki Silisyum Oranı Tahmini", 24. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 2016

İsdemir (2022). A.Ş Endüstriyel Sinter Tesisi Örneği

Tamsöz, H., & Elmas, E. T. (2021). Çelik Üretiminde Elektrik Ark Ocaklarında Enerji Maliyetlerinin ve Enerji Verimlilik Faktörlerinin Araştırılması. FBU-DAE 2021 1 (3) : 163-180.