



KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Dergi Sahibi

Prof. Dr. Nuh Zafer CANTÜRK - (Kocaeli Üniversitesi)

Baş Editör

Prof. Dr. K. Süleyman YİĞİT - (Kocaeli Üniversitesi)

Editörler

Prof. Dr. Beyhan PEKEY - (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Esra CAN DOĞAN - (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Mihriban CİVAN - (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Recep Kaya GÖKTAŞ- (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Murat HOŞÖZ - (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. H. Hakan GÜREL - (Kocaeli Üniversitesi)

Prodüksiyon Editörü

Öğr. Gör. Yusuf YAĞCI - (Kocaeli Üniversitesi)

Editör Asistanları

Arş. Gör. Züleyha Kübra ÇAPIN - (Kocaeli Üniversitesi)

Dergi Sekreteri

Hüsnü TEMKİNER - (Kocaeli Üniversitesi)

Editörler Kurulu

Prof. Dr. A. Nilgün AKIN (Kimya Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali Bekir YILDIZ (Elektrik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN (Makine Mühendisliği) (Hitit Üniversitesi)

Prof. Dr. Bülent KAYPAK (Jeofizik Mühendisliği) (Ankara Üniversitesi)

Prof. Dr. Cenk SAYIN (Otomotiv Mühendisliği) (Marmara Üniversitesi)

Prof. Dr. Cihan KARAKUZU (Bilgisayar Bil. ve Müh.) (Bilecik Şeyh Edebali Üniv.)

Prof. Dr. Fatma GÜLTEKİN (Jeoloji Müh.) (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. Halim Aytekin ERGÜL (Biyoloji) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Mehmet ARIK (Özyeğin Üniversitesi – Makine Mühendisliği)

Prof. Dr. Müslüm ARICI (Makine Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Tahsin ENGIN (Makine Mühendisliği) (İstanbul Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ (Biyomedikal Mühendisliği) (Kocaeli Üniv.)

Prof. Dr. Zerrin ALADAĞ (Endüstri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Canan Dilek EREN (Fen Bilgisi Eğitimi) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Çağla AKGÜL (İnşaat Mühendisliği) (ODTÜ)

Doç. Dr. Emre KİSHALI (Mimarlık) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Halil YİĞİT (Bilişim Sistemleri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. İrem BAĞLAN (Matematik) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Kasım BAYNAL (Endüstri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Murat Selim ÇEPNİ (Harita Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN (Metalurji ve Malzeme Müh.) (Gebze Teknik Üniv.)

Doç. Dr. Osman GÜNAY (Biyomedikal Mühendisliği) (YTÜ)

Doç. Dr. Ş.Hakan ATAPEK (Metalurji ve Malzeme Müh.) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Ünal UYSAL (Makine Mühendisliği) (Sakarya Üniversitesi)

Doç. Dr. Ümit ÜNVER (Makine Mühendisliği) (Yalova Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Arzu ARI (Matematik Eğitimi) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Erkan AKPINAR (İnşaat Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Aytaç ÇINAR (İş Sağlığı ve Güvenliği) (Kocaeli Üniv.)

Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK (İnşaat Müh.) (Eskişehir Osmangazi Üniv.)

Danışma Kurulu

Prof. Dr. Adnan SÖZEN (Makine Mühendisliği) (Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN (Kimya Mühendisliği) (Atatürk Üniversitesi)

Prof. Dr. Bülent ORUÇ (Jeofizik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Elşen VELİ (Fizik) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR (Enerji Sistemleri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Güralp ÖZKOÇ (Kimya Mühendisliği) (İstinye Üniversitesi)

Prof. Dr. H. Metin ERTUNÇ (Mekatronik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. İlyas KANDEMİR (Makine Mühendisliği) (Gebze Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. M. Ufuk KASIM (Bahçe Bitkileri Yetiştirme ve Islahı) (Kocaeli Üniv.)

Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI (Otomotiv Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Nil Pembe ÖZER (Su Ürünleri) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. R.Taygun GÜRAY (Fizik) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Serdar KÜÇÜK (Biyomedikal Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK (Makine Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Sema YURDAKUL (Çevre Mühendisliği) (Süleyman Demirel Üniv.)

Doç. Dr. Vildan ÇETKİN (Matematik) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU (İnşaat Mühendisliği) (Erzurum Teknik Üniv.)

İletişim

Kocaeli Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü Umuttepe Yerleşkesi 41001, Kocaeli/TÜRKİYE
Tel: +090 (262) 303 30 32 Fax: +090 (262) 303 30 33 E-mail: koufbd@kocaeli.edu.tr



YAYIN VE DANIŞMA KURULLARI I

İÇİNDEKİLER II

Özcan GÜNDOĞDU, Halenur ÇELİK, Sevim ŞAHİN

Sekonder Progresif Multipl Sklerozun Tedavisinde Olası Biyomedikal Çözüm Önerileri 32-40
(*Derleme Makale*)

Ezgi GÜNEŞ GÜRDAL, Nazli ÇALIŞKAN GÜVEN

Kalsiyum Sülfonat Bazlı Kompleks Grese Katkı Maddeleri İlave Ederek
Performans Özelliklerinin İyileştirilmesi 41-49
(*Araştırma Makalesi*)

Emine AMAL, Kadir YILMAZ, Engin ÖZDEMİR

Rüzgar Enerji Santrallerinin Elektrik Şebekesine Etkilerinin İncelenmesi 50-65
(*Derleme Makale*)

Nihan ERCİOĞLU AKDOĞAN, Elif UBAY

Pişirime Uygun Duvar Karosu Üretiminde Şeker Sanayii Atıklarının Değerlendirilmesi 66-74
(*Araştırma Makalesi*)

Yağız AKYILDIZ, Bartu SİMSAR, Ümit KUTSAL, Yağız ARSLAN,




Adnan AKMAN, Atıf KARKINLI, Rıdvan YAMANOĞLU

Al-7Si-0.3Mg Alaşımının Isıl İşlem Prosesinin Calphad Metodolojisi ile
Modellenmesi ve Simülasyonu..... 75-79
(*Araştırma Makalesi*)



Sekonder Progresif Multipl Sklerozun Tedavisinde Olası Biyomedikal Çözüm Önerileri

Biomedical Solutions For The Treatment Of Secondary Progressive Multiple Sclerosis

Özcan GÜNDOĞDU^{1,*} , Halenur ÇELİK² , Sevim ŞAHİN³ 

¹ *Biyomedikal Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, Orcid: 0000-0003-0171-3179*

² *Biyomedikal Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, Orcid: 0000-0003-0849-6840*

³ *Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, Fenerbahçe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, Orcid: 0000-0002-0886-3762*

Derleme

Gönderilme Tarihi : 31/03/2021

Kabul Tarihi : 03/01/2022

Anahtar Kelimeler

*Bağışıklık Sistemi,
Miyelin Kılıf,
Multipl Skleroz,
Nanoparçacık,
Sinir Hücreleri*

Research Paper

Received Date : 31/03/2021

Accepted Date : 03/01/2022

Keywords

*Immune System,
Myelin Sheath,
Multiple Sclerosis,
Nanoparticle,
Nerve Cells*

Özet

Multipl Skleroz (MS), vücudun bağışıklık sistemi hücreleri tarafından beyindeki sinir hücrelerinin dış kısmında bulunan miyelin kılıfların zarar görmesi sonucu lezyon veya plak oluşmasına bağlı nörolojik bir hastalıktır. Bu makalenin amacı Sekonder Progresif MS (SPMS) için tıp ve biyomedikal mühendisliği alanında çözüm önerileri üretmek için yapılan çalışmaların anlatılmasıdır. Hastalığın tıp alanında çeşitli tedavi yöntemleri vardır. MS tedavisi kişiye özel olarak yapılmaktadır. Tıp alanında yapılan en temel tedavi yöntemi ilaç ile tedavidir. Son yapılan çalışmalar sonucunda nanoparçacıkların polimerik yapısının içerisine konulan miyelin antijenleri sayesinde bağışıklık sistemi hücrelerinin miyelinli hücrelere saldırmasını engelleyerek hastalığın yavaşlatılması sağlanmıştır. Zarar gören miyelin kılıfların onarımı ise kolesterolün düşürülmesinde kullanılan bir molekül sayesinde yapılmıştır. MS tam olarak nedeni bilinmeyen otoimmün ve nörolojik bir hastalıktır. Bu makale çalışmasında ise yapılmış olan deneysel çalışmalara göre üretilen tüm çözüm önerilerinin derlenmesi amaçlanmıştır.

Abstract

Multiple Sclerosis (MS) is a neurological disease due to the formation of lesions or plaques as a result of damage to myelin sheaths located on the outer part of nerve cells in the brain by the body's immune system cells. The aim of this article is to describe the studies conducted by producing solutions in the field of medical and biomedical engineering for Secondary Progressive MS (SPMS). There are several methods of treating the disease in the medical field. The treatment for MS is usually personal. The most basic method of treatment in the field of medicine is the treatment with medication. As a result of recent studies, myelin antigens placed in the polymeric structure of nanoparticles prevent immune system cells from attacking myelinated cells and slow down the disease progress. The repair of damaged myelin sheaths was realized thanks to a molecule used to reduce cholesterol. MS is an autoimmune and neurological disease whose exact cause is unknown. This paper reviews current literature and all the hypotheses produced from experimental studies.

1. Giriş

Beyin, yüzyıllardan beri insanlar tarafından sürekli olarak araştırılan, günümüzde halen gizemini koruyan, vücuttaki tüm yaşamsal olayların gerçekleşmesini, kontrol edilmesini sağlayan ve sinir hücrelerinden meydana gelen bir santraldir. Düşünebilmeyi, konuşabilmeyi ve herhangi

bir problem karşısında alternatif çözüm üretebilme becerisini, aynı zamanda vücutta meydana gelmesi istenen davranışların komutlar halinde sinir hücrelerinde algılanmasını sağlayan bir uyarı merkezidir. Latince cerebrum olarak adlandırılan, sağ ve sol olmak üzere totalde iki yarımküreden oluşan, kafatasının içerisinde yer alan, sinir hücrelerini içerisinde barındıran önemli bir organdır. Beyinde bulunan ve birçok mekanizmada esas olarak görev yapan sinir hücrelerine nöron denir. Bir nöron temelde hücre gövdesi, dendrit ve akson olmak üzere 3

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): o.gundogdu@kocaeli.edu.tr



farklı yapıdan meydana gelmektedir. Aksonun dış kısmında bulunan, nöronları koruyan aynı zamanda sinirsel iletimin hızını arttıran bu yapıya miyelin kılıf denir. Miyelin kılıf bir nöronun diğer bir nörona bilgi iletimi sırasında sinir hücrelerinin herhangi bir şekilde zarar görmesini engelleyerek yalıtım yapılmasını sağlar. Beyindeki sinir hücrelerinin, varlığını sürdürebilmesi için beslenebilmesi veya oksijen iletiminin sağlanması gerekir. Bu işlevleri yerine getiren diğer bir yapıya nöroglia hücreleri denir. Nöroglia hücreleri sayesinde nöronlar canlılığını korumuş olur. Beyin ve kas sistemi ile özellikle de sinir hücreleriyle ilgilenen tıp bilim dalına nöroloji denir. Sinir hücreleri ile santral sinir sistemi (SSS) organlarının yanlış bir şekilde çalışması sonucu çeşitli nörolojik hastalıklar meydana gelmektedir. Nöroloji ile vücutta zaman içerisinde meydana gelen nörolojik hastalıklar tespit edilerek gerekli olan tanı ve teşhisler konulmaktadır.

En önemli nörolojik hastalıklardan biri olan Multipl Skleroz (MS), beyinde bulunan sinir hücrelerinin dış kısmında yer alan miyelin kılıfların bağışıklık sistemi hücreleri tarafından lezyon oluşturması sonucu kişinin çeşitli motor fonksiyonlarının zaman içerisinde zarar görmesine neden olan bir durumdur [1]. MS ayrıca kişinin vücudunda enflamatuvar bir etki yarattığı için klinik bulgulara göre hastanın durumu belirlenmektedir [2]. Vücutta tüm yabancı maddelere karşı savaşan bağışıklık sistemi hücrelerinin kendi sinir hücrelerine saldırarak SSS'deki nöronların dış kısmını kaplayan miyelinli yapılara zarar vererek zaman içerisinde sinirsel iletimi durdurmaya zorlamaktadır [3]. Bu durum sinirsel iletimin aksamamasıyla birlikte vücut içerisinde birçok olumsuz etkiye neden olmaktadır [4]. MS'de yer alan skleroz sözcüğünün temel anlamı, SSS'de bulunan organların çevresinde bağışıklık sistemi hücrelerinin saldırması sonucu oluşan lezyonlardır [5,6]. Hastalığın en önemli belirtileri ise, görme sinirlerinde meydana gelen hasarlar, bitkinlik, günlük olarak yapılması gereken yürüme veya konuşma gibi birçok aktivitenin zorlaşması ve bunun sonucunda 24 saatten uzun bir sürede bu faaliyetleri gerçekleştirilememesi durumu ortaya çıkmaktadır [7].

MS tanısı konulan bireylerin, hastalığının çeşidine bağlı olarak klinik bulgulara dayalı seyir tipleri 4 farklı şekilde ifade edilmektedir; [8]

Relapsing-Remitting MS (RRMS): MS tanısı konulan bireylerin büyük bir yüzdeliğini oluşturan ve en geniş kapsamlı olan seyir tipidir. Hastalığın yeniden ortaya çıkması ve bunun sonucunda belirtilerin kişinin vücudunda artması gözlenebilmektedir. Bu duruma takiben hastanın vücudunda MS'e dair herhangi bir aktivitenin olmadığı bir zaman dilimi de oluşabilmektedir [9].

Sekonder Progresif MS (SPMS): RRMS seyir tipine sahip olan bireylerin vücutlarında meydana gelen

değişiklikler bu seyir tipi için de geçerlidir. Klinik bulgulara dayalı olarak SPMS'nin başlamasının önceliğinde RRMS seyir tipi gibi kendisini göstermektedir. Ancak hastalığın bu çeşidinde negatif anlamda gelişmeler olduğu sürece kişinin beyin ve sinir hasarı artarak motor fonksiyonları ciddi anlamda etkilemektedir [10].

Primer Progresif MS (PPMS): RRMS'ye oranla daha düşük bir yüzdeliğe sahip olan bireylerde görülen klinik seyir tipidir. Beyin ve sinir hücreleri, hastalığın bu çeşidinde gün geçtikçe olumsuz bir durum haline gelmektedir. Bu seyir tipinde hastalığın pozitif veya negatif anlamda devamlılığı söz konusu değildir [10].

Progressive-Relapsing MS (PRMS): Klinik bulgulara dayalı olarak MS'in sık rastlanmayan ve en düşük yüzdeliğine sahip olan seyir tipidir [11].

Hastalığın zaman ilerledikçe daha da olumsuz bir hale geleceği ifade edilmektedir. PRMS'de durum gitgide kişinin beyin ve sinir hücrelerine zarar verecek düzeye gelebileceğinden, hastalığın geri adım atarak düzelmeye veya iyileşme gibi bir durumu söylenemez [11].

Bu çalışmada özellikle de nörolojik hastalıklardan biri olan MS'in tıp alanında yapılan tedavilerin yanında aynı zamanda gelişen teknoloji ile biyomedikal mühendisliği alanında alternatif tedavi yöntemi olabilecek çözüm önerileri anlatılacaktır. MS, kişinin bağışıklık sisteminin bozulması sonucu bağışıklık sistemi hücrelerinin zaman içerisinde miyelin kılıflara saldırılması sonucu plaklar yani lezyonlar oluşturmasıdır. Hastanın kendi bağışıklık sistemi hücrelerinin bozulması sonucu meydana geldiği için de otoimmün bir SSS hastalığıdır. Buna bağlı olarak sinir hücrelerinin karakteristik bir şekilde tahrip edilmesiyle kişinin vücudundaki motor fonksiyonlarının aktivitesinde gitgide azalma görülmektedir.

Bu durum sonucunda beyinde oluşan herhangi bir uyarı, nöronlar aracılığıyla vücutta bulunan ilgili hedef sinire ulaşamaz. Sinirlere ulaşamadığı için de o sinirlere bağlı vücudun motor fonksiyonları işlevlerini doğru bir şekilde gerçekleştiremez. Bu çalışmada anlatılacak olan yöntemler MS'in belirtilerine göre özellikle SPMS tanısı konulan hastalara yani motor fonksiyonlarını zaman içerisinde kaybeden kişilere yönelik alternatif tedavi yöntemlerini oluşturmaktadır. Çalışmanın amacı ise, SPMS tanısı konulmuş olan kişilere yönelik tıp ve biyomedikal mühendisliği alanında yapılan çalışmaların güncel ve doğru bir şekilde ortaya koyulmasıyla birlikte çözüm önerileri geliştirebilmektir.

2. Kullanılan Malzeme ve Yöntemler

Bu bölümde MS'in güncel klinik tedavi yöntemleri anlatılmıştır. MS tanısı konulan bireylerin tedavisinde ilk olarak atakların yani belirtilerin sıklığının giderilmesi için

genellikle tercih edilen tıp tedavi yöntemlerinden birisi olan ilaç ile tedavi yöntemi kullanılmaktadır. MS'in tedavisinde kullanılan ilaçlardan birisi natalizumab'dır [12]. Bu ilaç bağışıklık sistemi hücrelerinin üzerinde bulunan almaçlara tutunarak, uyarılma ve engelleme yapabilmektedir [12]. MS tedavisi için desteklenen ve benzer etkiler yaratan birçok ilaçtan bazıları alemtuzumab ve rituksimab'tır [12]. Bu ilaçlar kimi hastaların tedavisinde olumlu yanıt verirken kimi hastalarda ise olumsuz cevap verebilmektedir. Bu nedenle ilaç tedavisinin hastaya uygulanıp uygulanmaması kişiye bağlı olarak değişmektedir. İlaç tedavisi dışında hastaların durumuna bağlı olarak farklı tedavi yöntemleri de mevcuttur.

Bu tedavi yöntemlerine örnek olarak plazma değişim yöntemi verilmektedir. Plazma değişim yönteminin temelinde, monomeri aminoasit olan çoklu yapıların oluşturduğu zehirli maddelerin, kanın içerisinde ayrılması durumu vardır. Bu yöntemde eriyik olan madde de kanın içerisinde ayrıldığı için bağışıklık baskılayıcı ilaç tedavilerine göre daha kısa sürede etkisi olmaktadır. Plazma değişim yöntemi ile aynı zamanda bağışıklık baskılayıcı ilaçlar kullanılabilir [13,14]. Plazma değişim yöntemi, MS tanısı konulan kişilerin bağışıklık sistemi hücrelerinin vücut içerisinde düzgün olarak çalışabilmesi ve aynı zamanda organlarda meydana gelen zararı azaltabilmek için kullanılabilir [13,14].

Diğer bir tedavi yöntemi ise kök hücre tedavisidir. Hastanın vücudundan alınmış kök hücreler direkt olarak bu yöntem için uygulanırsa diğer hücrelerle biyouyumluluğu iyi düzeyde olmaktadır. Bu şekilde hastalığın yavaşlatılması anlamında gelişmeler pozitif geri bildirim olarak sağlanabilmektedir. Kemik iliği temelli olan mezenkimal kök hücreler özellikle de beyin ile sinir hücrelerinin tahribatına neden olan ve buna bağlı farklı nörolojik hastalıklara yakalanan kişilerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır [15]. Yamout ve ark. 2010 senesinde yaptıkları bir çalışmada 10 adet nörolojik hastalığa sahip olan kişilerin vücutlarından kök hücreler almışlardır. Aldıkları kök hücreleri hastaların vücutlarına vererek farklı bir tedavi yöntemi uygulamışlardır. Hastalar yaklaşık olarak 3 ila 6 ay süre boyunca takip edilmiştir. Bunun sonucunda hastaların yarısı daha iyi bir hal alarak hastalıklarının seyri yavaşlamıştır [15]. Bu yöntemlerdeki temel amaç, hastanın sinir hücrelerinin düzgün bir şekilde çalışmasını sağlamak ve SSS'de bulunan organların hasarlarını en aza indirgeyerek onarmaktır. MS'in tıp alanında kesin bir tedavisi yoktur. Sadece hastaların yaşamını daha kaliteli bir şekilde sürdürmesi amacıyla hastalığı yavaşlatabilecek yöntemler uygulanmaktadır.

3. Olası Tedavi Edici Yöntemler

Bu bölümde MS'in deneysel olarak biyomedikal ve tıp alanlarını içeren yeni tedavi yöntemleri anlatılmıştır. Hastalığın tıp alanında kesin bir tedavisinin olmaması tek başına tıbbın MS tedavisinde yeterli olamayacağını düşündürmektedir. Bu nedenle biyomedikal ve tıp alanlarını da içeren yeni tedavi yöntemlerinin kullanılmasıyla çözüm önerileri üretebilmek gerekir. Nanoteknoloji bu hastalığın seyrini yavaşlatabilmek için kullanılmaktadır.

3.1. Sobetirom Molekülü Miyelin Kılıfı Onarabilir Mi?

Bu bölümde polimerik nanoparçacıklar aracılığıyla uygulanan deneysel bir çalışma ile miyelin kılıfın onarımında kullanılan sobetirom molekülü hakkında bilgi verilmiştir. Son yapılan çalışmalarda vücutta bulunan bağışıklık sistemi hücrelerinin, nöronların dış kısmında bulunan miyelin kılıflara hasar vermemesi için miyelin ile ilgili virüs veya bakteri yani antijen kullanılmaktadır. Çalışmada yer alacak olan nanoparçacıklar poli (laktik glikolik asit) (PLG) adı verilen çoklu yapıdan meydana gelmektedir [16]. PLG olarak isimlendirilen bu nanoparçacıkların içerisinde vücutta antikor seviyesini yükseltebilecek virüs veya bakteri yerleştirilmiştir. Farenin lenf sisteminin bir parçası olan dalak kısmına enjektör vasıtasıyla nanoparçacıklar konulmuştur [16].

Bu yöntem ile bağışıklık sistemi hücreleri miyelin kılıflara zarar vermektен vazgeçerek vücut içerisinde enjekte edilen nanoparçacığın içerisindeki bakteri veya virüs ile uğraşmıştır. Böylece bağışıklık sistemi hücreleri için hedef saptırılarak vücudun zararlı ya da hasar oluşturacak bir yapıya karşı tepki göstermesi sağlanmıştır [16]. Bu yöntem fareler üzerinde denenmiş ve pozitif geri bildirimli sonuçlar alınmıştır. Tahrip olmuş miyelin kılıfların nasıl onarılacağı ya da eski hale gelebileceği gibi bir takım sorular akıllara gelmektedir.

Son yapılan çalışmalara göre zarar gören miyelin kılıfların eski haline gelebilmesi için geçmiş zamanlarda kolesterol seviyesini düşürmek amacıyla kullanılmış ve yapay yolla üretilmiş olan, sobetirom adında bir yapı vardır. Bu molekül aracılığıyla sıçanlar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda miyelin kılıflar onarılarak sinir tahribatı azaltılmıştır. Fakat bu yapının kan-beyin bariyerini geçebilme özelliği olmadığından dolayı biraz daha üst seviyede olan formu geliştirilerek Sob-AM2 adında bir molekülün üretimi sağlanmıştır [17]. Bu yapı sayesinde sobetirom molekülü beyne geçiş sağlayarak miyelin kılıfların onarımı yapılmıştır. Onarım tamamlandıktan sonra Sob-AM2 molekülü sobetirom

molekülüne doğru geçiş yapmıştır. Bu çalışma ile sıçanlarda MS'e bağlı oluşan motor fonksiyonlardaki işlevsel bozuklukların yok edildiği görülmüş ve zarar gören miyelin kılıfların onarımı sağlanmıştır [17].

3.2.Mikrobiyomların Artışı Multipl Skleroza Neden Olabilir mi?

Bu bölümde MS tanısı konulan bireyler ile sağlıklı olan bireylerin bağırsaklarındaki mikroorganizmaların çözümlenmesi hakkında yapılan bir çalışma anlatılmıştır. MS'de vücut içerisinde bulunan bağışıklık sistemi hücrelerinin kendi sinir hücrelerine saldırma nedeni bilinmemektedir. Bu nedenle bilimsel çalışmalar sonucunda elde edilen değişkenlerin doğruluğunun ispatlanabilmesi için sağlıklı ve hasta bireyler üzerinden bir takım araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu MS tanısı konulan bireyler ile sağlıklı olan bireylerin bağırsaklarının içerisindeki zararlı moleküllerin miktarı belirlenmiştir [18].

Baranzini ve ark. tarafından 71 adet MS tanısı konulan ve sağlıklı olan bireylerin vücutlarında yaşayan tüm mikroorganizmalar çözümlenmiştir [18]. Bu çözümlenme sonucunda *Acinetobacter* ile *Akkermansia* adındaki bakterilerin MS tanısı konulan bireylerin vücutlarında daha fazla miktarda olduğu gözlemlenmiştir [18]. Bakterilerin bağışıklık sistemi hücrelerine bağlı olarak MS'i aktive ettiği düşünülmüştür. Bu duruma dair kanıt bulabilmek amacıyla sağlıklı olan bireylerin vücutlarından alınan kan örneklerine mikroorganizmalar yerleştirilmiştir. Bakterilerin zaman içerisinde, hastaların vücutlarında bulunan bağışıklık sistemi hücrelerini aktif hale getirdiği yani T lenfositlerin sayısının arttığı gözlemlenmiştir [18].

Sonuç olarak bağırsaklarda bulunan mikroorganizmaların MS'e bağlı olarak bağışıklık sistemi hücrelerini aktive ettiği düşünülmüştür. Bu deneysel çalışmalar ile MS tanısı konulan bireylerin bağırsak florasında yoğun olarak bulunan mikroorganizmaların, işlevlerini yavaşlatabilmek amacıyla çeşitli probiyotiklerin daha çok tüketilmesi hastalığın gidişatını olumlu yönde etkileyebilmektedir [18]. Yapılan çalışmalar ne kadar deneysel olsa da MS'in klinik seyri kişiden kişiye göre farklılık göstereceği için kesin bir tedavisi yoktur. Elde edilen çözüm önerileri olasılıklar üzerinden ifade edilmektedir. Son yapılan araştırmalar sonucunda insan beyninin içerisinde ve bağışıklık sisteminin çalışmasında görevli olan bir yapı keşfedilmiştir. Bu yapının kararlı iç dengeyi sağlayabilen aynı zamanda beyinde özel olarak varlığını sürdürebilen lenf damarları olduğu tespit edilmiştir [19].

Bu keşif sayesinde SSS'ye uğrayan zararlı maddelerin sadece kan-beyin bariyeri aracılığıyla denetlenmediği

düşünülmüştür [19]. Bu durum MS gibi nörolojik hastalıkların kişiye özel olarak, hastalığı yavaşlatabilmek amacıyla yapılacak olan çalışmalar için kılavuzluk edeceği düşünülmektedir.

3.3.Kemik İliği Kök Hücrelerinin Multipl Skleroz İle Bağlantısı

Bu bölümde kemik iliği kök hücrelerinin kullanılmasıyla üretilen yeni bir iyileştirme yönteminden bahsedilmiştir. MS, insan vücudu içerisinde yangısal tepki oluşturan aynı zamanda bağışıklık sistemi hücrelerinin yok etmesi gereken hücreleri tanıyamamasından kaynaklı olarak miyelin kılıflarda plak veya lezyon meydana getirdiği için bir SSS hastalığıdır [20]. Weian Zhao tarafından devam ettirilen bir çalışmaya göre, kemik iliği kök hücreleri aracılığıyla üretilen yeni bir iyileştirme yöntemiyle kemirgenlerde MS'e bağlı birçok belirti yok edilmiş, bu araştırma MS tanısı konulan birçok birey için umut kaynağı olmuştur [21].

Önceki zamanlarda yapılan çalışmalarda, damar yoluyla sıvı girişine izin verecek şekilde enjeksiyona tabi tutulan kök hücreler, kemik iliği içerisinde çıkartılarak bağışıklık sistemine ait kompleks bir yapı ile aktif hale getirilmiştir [21]. ACS Nano dergisinde açıklanan bu bilimsel çalışmada araştırmacılar tarafından, kemirgenlerin kök hücrelerinden elde edilen eksozom adı verilen protein temelli olan bu parçacıklar kemirgenlere enjeksiyon yöntemiyle verilmiştir. Eksozomlar, yangısal etkinin vücut içerisinde oluşmasını ve sinir hücrelerinde bulunan virüslerin herhangi bir şekilde vücuda zarar vermesini engelleyerek kan-beyin bariyerinden geçebilme özelliğine sahiptir.

Bu araştırma ile kemirgenlerdeki motor fonksiyonların düzgün bir şekilde çalışması sağlanmıştır. MS'in olumsuz etkilerinden biri olan nöron tahribatı zaman içerisinde azaltılmıştır. Kemirgenlerin bağışıklık sistemi hücreleri doğru bir şekilde çalışarak, tıp alanında kullanılan birçok ilaçla tedavi yöntemine göre daha iyi bir sonuç elde edilmiştir [21].

3.4.Beyin Makinesi Arayüz Yaklaşımı Beyni Kontrol Edebilir Mi?

Bu bölümde SPMS tanısı konulan kişilerin motor fonksiyonlarının doğru bir şekilde çalışmasına yardımcı olan beyin makinesi arayüz yaklaşımı anlatılmıştır. SPMS tanısı konulan bireylerde zaman içerisinde hastalığın klinik seyri kötüye gidebilmektedir. Hastalık ilerledikçe kişinin motor fonksiyonlarında çok sayıda bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulmalar, kişinin günlük hayatta yapması gereken bir takım faaliyetleri gerçekleştirmez

hale getirebilmektedir. Kişinin motor fonksiyonlarının doğru bir şekilde çalışması amacıyla beyin-bilgisayar arayüzü kullanılmaktadır. Bu arayüz çoğunlukla kişinin duyularıyla algılanan veya öğrenilen birçok motor fonksiyonun tedavi edilmesini sağlamaktadır [22].

Beynin elektriksel aktivitesi sonucu oluşan sinyallerin cihaza aktarılması ameliyat ile gerçekleştirileceği gibi kişinin kafatası üzerinden direkt olarak sinyalin alınmasıyla da gerçekleştirilebilmektedir [3]. Yardımcı cihazlar beyinden gelen elektriksel aktiviteye bağlı sinyalleri analiz ederek motor fonksiyonların doğru bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Beyin makinesi arayüz yöntemi esasında kişinin günlük hayatta yaptığı birçok farklı devinimin beyin tarafından nasıl denetlendiğinin ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır [3].

Beyin içerisinde oluşan elektriksel sinyallerin algılanabilmesi için reel süreli bir makine arayüz yönteminin uygulanabilirliğine dair dört ölçüt sağlanmalıdır; [23,24]

1.Dolaylı olmadan: Sistem direkt olarak beyinden gelen elektriksel sinyallere yönelik çalışma yapmaktadır.

2.Amaçlı denetleme: Amaçlı olarak düzenlenen minimum bir adet yedeklenebilir beyin sinyali aracılığıyla giriş yapılmaktadır.

3.Reel süreli analiz etme: Sinyallerin analizi aktif olarak yapılmakta ve bir haberleşme veya denetleme sinyali olarak iletilmektedir.

4.Cevap vermek: Makine arayüz yöntemini uygulayan bir kişi, haberleşme veya denetleme çalışmalarının olumlu ve olumsuz sonucu ile ilgili bir cevap edinmektedir.

Beyin makinesi arayüz yöntemi ile felçli insanların motor fonksiyonlarının iyi bir şekilde algılanması, analiz edilmesi ve aktarılması sağlanmaktadır [3]. SPMS tanısı konulan bir hastanın klinik seyrinin kötüleşmesi sebebiyle hasta motor fonksiyonlarını zaman içerisinde kaybetmektedir. Beyin makinesi arayüzü, hastanın motor fonksiyonlarının beyin merkezindeki işlevlerini ölçmektedir. Bu işlevlere uygun olarak bilgisayardan, analiz edilmesi için çeşitli komutlar gönderilmektedir. Elde edilen komutların niteliğine göre kişinin beyindeki motor fonksiyonların aktifliğinin ne durumda olduğu tespit edilmektedir. Bir bozukluk varsa kişinin tepki oluşturulacak organına uygun komutlar gönderilerek ilgili kasın hareket ettirilmesi sağlanmaktadır [3]. SPMS tanısı konulan birçok hastanın zaman içerisinde kaybolan motor fonksiyonlarının, beyin makinesi arayüz yöntemi ile kişiye özel olarak tedavi edilebileceği düşünülmektedir.

3.5. Nanokarterler ve MS

Bu bölümde hastalığın tedavisinde veya yavaşlatılmasında kullanılan nanoparçacıklar ile ilaç

taşıyıcı sistemlerin özelliklerinden bahsedilmiştir. Son zamanlarda nanoteknoloji bilimi, SSS amaçlı yapılan sinirsel tedavilere yönelik bakış açısını değiştirerek beyin ve omurilik ile ilgili hastalıkların iyileştirilmesi veya yavaşlatılabilmesi için farklı yöntemler oluşturmaya çalışmaktadır [25]. Bu gelişmeler, SSS'ye ait olan hücre veya dokularda meydana gelebilen zararlı oluşumların önüne geçerek birçok MS tanısı konulan hasta için tedavi anlamında umut verici olmaktadır [25].

SSS'de meydana gelen sinir tahribatını önlemek veya o bölgeyi lokal olarak iyileştirmek amacıyla yapılacak olan ilaç ile ilgili tedavilerde en olumlu gelişme nanopartiküllerin çeşitliliğinin fazla olmasıdır [26].

Nanoteknoloji, özellikle hastanın hasar almış olan hücre veya dokusunun üzerinde kullanılacak nanomalzeme ile laboratuvar koşullarında üretilen farklı malzemelerin duyarlılığı hakkında denetleme yapabilmektedir. Bu durum sinir hücrelerindeki görev dağılımını çeşitlendirmektedir. Vücudun farklı bir cevap oluşturup uyarılmasını sağlamaktadır [27,28]. Özellikle de nanopartiküllerin içerisine konulan ilaçların, vücut içerisinde tahribata uğramış olan sinir hücrelerine yönelik olarak dağılımı bölgesel ve etkisi olabildiğince uzundur.

Bu ilaçlar vücut içerisine yerleştirildiğinde ilgili hücre veya dokuyu en iyi şekilde tanınması gerekmektedir [29,30,31]. Yapılan çalışmalar ile üretilen nanoparçacıklı ilaç sistemlerinin, vücut içerisine yerleştirildiğinde gerektiği zaman parçalanabilen bir özellikte olması gerekmektedir. İlacın, vücudu denetleyici bir biçimde dağılım göstermesi beklenmektedir. Hidrofilik ve hidrofobik uçlara sahip, özellikle de sulu ortamlarda çözünebilirliği fazla olan yapıların vücut içerisinde dağılım gösterebilen bir ilaç kompleksi olarak kullanılabilir olması gerekmektedir [32]. Polimerik yapılar aracılığıyla amacı olmayan birçok hücre, kendi yapısal reaksiyonlarını göz ardı ederek ilaç dağıtımını anlamında vücut içerisinde etkili olmaktadır [33,34]. Böylece ilacın vücut içerisinde homojen olarak dağılıp kendi özelliğini kaybetmesine bağlı olarak zaman içerisinde meydana gelebilecek bozulmalar önlenmektedir. İlaç iletileceği hücre veya dokuya amacı doğrultusunda ilerlemekte ve etkisini gösterebilmektedir [33,34].

Damar yolunda bulunan nanoparçacıkların beyinde keşfedilen lenf damarlarıyla olan ilişkisi, MS tanısı konulan bireyler için tedavi anlamında farklı bir bakış açısı sunmaktadır [19]. Beyinde oluşan lezyonların yanı başında bulunan ekstrasellüler matriksin indirgenmesi ile hastalığın yavaşlatılabilmesi adına ilk adım atılmaktadır [35]. Bu durum sonucunda ekstrasellüler matriks şekil değiştirerek, plak oluşan kısımdaki doku ve hücrelere ulaşmaktadır [36,37]. Tedavi amaçlı kullanılan moleküllerden biri olan lipozom ile protein yapıları arasında bulunan peptid bağları

bağlanarak, lipozomların vücutta oluşan yeni damarlara iletilmesi hedeflenmektedir [38,39].

Bu durum ilaç ile tedaviye göre kişinin vücudunda daha olumlu bir etki yaratmaktadır [38,39].

3.5.1. Nanomalzemelerin Multipl Sklerozdaki Kullanımı

Bu bölümde MS'in tedavisinde kullanılmak üzere belirlenen ilaçların nanomalzemeler aracılığıyla bileşimi hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. MS tanısı için hastanın beyindeki lezyon veya plak oluşumuna bakılmaktadır. Görüntüleme tekniklerinden biri olan manyetik rezonans görüntüleme aracılığıyla kişinin beyinde bulunan lezyon veya plaklar tespit edilmektedir [40,41,42]. Nanomalzemeler vücut içerisinde biyoyumlu olmalıdır. Malzemeler etkileşim sağlayacağı hücre, doku, organ ve hücre içinde bulunan organellerle biyolojik ve kimyasal reaksiyonlar oluşturarak MS'in tanı ve teşhisinin yapılmasına yardımcı olmaktadır [43,44]. MS'in ilaç tedavisi dışında, araştırmacılar tarafından nanoteknoloji bilimine dayalı yapılan çalışmalarda farklı yapıda nanomalzemeler kullanılmaktadır. Farklı yapıda maddelerin hastalığı yavaşlatabilmek için kullanılmasının temel nedeni; beyin fizyolojik değişkenlere karşı meydana getirdiği durumlara bağlı olarak SSS hastalıklarının perde arkasında vücuda getirmiş olduğu zararları ortaya koyabilmektir [43].

Nanoteknoloji alanında yapılan araştırmalarda, SSS'ye bağlı tüm bozuklukların giderilmesi veya yavaşlatılabilmesi için geleneksel ilaç tedavisinden farklı bir metot sunularak tedaviye yönelik alternatif çözümlerin üretilmesi sağlanmaktadır [45]. Nanomalzemeler, spesifik olarak çözünmeyen ve çoklu yapılardan meydana gelen nanometre boyutundaki (1-100 nm) özel maddelerdir [45]. Fakat MS'in tedavisi amacıyla kullanılan malzemeler için belirtilen bu tanım değişkenlik göstermektedir [45]. Vücut içerisine ilaç dağıtımını yapılabilmesi için kullanılan nanomalzemelerin standart boyutları kişinin vücut yapısına bağlı olarak değişebilmektedir. Dolayısıyla kişinin vücuduna göre farklı boyutta parçacıklar oluşturularak daha etkin bir kullanım gerçekleştirilmektedir (>100 nm) [45].

Nanoteknolojinin ürettiği yeni yaklaşımlar, farklı dokulara gitmek üzere yönlendirilmiş ilaçların vücut içerisindeki dağılımına yönelik yeni fikirlerin ve buna bağlı tedavilerin oluşmasını sağlamaktadır [46,47]. Böylelikle nano boyutta üretilen birçok yapı sayesinde hücre ve dokuların onarımının sağlandığı, nöron tahribatlarının en aza indirildiği bilinmektedir [48]. Nanoteknoloji bilim dalının zaman içerisinde gelişimi sürdürülerek, sinir tahribatını azaltmak için beyinde

bulunan kan-beyin bariyeri yapısına gönderilen ilaçların kabul edilmesi ile birçok problem giderilmektedir.

MS gibi nörolojik hastalıkların yavaşlatılması veya durdurulması amacıyla geliştirilen nanopartiküller ile ilaç dağıtım sistemlerinin çeşitlilik göstermesi, hastalar üzerinde pozitif geri bildirim oluşturmaktadır [49,50].

4. Tartışma

MS, kişinin bağışıklık sistemi hücrelerinin vücudun kendi hücrelerini yabancı bir madde olarak görmesi sonucu bağışıklık sistemi hücrelerinin miyelin kılıflara saldırarak lezyon oluşturmasıdır [1]. Bu nedenle hastalığın tedavisi için üretilen çözüm önerileri olasılıklar üzerinden yapılmaktadır. Hastalığın aslında sinir hücrelerinde bir problem olduğu için ortaya çıktığı düşünülürse bağışıklık sistemi hücrelerinin işlevinde bir problem olmadığı sadece bu hücrelerin yok edeceği hücreyi tanımadığı anlaşılmaktadır. Bu olasılığa göre lezyon veya plak oluşmuş sinir hücrelerinin herhangi bir nedenle mutasyona uğradığı ve böylece genetik yapısının bozulduğu, bu sebeple bağışıklık sistemi hücrelerinin kendi sinir hücrelerine saldırdığı düşünülmektedir. Böyle bir durum tespit edilirse genetiği lokal olarak bozulmuş ya da mutasyona uğramış olan sinir hücrelerinin genetik yapısının değiştirilmesi için gen terapisi yöntemi uygulanabilmektedir. Böylelikle bağışıklık sistemi hücreleri sağlıklı hücreler haline getirilebilmektedir. Bu yöntemde sinir hücrelerinin genetik yapısı değiştirilmektedir. Bir başka olasılığa göre bağışıklık sistemi hücrelerinin miyelin kılıflara saldırmasının temel sebebi, sinir hücrelerinin herhangi bir nedenden dolayı sonradan zararlı mutasyona uğraması olabilmektedir. Bir diğer ihtimal ise, kişinin geçmişte bir virüse veya bakteriye maruz kalması sonucunda beyinde bulunan lenf damarlarının yapısının bozulmasıdır. Lenf damarlarının yapısının bozulması sonucunda lenf düğümlerine iletilecek olan bağışıklık sistemi hücrelerinin de yapısı bozulabilmektedir. Bu durumun sonucunda kişide MS görülebilmektedir. Kişinin geçmişte maruz kaldığı bakteri veya virüs, vücudun içerisine giren bir kimyasalın kan-beyin bariyerinden geçmesi sonucu lenf damarlarına zarar vermiş olabilmektedir [19]. Bir diğer olasılığa göre ise bağışıklık sistemi hücrelerinin karşı koyamadığı yani saldırdığı halde öldüremediği bir tür bakteri veya virüs etkisiyle bağışıklık sistemi hücreleri yok edeceği yapıyı tanıyamaz hale gelebilmektedir. MS teşhisi konulan bireylerde bağışıklık sistemi hücreleri miyelin kılıflara bir takım hasarlar vermektedir. Bu hasarların tedavisi ise miyelin kılıfları onaran yapay bir molekül olan sobetirom ile sağlanmaktadır. Bir süre sonra miyelin kılıflar

onarılacaktır [17]. Fakat onarılan miyelin kılıflarda elektriksel iletimin sağlanması zaman alacaktır.

Bu elektriksel iletimin zaman içerisinde sağlanması amacıyla farklı cihazlar tasarlanmaktadır. Lovley ve ark. tarafından yapılan çalışmada beyinde yer alan nöronların çalışma mekanizmasına benzeyen bir cihaz tasarlanarak nöronların elektriksel iletiminin üretilen cihaz ile gerçekleştirilebileceği vurgulanmaktadır [51]. Geobacter adı verilen mikroorganizmalar aracılığıyla üretilen nanoteller sayesinde nöronlardaki elektriksel iletimin üretilen cihaz ile sağlanılabileceği söylenmektedir [51].

Nanotellerin yapısının biyolojik içerikli olması sentetik olarak üretilen diğer malzemelere göre cihazın çalışabilmesi adına daha iyi bir sonuç vereceği düşünülmektedir [51]. Belirtilen hipotezler ile SPMS tanısı konulan kişilere yönelik hem biyomedikal hem de tıp alanında bir takım çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu çözüm önerilerinin amacı motor fonksiyonlarını kaybeden kişilerin zaman içerisinde belirtilen hipotezlere uygun olarak bir tedavi oluşturulmasıdır. Ayrıca hastaların yeniden motor fonksiyonlarını kazanmasının ve hastalığın olumsuz olan belirtilerinin en aza indirgenmesinin sağlanmasıdır.

5. Sonuç

Bu sistematik derleme çalışması ile SPMS tanısı konulan bireylerin zaman içerisinde yaşamlarını daha kaliteli ve sağlıklı geçirebilmesi amacıyla elde edilen bilgiler doğrultusunda alternatif tedavi yöntemleri açıklanmıştır. Çalışmanın bulgular kısmında bahsedildiği gibi nanoteknoloji her geçen gün tedavisi bulunamayan nörolojik hastalıkların çözümü için ciddi derecede ilerleme kaydedebilen önemli bir bilim dalıdır. Özellikle hedeflenmiş doku veya hücrelere ilaç dağıtımını anlamında farklı nanomalzemeler kullanılarak SPMS tedavisine yönelik hastalarda olumlu geri bildirim sağlayan birçok yöntem bulunmaktadır. Kök hücre tedavisi gibi kişiye özel uygulanabilecek farklı tedavi yöntemleri geliştirilerek MS tanısı konulan birçok bireyin hastalığını yavaşlatıcı ve durdurucu etki yapabileceği anlaşılmaktadır. Sobetirom gibi farklı mekanizmalar için kullanılan birçok molekülün kan-beyin bariyerini geçmesi sonucu beyne etki ederek SPMS tedavisinde rol oynayacağı düşünülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalarda bir araya getirilen deneysel bulguların ileriye dönük olarak yeni ve umut verici birçok tedavi için ilham kaynağı olacağına inanılmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Coles A., Compston A., 2008. Multiple sclerosis, [abstract]. The Lancet, 372(9648), 1502-1517.
- [2] Ghasemi N., Nikzad E., Razavi S., 2017. Multiple Sclerosis: Pathogenesis, Symptoms, Diagnoses and Cell-Based Therapy, [abstract]. Cell Journal, 19(1), 1-10.
- [3] Khare M., Singh A.V., Zamboni P., 2014. Prospect of Brain-Machine Interface in Motor Disabilities: The Future Support for Multiple Sclerosis Patient to Improve Quality of life. Annals of Medical and Health Sciences Research, 4(3), 305-312.
- [4] Goodin D.S., Hauser S.L., 2008. Multiple Sclerosis and Other Demyelinating Diseases. Harrison's Principles of Internal Medicine. 17th ed. McGraw-Hill Medical. New York, USA, 2611-2621.
- [5] Archelos J.J., Hartung H.P., Hemmer B., 2002. New concepts in the immunopathogenesis of multiple sclerosis. Nature Reviews Neuroscience, 3(4), 291-301.
- [6] Carrieri P.B., Delfino M., Gattoni A., Montella S., Petracca M., Sepe C., 2008. Multiple sclerosis and systemic sclerosis: efficacy of interferon beta on skin lesions. Annals of the Rheumatic Diseases, 67(8), 1192-1193.
- [7] Krupp L.B., 2003. Fatigue in Multiple Sclerosis: Definition, Pathophysiology and Treatment. CNS Drugs, 17(4), 225-234.
- [8] Ascherio A., Munger K.L., 2007. Environmental risk factors for multiple sclerosis, Part I: the role of infection. Annals of Neurology, 61(4), 288-299.
- [9] Mowry E.M., 2011. Natural history of multiple sclerosis: early prognostic factors. Neurologic Clinics, 29(2), 279-292.
- [10] Confavreux C., Vukusic S., 2007. Natural history of multiple sclerosis: risk factors and prognostic indicators. Current Opinion in Neurology, 20(3), 269-274.
- [11] Lublin F.D., 2005. Clinical features and diagnosis of multiple sclerosis. Neurologic Clinics, 23(1), 1-15.

- [12] Garriga J.S., Jordana A.V., Tintore M., 2019. Treatment of multiple sclerosis: success from bench to bedside, [abstract]. *Nature Reviews Neurology*, 15(1), 53-58.
- [13] Akpolat T., Arik N., Karaaslan Y., Turgan Ç., 1991. Plazmaferez ve renal hastalıklarda kullanımı. *Türk İlaç ve Tedavi Dergisi*, 4, 557-561.
- [14] Hakim R.M., Siami G.A., 1994. Plasmapheresis. *Handbook of Dialysis*. Daugirdas JT, Ing TS (eds). Little, Brown and Company, Boston, USA, 218-241.
- [15] Al-Kutoubi A., Barada W., El-Hajj T., Hourani R., Salti H., Yamout B., ... , Bazarbachi A., 2010. Bone marrow mesenchymal stem cell transplantation in patients with multiple sclerosis: a pilot study, [abstract]. *Journal of Neuroimmunology*, 227(1-2), 185-9.
- [16] Getts D.R., Harp C.T., Hunter Z., McCarthy D.P., Miller S.D., Shea L.D., Yap W.T., 2014. A Biodegradable Nanoparticle Platform for the Induction of Antigen-Specific Immune Tolerance for Treatment of Autoimmune Disease. *ACS Nano*, 8(3), 2148-2160.
- [17] Banerji T., Calkins E., Chaudhary P., Hartley M.D., Kirkemo L.L., Tague I.J., ... , Scanlan T.S., 2019. Myelin repair stimulated by CNS-selective thyroid hormone action. *JCI Insight*, 4(8), e126329.
- [18] Cekanaviciute E., Debelius J.W., Nelson C.A., Runia T.F., Singh S., Yoo B.B., ... , Baranzini S.E., 2017. Gut bacteria from multiple sclerosis patients modulate human T cells and exacerbate symptoms in mouse models. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(40), 10713-10718.
- [19] Eccles J.D., Keyes T.J., Louveau A., Peske J.D., Rouhani S.J., Smirnov I., ... , Kipnis J., 2015. Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels, *Nature*, 523, 337-41.
- [20] Brück W., Lassmann H., Lucchinetti C.F., 2007. The immunopathology of multiple sclerosis: an overview, [abstract]. *Brain Pathology*, 17(2), 210-8.
- [21] Lässer C., Mohammadi M.R., Pone E.J., Riazifar M., Segaliny A.I., Yeri A., ... , Zhao W., 2019. Stem Cell-Derived Exosomes as Nanotherapeutics for Autoimmune and Neurodegenerative Disorders. *ACS Nano*, 13(6), 6670-6688.
- [22] Vidal J.J., 1973. Toward direct brain-computer communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 2, 157-80.
- [23] Birbaumer N., McFarland D.J., Pfurtscheller G., Vaughan T.M., Wolpaw J.R., 2002. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767-91.
- [24] Allison B.Z., Bauernfeind G., Brunner C., Pfurtscheller G., Scherer R., Solis-Escalante T., ... , Birbaumer N., 2010. The hybrid BCI. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 3.
- [25] Lin L.N., Liu F.F., Liu Q., Sha J.X., Song L., 2010. Recent advances in nanotechnology based drug delivery to the brain. *Cytotechnology*, 62(5), 377-380.
- [26] Kanwar J.R., Mohan R.R., Punj V., Sriramoju B., Sun X., Zhou S.F., ... , Kanwar R.K., 2012. Nanoparticles in the treatment and diagnosis of neurological disorders: untamed dragon with fire power to heal, [abstract]. *Nanomedicine*, 8(4), 399-414.
- [27] Gailite L., Gianfelice A., Lenardi C., Milani P., Singh A.V., 2009. A simple lift-off-based patterning method for micro- and nanostructuring of functional substrates for cell culture. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(11), 115028.
- [28] Forti S., Gailite L., Lenardi C., Matteoli M., Milani P., Singh A.V., Vyas V., 2011. Rapid prototyping of nano- and micro-patterned substrates for the control of cell neurogenesis by topographic and chemical cues. *Materials Science and Engineering:C*, 31(5), 892-899.
- [29] Calafaire R., Chang T.M.S., Gascón A.R., Hernández R.M., Orive G., Vos P.D., ... , Pedraz J.L., 2003. Cell encapsulation: promise and progress. *Nature Medicine*, 9(1), 104-7.
- [30] Fernandes R., Gracias D.H., 2012. Self-folding polymeric containers for encapsulation and delivery of drugs. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64(14), 1579-1589.
- [31] Ausländer S., Fussenegger M., Wieland M., 2012. Smart medication through combination of synthetic biology and cell microencapsulation. *Metabolic Engineering*, 14(3), 252-60.
- [32] Falamarzian A., Garg S.M., Lavasanifar A., Xiong X.B., 2011. Engineering of amphiphilic block copolymers for polymeric micellar drug and gene delivery. *Journal of Controlled Release*, 155(2), 248-61.
- [33] Anitua E., Emerich D. F., Orive G., Pedraz J.L., 2009. Biomaterials for promoting brain protection, repair and regeneration. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(9), 682-92.

- [34] Desimone J.M., Petros R.A., 2010. Strategies in the design of nanoparticles for therapeutic applications. *Nature Reviews Drug Discovery*, 9(8), 615-27.
- [35] Gemmati D., Milani P., Singh A.V., Subhashree L., Zamboni P., 2010. Review: Interplay of iron metallobiology, metalloproteinases, and FXIII, and role of their gene variants in venous leg ulcer. *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, 9(4), 166-79.
- [36] Gutowski N.J., Holley J.E., Newcombe J., Whatmore J.L., 2010. Increased blood vessel density and endothelial cell proliferation in multiple sclerosis cerebral white matter. *Neuroscience Letters*, 470(1), 65-70.
- [37] Dijkstra C.D., Horssen J.V., Vries H.E.D., 2007. The extracellular matrix in multiple sclerosis pathology. *Journal of Neurochemistry*, 103(4), 1293-1301.
- [38] Bicknell R., Neri D., 2005. Tumour vascular targeting. *Nature Reviews Cancer*, 5(6), 436-446.
- [39] Lin K.Y., Maltzahn G.V., Mesters R., Park J.H., Schwöppe C., Singh N., ... ,Bhatia S.N., 2011. Nanoparticles that communicate in vivo to amplify tumour targeting. *Nature Materials*, 10(7), 545-552.
- [40] Gade W.N., Khare M., Singh A.V., Zamboni P., 2012. Theranostic Implications of Nanotechnology in Multiple Sclerosis: A Future Perspective. *Autoimmune Diseases*, 2012, 12.
- [41] Huang Y.M., Link H., 2006. Oligoclonal bands in multiple sclerosis cerebrospinal fluid: an update on methodology and clinical usefulness *Journal of Neuroimmunology*, 180(1-2), 17-28.
- [42] Stoeckli E.T., 2012. What does the developing brain tell us about neural diseases? *European Journal of Neuroscience*, 35(12), 1811-1817.
- [43] Hassan S., Singh A.V., 2014. Biophysicochemical perspective of nanoparticle compatibility: a critically ignored parameter in nanomedicine. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14(1), 402-414.
- [44] Cortelli D., Dellasega D., Podestà A., Salve T.S., Singh A.V., Vyas V., ... ,Gade W.N., 2012. Biofilm formation on nanostructured titanium oxide surfaces and a micro/nanofabrication-based preventive strategy using colloidal lithography. *Biofabrication*, 4(2), 2484-2490.
- [45] Kumar B., Ojha S., 2018. A review on nanotechnology based innovations in diagnosis and treatment of multiple sclerosis. *Journal of Cellular Immunotherapy*, 4(2), 56-64.
- [46] Certo A., McKay C.A., Pace F., Raymond M., Singh A.V., Zuidema J.M., ... ,Wan L.Q., 2015. Astrocytes increase ATP exocytosis mediated calcium signaling in response to microgroove structures. *Scientific Reports*, 5(1), 7847.
- [47] Han L., Kong D.K., Ma C., Murikinati S., Yuan P., Zheng M.Q., ... ,Zhou J., 2016. Increased Nanoparticle Delivery to Brain Tumors by Autocatalytic Priming for Improved Treatment and Imaging. *ACS Nano*, 10(4), 4209-4218.
- [48] Choonara Y.E., Kumar P., Modi G., Pillay V., 2016. Improving drug delivery technology for treating neurodegenerative disease. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 13(7), 1029-1043.
- [49] Hosseinidoust Z., Park B.W., Singh A.V., Sitti M., Yasa O., 2017. Microemulsion Based Soft Bacteria Driven Microswimmers for Active Cargo Delivery. *ACS Nano*, 11(10), 9759-9769.
- [50] Gidwani M., Singh A.V., 2014. Nanoparticle enabled drug delivery across the blood brain barrier: in vivo and in vitro models, opportunities and challenges. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 14(14), 1201-1212.
- [51] Lovley D.R., Walker D.J.F., 2019. Geobacter Protein Nanowires. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2078.



Kalsiyum Sülfonat Bazlı Kompleks Grese Katkı Maddeleri İlave Ederek Performans Özelliklerinin İyileştirilmesi

Improving Performance Properties by Adding Additives to Calcium Sulfonate- Based Complex Grease

Ezgi GÜNEŞ GÜRDAL^{1,*} , Nazlı ÇALIŞKAN GÜVEN² 

¹ Lubratech Endüstriyel Yağlar ve Kim. Mad. San. Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-0311-1350

² Lubratech Endüstriyel Yağlar ve Kim. Mad. San. Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-5751-2638

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 13/03/2021

Kabul Tarihi : 27/02/2022

Anahtar Kelimeler

Gres
Kalsiyum Sülfonat Kompleks Gres
Penetrasyon
Triboloji

Research Paper

Received Date : 13/03/2021

Accepted Date : 27/02/2022

Keywords

Grease
Calcium Sulphonate Complex Grease
Penetration
Tribology

Özet

Kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gresler, üstün organik ve oksidasyon kararlılıkları, kimyasal olarak dayanıklı olmaları, suya, buhara, pasa, korozyona ve ısıya karşı dirençli yapısı ve yüksek damlama noktası özelliklerine sahip olmaları sebebiyle endüstriyel makinelerde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Türkiye'de başta demir-çelik sektörü olmak üzere, ağır sanayi ve milli üretim hamlesi büyük bir ivme kazanmıştır. Özellikle çelik sektöründe yassı mamule geçiş günden güne artmaktadır. Karadeniz (Karabük, Zonguldak), Doğu Akdeniz (Hatay, Osmaniye), Marmara (Bursa, Kocaeli ve İstanbul), Ege (İzmir), İç Anadolu (Sivas, Kırıkkale) Bölgelerinde kurulan ve kurulması planlanan ark ocaklı tesis ve sürekli döküm makinelerinde kullanımı zorunlu olan kalsiyum sülfonat bazlı kompleks greslerinin, yüksek performanslı ve farklı kullanım amaçlarına uygun çeşitlilikte geliştirilerek, ağır sanayilerin ihtiyacına cevap verebilecek uygun ve ekonomik forma ulaştırılması amaçlanmıştır.

Yapılan bu çalışmada, kalsiyum sülfonat bazlı kompleks greslerin geliştirilebilir özellikleri göz önünde bulundurularak, greslere performans artırıcı katkı maddeleri ilave edilmiştir. Bu sayede greslerin kullanım ömrü, suya dayanıklılığı, pompalanabilirlik değerleri isteğe yönelik olarak ayarlanabilmesi ve farklı performansta gres elde edilmiştir. Elde edilen optimum oranların kontrolünü sağlamak amacıyla ASTM, TSE Standartlarına uygun olarak Damlama Noktası Analizi, Penetrasyon Testi, Dört Bilya Testi gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Penetrasyon analizi sonuçları 275-340 mm/10 aralığında bulunmuş ancak en iyi gres kıvamı 285 mm/10 değerinde elde edilmiştir. Damlama noktası sıcaklığı 300-350 °C arasında tespit edilerek ve demir-çelik sektörü için en iyi sonuç 350 °C olarak kaydedilmiştir. 4 bilyalı aşınma testinde en iyi sonuç 0,55-0,8 mm aralığında 0,8 mm ve bilye kaynak yükü 400-620 N arasında bulunmuştur.

Abstract

Calcium sulfonate-based complex greases are widely preferred in industrial machinery due to their superior organic and oxidation stability, chemical resistance, resistance to water, steam, rust, corrosion and heat, and high dropping point properties. Heavy industry and national production moves, especially in the iron-steel sector, gained great momentum in Turkey. Especially in the steel industry, the transition to flat products is increasing day by day. Mandatory use in arc furnace facilities and continuous casting machines established and planned to be established in the Black Sea (Karabük, Zonguldak), Eastern Mediterranean (Hatay, Osmaniye), Marmara (Bursa, Kocaeli and Istanbul), Aegean (Izmir), Central Anatolia (Sivas, Kırıkkale) regions, it is aimed to develop the calcium sulfonate-based complex greases, which are one of the most important products in the world, in a variety suitable for high performance and different usage purposes, and to deliver them in a suitable and economical form that can meet the needs of heavy industries.

In this study, performance-enhancing additives were added to the greases, taking into account the developable properties of calcium sulfonate-based complex greases. In this way, the service life, water-resistance and pumpability values of the greases can be adjusted optionally and greases with different performances have been obtained. To control the optimum ratios obtained, analyzes such as Drop Point Analysis, Penetration Test, Four-Ball Test were carried out by ASTM and TSE Standards. Penetration analysis results were found to be in the range of 275-340 mm/10 but the best grease consistency was given at the value of 285 mm/10. Dropping point temperature was between 300-350 °C and the best result for the iron and steel industry was recorded as 350 °C. In the 4 ball wear test, the best result was determined as 0.8 mm in the range of 0.55-0.8 mm and ball welding load was between 400-620 N.

1. Giriş

Gres, madeni yağlara göre belirgin bir akmazlığa sahip, yağlama özelliği gösteren bir sıvıya, kalınlaştırıcı kimyasal

maddelerin eklenmesi ile elde edilen yarı akışkan/kati kıvamlı bir maddedir. Greslerin yapısı sünger şeklindedir. İçindeki boşluklar baz yağı ile doldurularak, içerisine yüksek basınç dayanımı, aşınma önleyici, oksidasyon

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): ezgi.gurdal@lubratech.com.tr



önleyici vb. isteğe bağlı katkı maddeleri ilave edilir. Reaksiyon sırasında yağ serbest kalarak gres oluşur [1].

Üretilen enerjinin üçte birinin sürtünme sonunda harcandığı ispatlanmış bir gerçektir. Ayrıca sürtünmeden kaynaklı aşınmaların birçoğunun maliyet açısından ciddi kayıplara yol açtığı, sektör araştırmaları sonucu tespit edilmiştir. Örneğin büyük bir çelik tesisinde aşınmalardan kaynaklı yıllık bakım çalışmaları, tesis kuruluş maliyetine ek olarak %10-15 kadarlık bir ek maliyet getirmektedir. Bunun anlamı 6-7 yılda bir yeni tesis kurabilecek kadar ek masraftır [2].

Hız ve zorlanmalar gibi artan agresif koşullar sebebiyle makine sistemlerinin güvenilirlik ve ömür koşullarının daha çok artış göstermesi, aşınmanın minimuma indirilmesini ve kontrol altında tutulmasını gerektirmektedir. Demir çelik sektörü başta olmak üzere katı otomasyon uygulayan fabrikalarda ve ileri teknolojinin uygulandığı sistemlerde triboloji bilimi ve bunlarla ilgili olarak yağlama, en önemli boyutlandırma kriter ve parametrelerinin içine girmektedir [3].

Kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gresler, demir-çelik, kağıt, cam, seramik ve otomotiv gibi ağır sanayi proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Etkin bir triboloji uygulaması için kullanılabilir olan bu gresler yüksek yük taşıma kabiliyeti, mekanik etkilere, suya, katı partiküllere, pas oluşumuna ve korozyona karşı dayanıklılık ve farklı çalışma şartlarında performans kaybına uğramama gibi özelliklere sahip olmalıdır. Greslerin, makro moleküler yapıları sebebiyle yüksek akma sıcaklığı, yüksek oksidasyon direnci ve korozyona karşı koruyucu etkilerinin olduğu bilinmektedir. Greslerde kalınlaştırıcı eleman olarak kullanılan sabunlar; lityum, kalsiyum, baryum, sodyum vb. metal iyonları organik asitli bileşiklerdir. İster sabun bileşiği ister sabunsuz bileşikler (poliüretan, silikat vb.) kullanılsın kalınlaştırıcı eleman, gresin viskozite, film oluşturma, aşınma direnci, basınç dayanımı gibi önemli özellikleri açısından belirleyicidir. Kalsiyum sülfonat kompleks greslerin geliştirilmesini hedef alan çalışmalarda, bu tür greslerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin de daha avantajlı olduğu anlaşılmıştır [1,4,5]. Kalsiyum sülfonat kompleks gresler uzun süreli yüksek performans sergileyebildikleri için, alternatiflerine kıyasla daha düşük miktarlarda kullanılmaları yeterli olmaktadır. Öte yandan, biyolojik bozunabilir olmaları ve gıdalarla uyumlu davranış sergilemeleri, çevre ve insan boyutu açısından da önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Gresler, yüksek damlama noktası, mükemmel su direnci ve mekanik kararlılık, uzun ömürlü yağlama süresi, kullanıldığı cihazın bakım ve onarım maliyetlerinde azalma, merkezi yağlama sistemlerine uyumluluğu, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta verimini kaybetmeden yüksek performans göstermesi ve ihtiyaca yönelik spesifik özelliklere göre

üretilirlikleri başta olmak üzere birçok özellikleri nedeniyle sanayi sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedirler. Ayrıca mükemmel korozyon koruması özelliği, düşük aşınma ve yüksek ekstra yük dayanımının tümü grese özgüdür [2].

Gresler, birçok yönden Uluslararası Gres Endüstrisi tarafından belirlenen sertlik ve tutarlılık kıvamlarına göre sınıflandırılabilirler. Gresler aynı zamanda Ulusal Yağlama Gres Enstitüsü (NLGL) tarafından belirlenen standartlarının yanı sıra düşük ve yüksek viskozite değerlerine göre de sınıflandırılırlar. Gres meydana getiren bileşenler Şekil 1'de verilmiştir [6].

Gresler koyulaştırıcılar, yağlar ve katkı maddeleri olmak üzere 3 bileşenden oluşur. Kıvam arttırıcılar gresi jelleştirmenin bir yoludur ve gres bileşiminin %3 ile %20'sini oluşturmaktadırlar. Gresin çalışma sırasında, yağlama işlevini yerine getiren, mineral ve sentetik olabilen, bileşiminin %70 ile %95'lik kısmını oluşturan temel yağlar bulunmaktadır. Bunun yanı sıra gres bileşiminin %10'luk kısmına denk gelen ve istenilen performansta çalışmasını sağlayan, yağlama performansını geliştirebilen veya değiştirebilen katkıları bulunmaktadır [7]. Bir ürünü gres haline getirmenin birçok yolu vardır. Bunlar basit sabunlar, kompleks sabunlar ve sabun içermeyenler olarak üçe ayrılır [8].

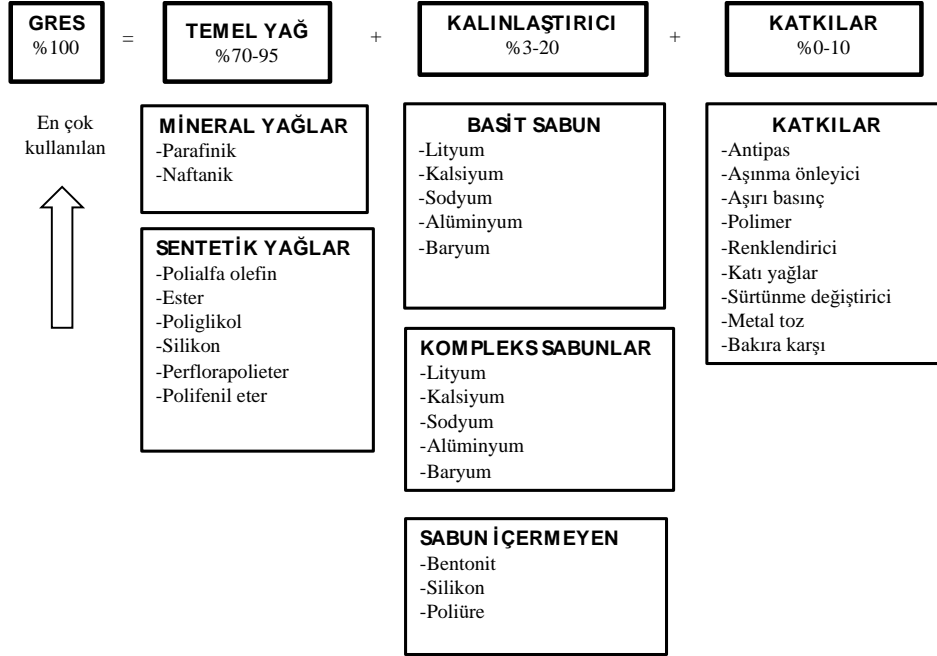
Gresler esas olarak baz yağlarından oluşur. Mineral ve sentetik olarak ikiye ayrılan baz yağlarından genel olarak sentetik baz yağı tercih edilmektedir. Doğal ve sentetik esterler, silikonlar, Per flora polieter kullanılır. Bazı özel uygulamalarda alkilenmiş naftalin, gres içeriğine eklenebilir. Katkı maddeleri gres geliştirilmesinde son bileşendir ve aynı türden yağlama yağlarında bulunabilir. Gres katkı maddeleri olarak sadece renk verme özelliği olan pigmentler, antioksidanlar, anti korozyon olarak kullanılan ajan maddeler, yüksek basınç dayanımı ve aşınma önleyici maddeler, polimerler ve suya dayanıklı katkıları kullanılmaktadır [9].

Basit sabunlar, standartlara dayalı organik malzemeler ile reaksiyona girdiğinde, metal tuzlarını oluştururlar. Genellikle 210 °C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışabilirler. Lityum, kalsiyum, alüminyum basit sabunda kullanılan tipik metal koyulaştırıcılarıdır. Kompleks sabunlar, basit sabunlar ile benzerlik gösterebilen bir yapıya sahiptir. Standart kompleks sabun türlerinde lityum kompleksi, alüminyum kompleksi, kalsiyum kompleksi ve kalsiyum sülfonat kompleksi 210 °C'nin üzerinde yüksek performansla çalışabilirler [9].

Kalsiyum sülfonat gresleri uzun araştırmalar sonucu ortaya çıkan bir grestir. Newton'un viskozite kanunlarına göre yapmış olduğu araştırmalar sonucunda, newtonian olmayan, kalınlaşan kalsiyum sülfonat gresi bulunmuştur. Kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gresler genellikle yüksek damlama noktasına, mekanik stabiliteye ve

mükemmel su direncine sahiptir. Ayrıca yüksek basınç dayanımı, düşük aşınma, mükemmel korozyon koruma özellikleri kalsiyum sülfonat kompleks grese özgüdür. Bu özellikleri sebebiyle sanayide yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Basit kalsiyum sülfonat gres yarı saydam bir görünüme sahipken (Şekil 2.a) kompleks hale

getirilmiş kalsiyum sülfonat gres opak bir görünüme sahiptir (Şekil 2.b) [9]. Bunun sebebi kompleks versiyonlarda daha az koyulaştırıcı kullanılmasını sağlayan maddelerin ilavesidir. Bu maddeler sayesinde koyulaştırıcı içeriği %15-35'e kadar düşürülebilir ve bu durum gresin renginin daha açık olmasına sebep olur [2].



Şekil 1. Gresi Meydana Getiren Bileşenler [6]



Şekil 2. a) Basit kalsiyum sülfonat gres, b) Kompleks kalsiyum sülfonat gres [9]

Endüstriyel standart, ham greslerin karakteristik özelliklerini ve performanslarını, karışım greslerin ise aralarındaki uyumu değerlendirir. Testin prensibi, kontrollü ve eşit şartlarda greslerin belirli oranlarda karıştırılması sonrasında oda sıcaklığında belirli bir süre bekletilerek greslerin yapısal kararlılıklarında bir değişim olup olmadığını değerlendirmektir.

Tablo 1'de kalsiyum sülfonat greslerin birbirleri ile uyumluluğu gösterilmektedir. "*" sembolü greslerin karışamaz olduğunu (uyumsuz), "+-" sembolü greslerin kısmen karışabileceğini (kısmen uyumlu), "+" sembolü ise gres karışabilirliğini (uyumlu) göstermektedir. Farklı özellikteki iki gres birbirine karıştırıldığı zaman performansında bir düşme meydana geliyorsa bu durumda gres uyumsuzluğu söz konusudur. Bu gibi durumlarda

Tablo 1'den faydalanılabilir. Greslerin yüksek performans vermesi için uyumlu bir şekilde karışabilecekleri gres bazı ve koyulaştırıcıların seçilmesi gerekmektedir. Bazı gres bazları yapıları gereği birbirleriyle uyum sağlamazlar. Bununla birlikte uyumluluğu etkileyen diğer önemli parametreler yağ asitleri ve/veya katkı paketleridir [10]. Gres arasındaki uyumluluk, konsantrasyon, sıcaklık ve dış kirlilik derecesi gibi bir dizi çeşitli faktöre bağlıdır. Fakat bu uygulama kritik önem taşıdığından, uyumluluğun test edilmesi daha doğru sonuçlar vermektedir [9].

1.1. Gres Üretimi

Kalsiyum sülfonat bazlı kompleks greslerin organik ve oksidasyon kararlılığı, kimyasal olarak dayanıklılığı, suya, buhara, pasa, korozyona ve ısıya karşı direnci, yüksek basınç dayanımı, yüksek damlama noktasına ulaşması ve bu noktada yapısını kaybetmeden verim sağlamaya devam etmesi ayrıca ağır sanayide gelecekte kullanımının daha fazla gerçekleşebilecek olması sebebiyle, gres üretimi için hammadde seçimine önem verilmektedir. Gresler, baz yağı ve kalsiyum hidroksitin reaksiyonu sonucu oluşan sabunlaşmanın, karıştırıcı ve ısıtma işlemi ile birlikte katkıların da eklenmesiyle ortaya çıkan ürünün homojenize edilmesinden sonra hava alma işlemi sonucunda elde

edilir. Reaksiyon sonucunda ortaya çıkan metal sabunu ve su nötrdür. Bu sebeple kimyasal reaksiyona nötralizasyon reaksiyonu da denilmektedir [11].

Tablo 1. Kalsiyum sülfonat gres karışabilirliği [10]

	Metal sabunlu yağlama gresi				Kompleks sabunlu yağlama gresi					Sabunsuz yağlama gresi		
	Al	Ca	Li	Na	Al C	Ba C	Ca C	Li C	Na C	Bentonit	Poliüretan	PTFE
Al		*	+	*	+	+ -	+	+	+ -	-	-	+
Ca	*		+	+	+	+	+	*	+	+	+	+
Li	+	+		-	+	+	+	+	-	-	-	+
Na	*	+	-		+	+	*	*	+	-	+	+
Al C	+	+	+	+		+	+ -	+	+ -	-	-	+
Ba C		+	+	+	+		+ -	+ -	+	+	-	+
Ca C	+	+	+	*	+ -	+ -		+	+	+ -	+	+
Li C	+	*	+	*	+	+ -	+		+ -	+	+ -	+
Na C		+	-	+	+ -	+	+	+ -		-	+	+
Bentonit		+	-	-	-	+	+ -	+	-		+	+
Poliüretan		+	-	+	-	-	+	+ -	+	+		+
PTFE	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

“+” karışabilir, “50:50 karışabilir, “+ -” kısmen karışabilir, “*” karışamaz.

Homojenizasyon adımı gres üretiminde oldukça önemli bir aşamadır. Gresin homojenleştirilmesi içerisinde bulunan katı partiküllerin parçalanması sonucunda oluşan küçük partiküller sıvı içinde homojen olarak dağıtılmaktadır. Bu parçalama işlemi aynı zamanda topraklanmayı en aza düşürerek, büyük tanecikleri ortadan kaldırıp pürüzsüz bir ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Belirli tipteki greslerin homojenizasyonu sonuç gresi sertleştirerek daha düşük penetrasyon değeri vermektedir. Homojenizasyon işlemi, gres dokusunu iyileştirerek gresin görünümünü parlaklaştırabilir [9].

Greslerin yapısal özellikleri ve performanslarını belirlemek amacıyla en sık yapılan analizler penetrasyon analizi, damlama noktası analizi, dört bilya testi ve suya dayanıklılık testidir.

Penetrasyon analizi, greslerin sertliğini dolayısıyla kıvamını belirlemeye yardımcı olmaktadır. Üretilen ürünün kıvamı özellikle kullanılacak sektöre göre merkezi yağlama sistemlerinde pompalanma açısından ve aynı zamanda sistemde kullanıldıkça ürünün mekanik stabilite değerlerini de verebilen, gresin kıvamlılığını belirleyen analizdir. Penetrasyon değerine göre NGLI tarafından belirlenmiş numaralara göre gres kıvamlılığı Tablo 2’de verilmiştir.

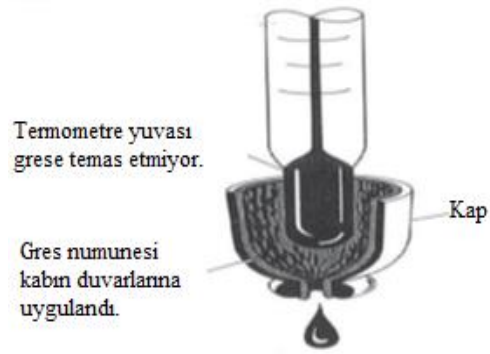
Damlama noktası analizi, gresin maksimum çalışma sıcaklığını belirlemeye yardımcı olan önemli parametrelerden biridir. Damlama noktası, gresin yapısal özelliklerini koruduğu üst çalışma sınırını belirler, fakat gresin kullanılabilceği maksimum seviyeyi belirlemez.

Damlama noktasına yaklaşıldığında veya damlama noktası geçildiğinde gresler çok belirgin olarak davranış farklılıkları gösterirler. Damlama noktası kısa süreli aşılsa gresin sızdırmazlık özelliğine bağlı olarak ani ve sert akmalar olabilir (Şekil 3). Mackwood [9] yapmış olduğu çalışmada damlama noktasının gres üzerindeki öneminden bahsetmiştir. Çalışmada hammaddelere yapılan analizler sonucunda bir performans göstergesi olmasından ziyade damlama noktası analizinin uygun kalınlaştırıcı oluşumunu teyit etmeye yönelik bir kalite kontrol parametresi ve gresin çalışma sıcaklığını belirlemeye yardımcı bir parametre olduğu görülmektedir.

Dört Bilya testi, gresin kaynaklanmaya başladığı yükü belirlemek için yapılmaktadır. Ağır sanayi ve yüksek basınç altında çalışılan gresler için Dört Bilya Testi oldukça önemli bir testtir. Bu test sayesinde ağır sanayide yüksek hızlı çalışan makinelerin yükü tolere edebilmesi, kullanılan yağ ile doğrudan ilişkili ve bakım maliyetlerini minimuma düşürmede önemli bir faktör olan ekstra yük dayanımı incelenip değerlendirilmesini sağlamaktadır [12]. Yüksek basınçlarda kullanılacak olan gresin cm²de kaç Newton yüke dayandığı ve filmin yapısının bozulmaması ölçüsüne dayanan dört bilye kaynaklanma yükü hakkında birçok standart ve çalışma bulunmaktadır [13–16]. Test esası, yüksek basınç altında kullanılan rulmanların bilyeleri üzerinde oluşan mikro pitting denilen küçük çiziklerin ölçüsünü ve boyutlarını belirleyen dört bilye aşınma çapı testine dayanmaktadır [17–19].



(a)



(b)

Şekil 3. a) Damlama noktası cihazı ve analizi, b) Damlama noktası analizi [9]

Tablo 2. NGLI tarafından belirlenmiş numaralara göre gres kıvamlılığı [9]

NLGL	ASTM İŞLENMİŞ PENETRASYON mm/ 10, 25 °C	KIVAM
000	446-475	Sıvı
00	400-430	Hemen Hemen Sıvı
0	355-385	Yarı Sıvı
1	310-340	Çok Yumuşak
2	265-295	Yumuşak
3	220-250	Yarı Katı
4	175-205	Katı
5	130-160	Çok katı
6	85-115	Sert



Suya dayanıklılık testi uzun süre su muamelesine maruz kalan greslerin sistemlerde nasıl tepki vereceğinin ölçülmesi açısından önemli olan performans testidir. Su, yatakların, saklama kaplarının veya diğer gres tutma cihazlarının eksik sızdırmazlığı nedeniyle yağlama gresine karıştığı için makinenin çalışmasını engelleyen en yaygın kirleticilerden biridir. Su kirliliği genellikle gresin reolojik ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirir ve yoğunlaştırılmış korozyon, oksidasyon, sızıntı ve yağ akışı kısıtlaması yoluyla ekipmanın daha hızlı arızalanmasına yol açmaktadır [20–22].

Çalışmanın amacı, baz yağa katkı maddeleri ilave ederek oluşturulan kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gresin performans özelliklerini arttırmaktır. Bu kapsamda sentezlenen yeni gres üzerinde penetrasyon analizi, viskozite analizi, damlama noktası analizi, 4 bilya aşınma testi ve 4 bilya kaynaklanma yükü testleri uygulanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kimyasallar ve Analizler

Baz Yağları: Tüpraş'tan temin edilen ham yağın rafine edilmesiyle elde edilen bir baz yağ olan Bright Stock baz yağı referans yağ olarak kullanılmıştır. Sentetik olan bright stock baz yağların molekülleri, petrol esaslı yağlarda bulunan doğal moleküllerden farklı olarak düzenlenmiş moleküllerdir.

Katkı Maddeleri: Ana baz yağı olarak kullanılan Bright Stock baz yağına performans katkıları eklenmiştir. Baz yağı olarak kullanılan Bright Stock referans alınarak içeriğine farklı performans katkıları eklenerek denemeler yapılmıştır. Hidrostearik asit (12 HSA), fosforik asit, izopropil alkol (IPA), kalsiyum karbonat, borik asit ve molibden disülfid katkı maddeleri olarak kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen sonuçlara göre Bright Stock içerisine eklenen ve sanayi tarafından en çok talep edilen performans katkı oranları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Optimum şartları elde ettiğimiz kalsiyum

sülfonat bazlı kompleks gres için bu maddelerin çözeltideki ağırlıkça yüzdesel oranları sırasıyla yaklaşık olarak 0,029, 0,016, 0,015, 0,009, 0,004, 0,002'dir (Tablo 3).

Tablo 3. Kalsiyum sülfonat kompleks gres hazırlamada kullanılan maddelerin yüzdesel oranları

Kullanılan maddeler	%
Baz yağ	92,5
12 hidro stearik asit (12 HSA)	2,9
Fosforik asit	1,6
İzopropil alkol (IPA)	1,5
Kalsiyum karbonat	0,9
Borik asit	0,4
Molibden disülfid	0,2

Laboratuvar Gres ve Yağ Reaktörü: Greslerin sentezlenmesi için gres ve yağ reaktörü kullanılmıştır. Isıtma sistemi bulunan bu reaktörler, üretilen gres yağlarının yapısı ve ürün tekniği açısından farklı bir prosestir. Reaktör 50 L hacim kapasitelidir. Gücü 0,75-115 kW arasında değişmektedir. Paslanmaz çelikten özel olarak üretilmiştir.

Laboratuvar Tipi Homojenizatör: Greslerin homojenizatörden geçirilerek özellikleri her noktada aynı olan homojen gresler elde edilmesi için kullanılmıştır. Kullanılan homojenizatör, 2,2 kW güce sahiptir. İki pistonlu olarak üretilmiştir. 482 mm uzunlukta, 545 mm genişlikte ve 485 mm derinliktedir. Ağırlığı 110 kg'dır. 500-1500 Bar basınç aralığında çalışmakta olup 20-50 L arasında hacim kapasitesindedir. Homojenizatörler proses kararlılığını artırarak hassas ve kalite ürün üretimine katkıda bulunmaktadır.

Penetrometre ve Pirinç Koni: Penetrasyon analizi için SYD-2801C tipi Shanghai Changji Geological marka penetrometre kullanılmıştır. 25 °C ± 0.1 °C sabit sıcaklık banyosuna yerleştirilen numune, 150 gram standart koni yükü ile dikey harekette belirgin bir sürtünme olmaksızın 5 saniye içinde gres veya gres derinliğine batırılarak ölçüm yapılmaktadır. Bu şekilde gresin yumuşaklık derecesi belirlenmektedir.

Damlama Noktası Analiz Cihazı: Greslerin maksimum çalışma sıcaklığının belirlenebilmesi için PT-HK-2019 High Temperature Dropping Point Apparatus marka Damlama Noktası Cihazı Kullanılmıştır.

Suya Dayanıklılık Analizi: Greslerin suya dayanıklılığı belirlemek için, Water Washout for Lubricating Grease IP 215 cihazı kullanılmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Penetrasyon Analizi

NLGI derecesi olarak da bilinen bu analiz ASTM D217 Standartlarına göre yapılmıştır [23]. ASTM standartları tarafından belirlenen penetrasyon tayininde katkı maddelerinin eklenme sırası, blok penetrasyon prosedürü, işlenmiş penetrasyonlar, yağlama greslerinin kontrolü vb. uygulamalara göre yapılmıştır. Gres kıvamının ölçüsünü tespit etmek üzere yapılan Gres worker-Penetrasyon Analizi, işlenmiş penetrasyon değeri standart bir gres çalıştırıcısında 60 çift darbeden sonra ölçülmüştür ve sıcaklık 25±0,1 °C'de sabit tutulmuştur. Analizde SYD-2801C tipi penetrasyon cihazı kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Penetrasyon analiz cihazı (SYD-2801C tipi Shanghai Changji Geological)

2.2.2. Damlama Noktası Analizi

Damlama noktası analizi prosedürleri ASTM D2265 standartlarına göre belirlenen ölçüm değerlerine göre test edilmiştir. Ürünümüze yaptığımız testler sonucunda damlama noktası 315 °C ile kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gresin yüksek damlama noktasına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

2.2.3. Dört Bilya Testi

ASTM D 4172 standardıyla yapılan Dört Bilya Testi üretilen ara ürünlerin ilk kontrolleri sırasında kullanılmıştır. Ürün oluşturulurken rakip ürünlerle farkını üretim esnasında görerek, yüksek basınç ve aşınma önleme performanslarını ölçmek için kullanılmıştır. Gün içerisinde 6 – 10 saat aralığında yapılan bu test sonucuna göre ürüne ek performans kullanım ihtiyacı belirlenmektedir.

2.2.4. Suya Dayanıklılık Testi

ASTM D 1264 standartlarına uygun olarak yapılan suya dayanıklılık testi, uzun süre su muamelesine maruz kalan greslerin sistemlerde nasıl tepki vereceğinin ölçülmesi açısından önemli olan performans testidir. Su, gres içinde çözülüp doyma noktasına ulaştığında su emülsifiye edilir ve görünüm değişir. Suya maruz kalmayan ve farklı oranlarda suya maruz kalan gresin görüntüsündeki değişim Şekil 5'te verilmiştir [20]. Emülsifiye hale gelmiş serbest su, gresin kullanıldığı yataklarda film oluşumunu azaltır ve aşındırıcı bir hasar oluşturur. Bu yüzden gresin yapısının suya dayanıklılığı, kullanıldığı ekipmanın ömrünü etkileyen önemli bir faktördür. Suya dayanıklılık testinin yanı sıra suyla yıkama direnci, su emme, suda çözünürlük, su emilimi, su korozyon direnci de uygulanmaktadır [24]. Çeşitli hizmet türleri için yağlama gresleri, yukarıda açıklanan çeşitli su geçirmezlik özelliklerinden herhangi birine ihtiyaç duymayabilir. Suya dayanıklılığın gerekli olduğu belirli durumlar dışında bu parametreler kalite ölçütleri değildirler.



Şekil 5. %0 (sol), %1 (orta sol), %10 (orta sağ) ve %50 (sağda) su ile kirlenmiş kalsiyum sülfonat gresi

3. Bulgular

Hammadde seçimlerinde, ek performans katkı maddelerine ihtiyaç duymadan yüksek pas ve korozyon direnci, yüksek yük dayanımı özelliklerini sağlayıcı, kuru yağlayıcılık özelliği ile üretilecek olan gresin kullanım ömrünü uzatacak ve iki yağlama periyodu göre daha yüksek olduğu, dolayısıyla ekstra bir yoğunlaştırıcı maddeye ihtiyaç duyulmadığı gözlemlenmiştir. Baz yağlar, nihai üründe aranan viskoziteye bağlı sınıflandırılırlar ve viskozite değerlerine göre ticari işleme tabi tutulurlar. Yağ sanayisinde en çok işlem gören baz yağı Bright Stock ve baz yağa ağırlıkça farklı yüzdelerde ilave edilen farklı katık maddeli yeni gres için yapılan viskozite ölçümü sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bright Stock ve yeni üretilen grese ait viskozite ölçüm sonuçları.

	Birim	Standart Değerler	Sonuç Değerler		
			Referans Bright Stock gres	Yeni üretilen kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gres	
Kinematik Viskozite (40 °C) (cSt)	mm ² /s	Raporlanır	450	573,65	TS 1451 EN ISO 31014 ASTM D445
Kinematik Viskozite (100 °C) (cSt)	mm ² /s	32-36	30	34,08	TS 1451 EN ISO 31014 ASTM D445
Viskozite İndeksi	mm ² /s (cSt)	Min.90	95	95,12	TS ISO 2909 ASTM D2270

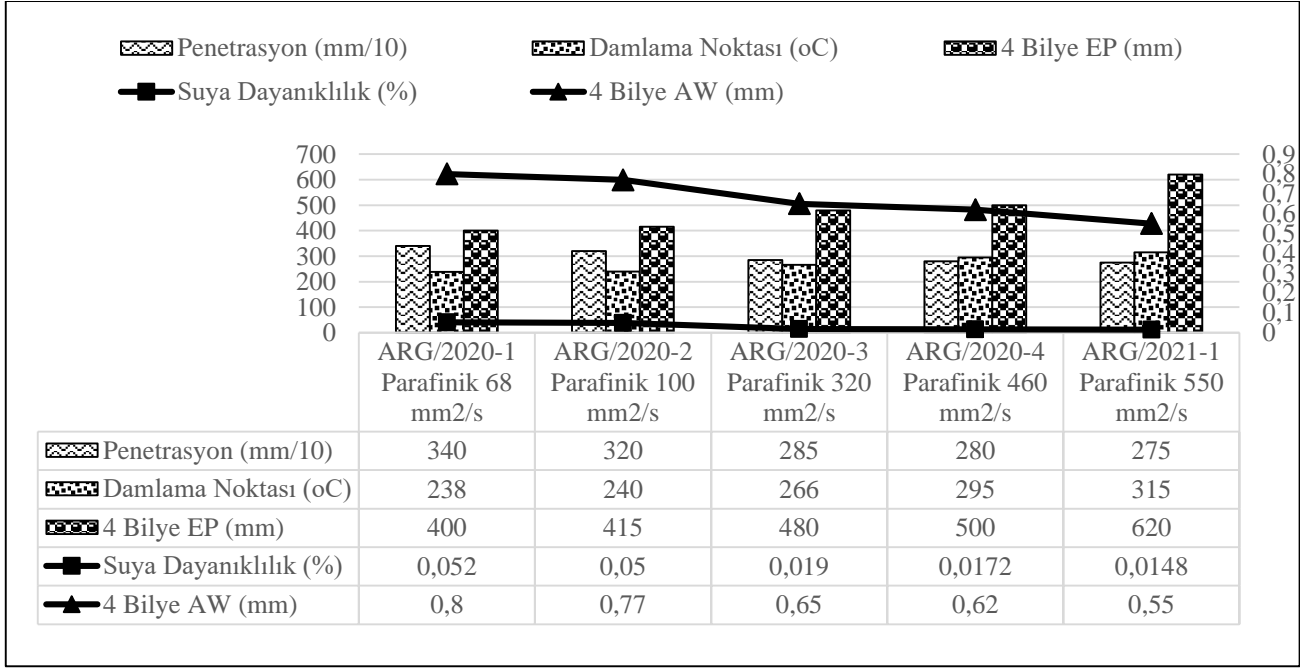
Çalışmada ana baz yağına eklenen katıklar ve kıvam artırıcılar sonucunda oluşan kalsiyum sülfonat bazlı kompleks grese sıcaklık sabit tutularak farklı viskozite değerlerinde Penetrasyon Analizi, Damlama Noktası Analizi, Dört Bilya Testi, Suya Dayanıklılık (water washout) Analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Penetrasyon analizinde sıcaklık sabit tutularak, farklı viskozite oranlarına sahip baz yağlarına deneme parametreleri yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda baz yağlarının kinematik viskozitesi arttıkça, penetrasyonda bir azalma gözlenmiştir [25,26]. Örneğin, kinematik viskozitesi 550 mm²/sn olan baz yağı, en düşük penetrasyon değerine sahipken, kinematik viskozitesi 68 mm²/sn olan baz yağı ise en yüksek penetrasyon sonucunu vermiştir (Şekil 6). Elde edilen yüksek penetrasyon değerinin çalışmamızda NGLI tarafından belirlenen değerlere göre kıvam olarak 275-340 mm/10 aralığında

olduğu ve yumuşak, çok yumuşak ve yarı sıvı kıvamı verdiği tespit edilmiştir (Tablo 2). Dolayısıyla Rulman ve düz yatakların yağlanmasında kullanımı uygundur. Penetrasyon, işlenmiş ve işlenmemiş olarak ölçülebilir. Baz yağlarına kinematik viskozitesi 40 °C'de sabit tutularak yapılan damlama noktası analizinde yapılan deneme parametrelerinde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, kinematik viskozite arttıkça damlama noktası sıcaklığının arttığı sonucuna varılmıştır [27,28]. Elde edilen sonuç değerlendirildiğinde ürünün performansını kaybetmeden çalışabileceği maksimum sıcaklık damlama noktası testleri kullanılarak 315 °C olarak belirlenmiştir (Şekil 6). Kinematik viskozite arttıkça su ile sürüklenmeye karşı gösterilen direnç de artmaktadır [20].

4. Sonuçlar

Yapılan analizler sonucunda optimum şartları sağlayan malzeme bileşenleri tespit edilmiştir. Ardından bu oranlarda elde edilen kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gresin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Viskozitenin azalması ile penetrasyonda bir artış meydana gelmiştir. Penetrasyondaki bu artış, gresin sertliğinde de artış demektir ve bu durumda sızdırmazlık artmaktadır. Damlama noktası sıcaklığı viskozite arttıkça bir artma eğilimi göstermiştir. Dolayısıyla gresin katı halden sıvı hale geçtiği sıcaklık değeri yükselmiştir ve bu durum yüksek viskozitelerde daha yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı vermektedir. Gresin kaynaklanmaya başladığı yük de viskozite ile birlikte artış göstermiştir. Suya dayanıklılık penetrasyonun azalmasıyla ve damlama noktası sıcaklığının artmasıyla azalmıştır ve bu beklenen bir durumdur. Bununla birlikte aşınma önleyici miktarda ise

bir azalma söz konusu olmuştur. Elde edilen bulgulara göre, kalsiyum sülfonat bazlı kompleks gres için damlama noktası sıcaklığının belirli bir seviyeye kadar arttığı ve elde edilen en yüksek sıcaklıkta bile performansını kaybetmeden verimliliğine devam ettiği, sektör içerisindeki muadil greslere göre daha yüksek ve geniş çalışma sıcaklığına sahip olduğu gözlenmiştir. Kalsiyum sülfonat kompleks grese yapılan penetrasyon analizi sonucuna göre elde edilen gresin kıvamlılığının belirlenen referans değer aralığında olduğu ve bu aralıkta her NLGL derecesinde üretimin yapılabileceğini gözlenmiştir. Ayrıca yapılan bu analizler sonucunda kalsiyum sülfonat bazlı kompleks greslerin, diğer greslere göre daha zorlu şartlarda performans kaybı olmadan, verimliliğini kaybetmeden, hedeflenen değerleri verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu analizler endüstride kalsiyum sülfonat bazlı kompleks greslerinin seçimini desteklemektedir.



Şekil 6. Sabit sıcaklık (40 °C) ve farklı viskozite oranlarında kalsiyum sülfonat bazlı kompleks grese uygulanan analiz sonuçları.

Teşekkür

Çalışmalarımız esnasında yol gösterici desteğinden dolayı Sayın Doç. Dr. Oğuzhan İLGEN hocamıza teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Etik Standartlar Beyanı:

Bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmemektedir.

Kaynaklar

- [1] Bosman, R., Lugt, P.M., 2018. The Microstructure of Calcium Sulfonate Complex Lubricating Grease and Its Change in the Presence of Water. Tribology Transactions 61(5), 842–9.

- [2] Lubratech., 2019. Kalsiyum sulfonat bazlı nanotanecek içeren ağır sanayi kompleks greşler. Kocaeli.
- [3] Triboscience and Tribotechnology: Superior Friction and Wear Control in Engines and Transmissions | Project | Fact Sheet | IC-COST | CORDIS | European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/532/de>. [Erişim tarihi 16 Şubat 2022].
- [4] Kobylyanskii, E. v., Kravchuk, G.G., Makedonskii, O.A., Ishchuk, Y.L., 2002. Structure of Ultrabasic Sulfonate Greases. Chemistry and Technology of Fuels and Oils 2002 38:2 38(2), 110–4.
- [5] Lorimor, J.J., Americas, A., Kansas, L., Kay, J.S., n.d. “The STRATCO ® Contactor™ reactor and its use in the production of calcium sulfonate based greases.”
- [6] Elalan, N.T., Tüken, T., 2014. Metilendifenildiizosiyanat-primer amin reaksiyonları ile sabunsuz greş eldesi. Ç. U. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 31(3).
- [7] Fan, X., Li, W., Li, H., Zhu, M., Xia, Y., Wang, J., 2018. Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases. Tribology International 118, 128–39.
- [8] Choosing the Right Grease Thickening System. <https://www.nyelubricants.com/choosing-the-right-grease-thickening-system>. [Erişim tarihi 16 Şubat 2022].
- [9] Mackwood, W., 2016. Meet The Presenter Classifying Greases.
- [10] NSK Avrupa., 2021. Greş Uyumsuzluğu. https://www.nskeurope.com.tr/content/dam/nskcmsr/downloads/literature_bearing/P_TI-0002_TR.pdf. [Erişim tarihi 3 Mart 2021].
- [11] Dresel, W., 2014. Lubricating Greases. Encyclopedia of Lubricants and Lubrication, 1076–96.
- [12] Rounds, F., 1993. Effects of hydroperoxides on wear as measured in four-ball wear tests. Tribology Transactions 36(2), 297–303.
- [13] ASTM, I., 2002. Standard Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Grease (Four-Ball Method).
- [14] Klueber., 2021. Lubricating Testing - Focussing on mechanico-dynamical tests. <http://www.klueber.co.kr/index/images/pdf/Lubricant-testing.pdf>. [Erişim tarihi 27 Ocak 2021].
- [15] ASTM, D., 2019. 19b Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease. <https://www.astm.org/Standards/D217.htm>. [Erişim tarihi 27 Ocak 2021].
- [16] Al-Mosawi, Z.H.A., 2009. Influence of Some Additives on Properties of Greases.
- [17] Soltanahmadi, S., 2017. Tribochemical investigation of micropitting in rolling-element bearing applications: the influence of lubricant additives and water contamination, Doktora Tezi, Leeds Üniversitesi.
- [18] Brizmer, V., Pasaribu, H.R., Morales-Espejel, G.E., 2013. Micropitting Performance of Oil Additives in Lubricated Rolling Contacts. Tribology Transactions 56(5), 739–48.
- [19] Soltanahmadi, S., Morina, A., Van Eijk, M.C.P., Nedelcu, I., Neville, A., 2017. Tribochemical study of micropitting in tribocorrosive lubricated contacts: The influence of water and relative humidity. Tribology International 107, 184–98.
- [20] Gurt, A., Khonsari, M., 2020. An Overview of Grease Water Resistance. Lubricants 8(9), 86.
- [21] Fitch, J., 2008. How Water Causes Bearing Failure. Machinery Lubrication Magazine.
- [22] Duncanson, M., 2005. Detecting and Controlling Water in Oil. Machinery Lubrication Magazine.
- [23] 2021. Grease Penetration Tests. <https://www.machinerylubrication.com/Read/30271/test-grease-consistency>. [Erişim tarihi 27 Ocak 2021].
- [24] Water Resistance. <https://www.nlgi.org/grease-glossary/water-resistance/>. [Erişim tarihi 6 Aralık 2021].
- [25] Wang, Z., Xia, Y., Liu, Z., 2015. The rheological and tribological properties of calcium sulfonate complex greases. Friction 3(1), 28–35.
- [26] Saal, R.N.J., Labout, J.W.A., 1936. The relation between absolute viscosity and penetration of asphaltic bitumens. Journal of Applied Physics 7(11), 408–12.
- [27] Suetsugu, Y., Sekiguchi, H., Nakanishi, Y., Fujinami, Y., Ohno, T., 2013. Basic study of grease rheology and correlation with grease properties. Tribology Online 8(1), 83–9.
- [28] Kamel, B.M., Mohamed, A., El Sherbiny, M., Abed, K.A., 2016. Rheology and thermal conductivity of calcium grease containing multi-walled carbon nanotube. Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures 24(4), 260–5.



Rüzgar Enerji Santrallerinin Elektrik Şebekesine Etkilerinin İncelenmesi

Investigation of Wind Power Plants Effects on Electric Distribution System

Emine AMAL^{1*} , Kadir YILMAZ² , Engin ÖZDEMİR³ 

¹ Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-3381-2836

² Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-0819-3420

³ Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-0882-332X

Derleme

Gönderilme Tarihi : 31/03/2022

Kabul Tarihi : 03/06/2022

Anahtar Kelimeler

Gerilim Kararlılığı
Güç Kalitesi
Reaktif Güç Desteği
Rüzgar Enerjisi
Şebeke Entegrasyonu

Özet

Rüzgar enerjisinin elektrik üretiminde kullanımının küresel çapta artmasına paralel olarak Türkiye’de de son yıllarda rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi oldukça artmıştır. Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin elektrik üretimindeki payı (2021 ilk yarısından itibaren rüzgar gücü 10,585 MW ile) tüm ihtiyacın %9,22’sini karşılar hale gelmiştir. Ülkemizde son dönemde Rüzgar Elektrik Santralleri (RES) lisans başvurularında önemli artışlar yaşanmış olup, bu santrallerin enterkonnekte sisteme bağlantı kriterleri ve sistem işletmeciliği üzerindeki etkileri daha büyük önem kazanmıştır. Rüzgar türbinlerinin zaman içinde ürettiği güç, birincil enerji kaynaklarının öngörülemez doğası nedeniyle karakteristik olarak dengesizdir. Bu durum, yalnızca çok sayıda rüzgar türbininin elektrik güç şebekesine entegrasyonundaki sorunları artırarak, katkılarının yönetilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Önceleri dağıtım sistemine bağlanan RES’lerde sadece gerilim kalitesi ilk aranan durumken şimdiki değişen yönetmelige göre RES’lerden güç sisteminin dengesi konusunda katkı yapması beklenmektedir. RES’lerin arıza sonrası sisteme katkısı, gerilim, frekans etkileri ve aktif güç kontrolü özellikleri belirlenerek Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliğinde gerekli düzenlemelere gidilmiştir. Bu makale, rüzgar enerjisinin güç sistemlerine entegrasyonu ile ilgili temel teknik zorlukları ve önerilen çözüm metodolojilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu zorluklar arasında güç kalitesi sorunları, güç dengesizlikleri (şebeke kararlılığı), reaktif güç desteği, arızadan kurtulma yeteneği gözden geçirilmiştir ve tüm zorluklar tartışılmıştır. Rüzgar enerji santrallerinin artan güçlerle enerji sistemine entegrasyonu Türkiye Elektrik İletim Sistemine etkileri ve bağlanma kriterleri gözden geçirilmiştir. Entegrasyon zorluklarını azaltmak için enerji depolama sistemleri, şebeke kodları ve yenilebilir enerji politikaları önemine değinilmiştir. Böylece, politika yapımcılar ve araştırmacılar bu çalışmayı gelecekteki enerji stratejilerini geliştirmede ve rüzgar enerjisi entegrasyon zorluklarının tam anlamıyla görmelerine yardımcı olacaktır.

Review Article

Received Date : 31/03/2022

Accepted Date : 03/06/2022

Keywords

Voltage Stability
Power Quality
Reactive Power Support
Wind Energy
Grid Integration

Abstract

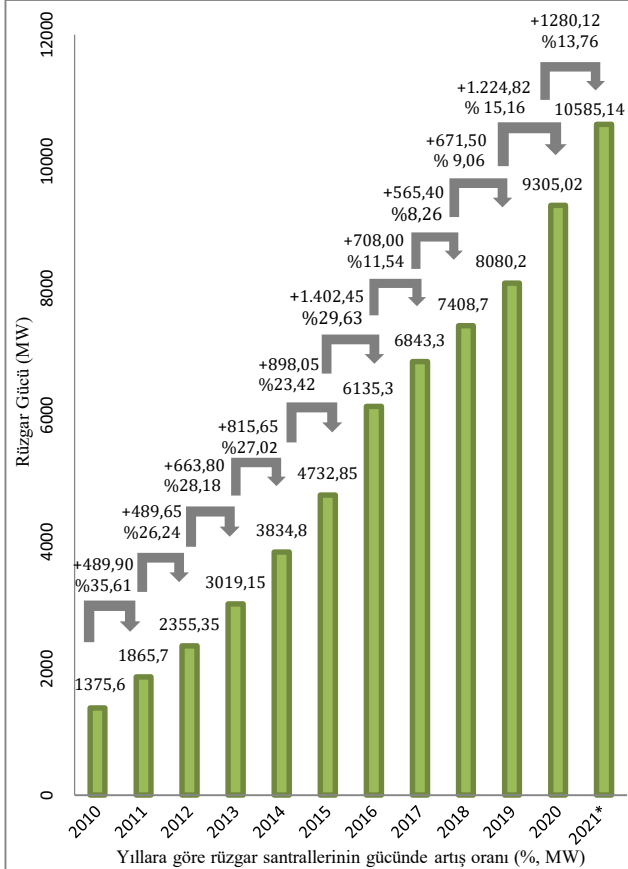
In parallel with the global increase in the use of wind energy in electricity generation, the electrical energy obtained from wind has increased considerably in Turkey in recent years. Share of wind power plants in electricity production in Turkey as of 2021, wind power has come to meet 9.22% of all needs with 10,585 MW. In our country, there has been a significant increase in license applications for Wind Power Plants (WPP) recently, and the connection criteria of these power plants to the interconnected system and their effects on system operation have gained greater importance. The power generated by wind turbines over time is characteristically unstable due to the unpredictable nature of primary power sources. This only exacerbates the problems inherent in the integration of large numbers of wind turbines into power grids, making their contribution extremely difficult to manage. While only the voltage quality was the first thing sought in WPPs connected to the distribution system, it is expected from WPPs to contribute to the balance of the power system according to the current changing regulation. The contribution of WPPs to the fault ride through system, voltage and frequency effects, and active power control features were determined and necessary arrangements were made in the Electricity Market Grid Code. This article aims to examine the main technical challenges and proposed solution methodologies related to the integration of wind energy into power systems. Among the various challenges, power quality issues, power imbalances (grid stability), reactive power support, fault recovery capability are reviewed and all challenges are discussed. Integration of wind power plants into the energy system with increasing power. The effects and connection criteria of the Turkish Electricity Transmission System have been reviewed. The importance of energy storage systems, grid codes and renewable energy policies are mentioned to reduce integration difficulties. Thus, policy makers and researchers will use this work to help develop future energy strategies and to take a full view of the wind energy integration challenges.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): emineamal1980@gmail.com

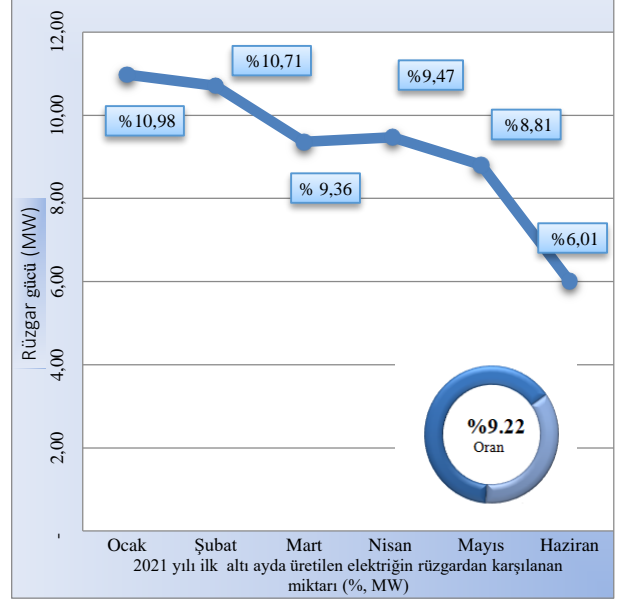


1. Giriş

Rüzgar enerjisi üretimi küresel olarak sürekli gelişmektedir ve bu alana yoğun yatırım yapan ülkelerin çoğunda şebekenin işleyişi önemli bir bileşen haline gelmiştir. Rüzgar enerjisi üretiminin dünya çapındaki yıllık büyümesi, onun güç sistemine etkisini ve genel enerji arzına katkısını artırmaktadır. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin raporuna göre rüzgar enerjisi santrallerinin elektrik üretimindeki payı 2021 yılı ilk yarısında devreye alınan 1.280 MW ile rüzgar kurulu gücü toplam 10.585 MW'a ulaşmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi son on yılda kurulu rüzgâr santrallerinin gücünde önemli oranda artış sağlanmıştır. 2021 yılı ilk yarısında rüzgardan elde edilen elektrik toplamı 13 milyon 751 bin 842 MWh erişirken bu miktar Türkiye'de üretilen toplam elektriğin %9,22'sini oluşturmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi Ocak ayında Türkiye'de elektriğin %10,98'i rüzgardan karşılanmıştır [1]



Şekil 1. Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin için kümülatif kurulum [1].



Şekil 2. Türkiye'de rüzgar enerji santrallerinin 2021 yılı ilk altı dönemdeki elektrik üretimindeki payı

Ülkelerin temiz enerjiye geçiş politikaları ve mevzuatı, gelecekte daha fazla rüzgar enerjisi projesine katkıda bulunmakta ancak yüksek kurulu güçlere sahip rüzgar çiftliklerinin şebeke bağlantıları büyük bir sorun haline geldiği görülmektedir. Rüzgar santrallerinin şebeke ile entegrasyonunda santralin bağlanacağı baranın kısa devre gücü, şebeke empedans açısı, rüzgar türbini karakteristikleri ve jeneratör teknolojisi de belirleyici bir unsurdur. Rüzgar santrallerinin arıza sonrası sisteme katkısı, gerilim, frekans tepkileri ve aktif güç kontrolüne ilişkin talepler belirlenerek bu yönde Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliğinde gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Şebeke yönetmeliklerindeki talepler, özellikle sürekli ve geçici rejimde gerilim kararlılığı problemini çözmek için reaktif gücü desteklemek odaklıdır. Rüzgar santrallerinin sisteme bağlandıkları noktada meydana gelen bir gerilim düşümü esnasında santrallerin aktif güç vermeye devam etmeleri ve gerilim düşümünün en kısa sürede temizlenmesine yönelik şebekeye reaktif güç enjekte etmeleri yönetmeliklerle zorunlu kılınmıştır.

Literatür incelendiğinde, Yuan-Kanh Wu ve arkadaşları Türkiye dâhil dünya genelinde birçok ülkedeki şebekeye yönetmeliklerini incelemiş en önemli parametrelerin frekans kontrolü, reaktif güç sorunları, arıza sonrası sisteme katkı ve güç kalitesi olduğunu ortaya koymuştur [2]. Ahuja ve arkadaşları Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü (ÇBİJ) ile Sabit Miknatıslı Senkron Jeneratör (SMSJ) kullanılan rüzgâr türbinlerini karşılaştırmış ve enerji kalitesi yönünden ÇBİJ'in daha iyi olduğunu saptamışlardır. Bunun sebebini de ÇBİJ'ün statoru direkt şebekeye bağlıyken, akıma ve

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): emineamal1980@gmail.com

gerilime bozucu etkisi olan güç dönüştürücülerinin rotor tarafında enerji üretiminin sadece küçük bir bölümünü oluşturması olarak yorumlanmışlardır [3]. Shaker D. Ahmed ve arkadaşları Rüzgar enerji üretim payı yüksek olan ülkelerin şebekeye entegrasyon zorluklarını detaylı incelemiş, zorluklarla baş edebilmenin en önemli kriterleri olan ülkelerin şebeke kodları, yenilebilir enerji stratejileri ve enerji depolamanın önemini ortaya koymuşlardır [4]. Papathanassiou ve Tsili, yine dünya genelinde ülkelerin yüksek gerilim seviyesinde şebeke uyumluluk kriterlerini karşılaştırmış mevcut rüzgâr türbin teknolojilerinin 5-10 yıl içerisinde şebeke yönetmeliklerinin etkisiyle pozitif anlamda gelişeceğini ve istenilen tüm gereksinimlere karşılık verebilecek durumda olacağını belirtmişlerdir [5]. Mehmet Akif Ak, rüzgar santrallerinin şebekeye etkilerini ve entegrasyon sürecini araştırmış, rüzgar santralının şebekeye en uygun şekilde bağlanabilmesi için aktif, reaktif güç değişimi kaynaklı istenmeyen gerilim değişimlerinin önlenmesi, şebeke kısa devre limitlerinin zorlanması, harmoniklerin minimum seviyede tutulması ayrıca anahtarlama olaylarından kaynaklı şebekenin kararsız duruma gitmesinin önlenmesi gerektiği sonucunu paylaşmıştır [6].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Rüzgar enerjisi entegrasyonunun zorlukları kapsamlı bir şekilde tartışılrsa da, rüzgar enerjisinin artış hızı ile bu zorluklar arasındaki ilişki henüz netlik kazanmamıştır.

Bu makalede, rüzgar enerjisi sistemlerinin şebekelere entegrasyonu nedeniyle karşılaşılan, güç tahmini, gerilim/reaktif güç desteği, frekans kararlılığı, harmonikler, güç kalitesi sorunları, sinyal kararlılığı, alçak gerilimde kalabilme yeteneği, koruma, planlama ve bunlarla sınırlı olmayan diğer zorluklar detaylı olarak tartışılmıştır. Ayrıca bu zorlukların etkilerini azaltmak için rüzgar santrallerinin şebekeye bağlantı kriterleri ele alınarak araştırmacılara, gelecekteki enerji stratejilerini geliştirmede ve daha iyi sürdürülebilir politikalar benimseyebilmeleri için zorlukların tüm yönleri sunulmaktadır.

Böylece bu çalışma ile, gelecekte rüzgar enerjisinin artış hızı ile bu zorluklar arasındaki ilişkiyi bir bütün halinde görülmesi literatüre katkı olarak sunulmaktadır.

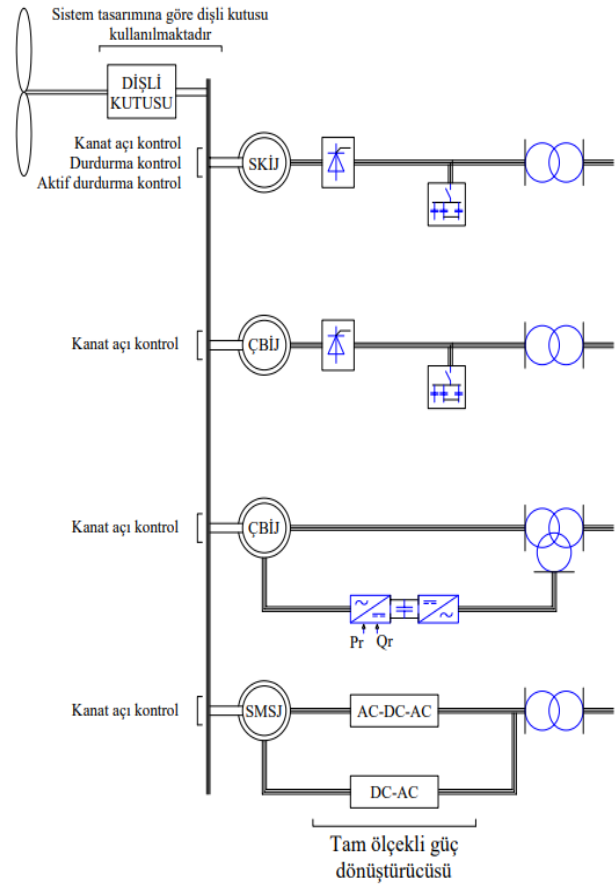
2. Rüzgar Türbin Teknolojileri

Bir elektrik jeneratörünün işlevi, ana hareket ettirici olarak rüzgar rotor türbininden gelen mekanik tork ile yerel yük veya elektrik şebekesi arasında bir araç veya enerji dönüşümü sağlamaktır. Rüzgar enerjisi üretimi için kullanılan dört farklı sistemin (tip 1, tip 2, tip 3 ve tip 4) jenerik modellerini geliştirilmiştir [7]-[8]. Rüzgar hızlarına göre Sabit ve Değişken hız olarak iki grupta incelenebilir. Modern rüzgar türbini sistemlerinde olası adaylar olan

yaygın AA jeneratör türleri aşağıdaki gibidir;

- Tip1: Sincap kafesli rotorlu indüksiyon jeneratörü;
- Tip2: Rotoru sargılı indüksiyon jeneratörü;
- Tip3: Çift beslemeli indüksiyon jeneratörü;
- Tip4: Senkron jeneratör (harici alan uyarıtlı) ve Sabit mknatıslı senkron jeneratör.

Rüzgar enerjisi sistemlerinin bazı yaygın tiplerini temsil eden basitleştirilmiş bir diyagram Şekil 3'te gösterilmektedir. Tasarım perspektifinden bakıldığında, bazı jeneratörlerin özel bir transformator aracılığıyla doğrudan şebekeye bağlı olduğu, diğerlerinin ise güç elektroniği devre elemanları içerdiği görülmektedir. Bununla birlikte, birçok tasarım, kontrol edilebilirliği ve çalışma aralığını iyileştirmek için güç elektroniği elemanları bulunmaktadır. Hangi bağlantı konfigürasyonu kullanılırsa kullanılsın, her türbinin kendisi, iletim sisteminin güç kalitesi üzerinde bir etkiye sahiptir. Rüzgar çiftliklerinin, elektrik sistemi kararlılığını korumak için gerilim, reaktif güç kontrolü, frekans kontrolü ve arızadan geçiş yeteneği sağlayabilmesi gerektiğini öne sürüyor [9].

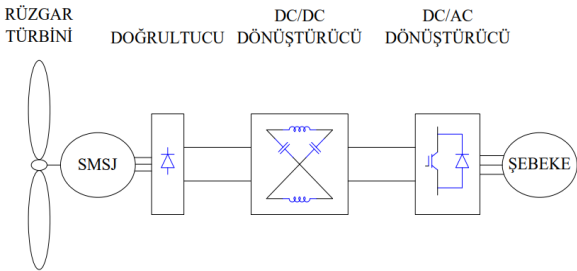


Şekil 3. Farklı tip Rüzgar Jeneratör sistemleri [9].

Sabit hızlı indüksiyon jeneratörlerine sahip rüzgar çiftlikleri, gerekli gerilim veya frekans kontrolünü sağlayamadıkları için aşamalı olarak kaldırılmalıdır. Ayrıca sincap kafesli indüksiyon jeneratör reaktif güç tüketir. Bu yüzden sincap kafesli indüksiyon jeneratörün reaktif güç

tüketimi her zaman güç faktörünü bire yaklaştırmak için kapasitörler kullanılarak dengelenir. ÇBİJ sistemlerinde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanır. Rotor sargısı ise iki adet sırt sırta bağlı gerilim kaynaklı darbe genişlik modülasyon (DGM) tekniğini kullanan inverterden oluşan, dört bölgeli güç dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Genellikle, rotor tarafındaki dönüştürücü, elektromanyetik torku düzenler ve makinenin manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar [9]. Şebekeye bağlı sistemin dönüştürücüsü için geliştirilen kontrolörlere genel bir bakış da [10]'da tartışılmış ve ÇBİJ'nin artık reaktif gücün düzenlenmesi ve çıkış gücü verimliliğini en üst düzeye çıkarmak, açısız hızın ayarlanması için en verimli tasarıma sahip olduğunu göstermiştir. Bu jeneratörler ayrıca gerilim düşmelerinde de sisteme destek verebilmektedir. Bununla birlikte, dönüştürücü tabanlı sistemlerin dezavantajları, sisteme enjekte edilen harmonik bozulmalardır. Son zamanlarda önerilen Z-kaynaklı evirici (ZKE), tek kademeli bir yükseltici evirici olarak, şebekeye bağlı gelecekteki DÜ sistemleri için güç kalitesi problemlerini azaltmak için iyi bir aday olmaktadır [11].

Şekil 4'de görüleceği üzere Sabit mıknatıslı senkron jeneratörü (SMSJ) tam ölçekli dönüştürücü, dişli kutusu elimine edilmiş ve son yıllarda rüzgâr enerji sektöründe sürekli mıknatıslı kullanımı yönünde önemli bir eğilim bulunmaktadır. IGBT'lerin kullanıldığı DGM ile reaktif, aktif güç kontrolü sağlanırken iç harmonikleri de azaltmak için filtreler kullanılmaktadır. Bu sayede rüzgâr santrali şebeke uyumluluk standartlarını rahatlıkla sağlayabilmektedir [12].



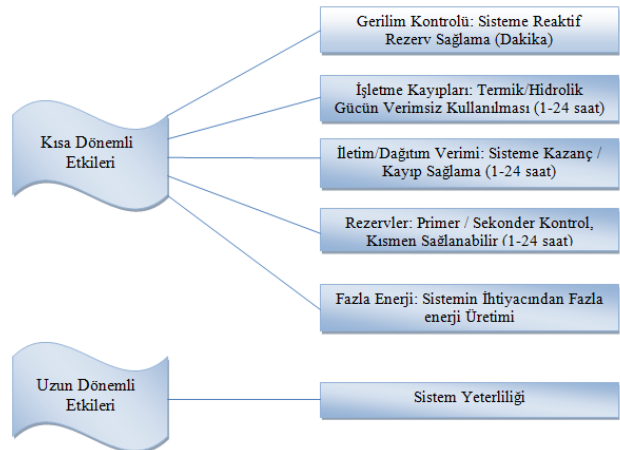
Şekil 4. DA yüksektici kıyıcı ve ZKE ile SMSJ tabanlı rüzgâr jeneratörü [9].

3. Rüzgâr Enerjisinin Şebekeye Entegrasyon Zorlukları

Rüzgâr enerjisi, temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak modern elektrik şebekelerine en önemli katkılardan biridir. Aralıklı türbin teknolojisi ve koruma sorunları dahil olmak üzere rüzgâr enerjisi sistemlerinin benzersiz özellikleri, şebekelere başarılı ve ekonomik entegrasyon için yeni zorluklar getirmektedir.

3.1. Çıkış Gücü Tahmini

Çok sayıda rüzgâr türbininin entegrasyonu durumunda, tahmin eksikliği, büyük miktarlarda eğirme rezervlerinin varlığını gerektirdiğinden, tahmin üretim maliyetini düşürmede önemli bir rol oynar. Ayrıca, öngörülemeyen rampa şeklindeki ani durumlar, şebekenin güvenilirliğini bozabilmektedir. Son olarak, bir elektrik kaynağı olarak rüzgâr türbinleri ile şebeke yönetimi için tahmin yapmak oldukça faydalı hale gelmiştir [13]. Rüzgâr hızı tahmin edilmesi en zor meteorolojik öğelerden biri olduğu için rüzgâr enerjisinin tahmini için ideal bir strateji yoktur. Her metodolojinin, belirli özel durumlarda makul, farklı durumlarda uygunsuz olabilen artıları ve eksileri vardır. Operasyon ihtiyacına bağlı olarak, tahmin, kısa vadeli (1-6 saat) ve uzun vadeli olmak üzere iki döneme ayrılmaktadır. Şekil 5'te, rüzgâr santrallerinin güç sistemi üzerine dönemsel etkileri gösterilmektedir. Elektrik enerjisinin tüketicilere minimum hata ile sunulması gerektiğinden herhangi bir hatanın ekonomik, sosyal ve politik etkileri yüksektir.



Şekil 5. Rüzgâr santrallerinin güç sistemi üzerine etkileri [14].

3.2. Reaktif Güç / Gerilim Desteği

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretmek için kullanılan makineler çoğunlukla, doğası gereği reaktif güç tüketen (yani uyarma için reaktif bir güç kaynağına ihtiyaç duyan) indüksiyon jeneratörleridir. Dolayısıyla senkron makineler gibi şebekeyi reaktif güçle destekleme avantajına sahip değildirler [15]. Hem aktif hem de reaktif güçleri desteklemek için ÇBİJ tabanlı rüzgâr türbinleri için kapasite geliştirme tekniği yoluyla arıza sürüşü önerilmektedir [16]. Rüzgâr türbin kontrol sistemlerinin doğru tasarımı, geleneksel jeneratörlerin yerini alarak rüzgâr santrallerinin optimum kullanımı için esastır. Ancak rüzgâr santrallerinin reaktif güç üretme veya tüketme yeteneği, şebekenin gücüne ve iletim hatlarının uzunluğuna bağlıdır. Yapılan çalışmalar

sonucu rüzgar türbinlerinin reaktif güç desteği sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kararsızlık problemlerini önlemek için rüzgar türbini ile ilişkili farklı reaktif güç kaynakları arasındaki koordinasyon esastır. Bir rüzgar türbini, reaktif güç üretme ve tüketme süreci yoluyla gerilim profilini geliştirerek şebeke tarafı esnekliğine katkıda bulunabilir.

Gerilimin çalışma sınırları içinde tutulması, özellikle yük veya güç üretimi ile ilgili yeni teknolojiler tanıtılırken her zaman kritik konulardan biri olarak kabul edilmektedir. Örneğin, rüzgar gücü çıkışının dalgalanması, rüzgar hızı ve üretim sisteminin türüne bağlı olarak gerilim dalgalanmalarına, titremelere neden olur. Sabit hızlı jeneratörler, rotorun hızına dayanan reaktif gücü tüketir. Bu jeneratörler, elektrik şebekelerinde gerilim dalgalanmasının ana kaynağıdır. Ayrıca rüzgar türbini ile şebeke arasındaki bağlantı noktasındaki kısa devre empedansı da gerilim dalgalanmalarına katkıda bulunan bir diğer temel faktördür. Rüzgar türbinlerinin zayıf şebelere entegre edilmesi durumunda önerilen çözümler arasında esnek AA iletim Sistemleri cihazlarının kurulması ve tesisin kontrol sistemlerinin modifikasyonu yer almaktadır [17]-[18].

Gerilim dalgalanmalarıyla başa çıkabilmek için yönetmelikte, şebekelerdeki yenilenebilir enerji oranının %20'yi geçmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır [19].

3.3. Frekans Etkisi

Rüzgar santrallerinin çoğunun kontrol stratejileri, rüzgar santrallerini azaltan herhangi bir arıza durumunda mekanik sistemi elektrik sisteminden izole eder ve şebeke ataletine katkıda bulunur. Üretilen güç ve talep edilen güç (yük ve şebeke kayıpları) arasındaki fark, sistem frekansında değişimlere yol açar. Üretilen gücün fazlalığı frekansta artışa, eksikliği ise düşüğe neden olur. Morren ve arkadaşlarına göre, rüzgar türbini merkezi kontrol ünitesine bir yardımcı kontrol cihazının eklenmesi, bir bozulma sırasında rüzgar türbini kütlesinden yararlanarak, tork ayar noktasını şebeke frekansının değişimine uyarlanabilir hale getirmek için değiştirebilir [20]. Başka bir kontrol stratejisi [21]'daki frekans salınımları sırasında şebeke frekansına dayalı olarak SMSJ'ün çıkış gücünü denetlemede kullanılmaktadır. Herhangi bir bozulma sırasında, rüzgar türbini geleneksel bir jeneratörü taklit edebilir ve rüzgar türbininin gizli kinetik enerjisinden yararlanarak atalet desteği sağlayabilmektedir. Rüzgar enerjisinin yüksek etkisinden kaynaklanan frekans bozulma problemini çözmek için enerji depolama sistemlerinin kullanımı, kinetik enerji çıkarma ve yük kontrolü gibi diğer çözümlerde uygulanabilir.

3.4. Harmoniklerin Etkisi / Güç Kalitesi Sorunları

Rüzgar türbinleri, şebekeye, kabul edilebilir güç kalitesinde elektrik sağlamalıdır. Düşük harmonik bozulum bu koşullardan biridir. Rüzgar türbinlerinin şebekeye entegrasyonu, farklı şebeke seviyelerinde harmonikler oluşturmaktadır. Harmonikleri analiz etmek, bunları azaltmak için çözümler geliştirirken emisyonlara katkıda bulunan unsurların bilinmesi gerekmektedir. Harmoniklerin kaynağı olan unsurlar, kollektör barasında kullanılan kablolar, türbin transformatörleri, filtreler, kapasitörler, güç faktörü düzeltme cihazları ve güç elektroniği dönüştürücüleridir. Literatür incelendiğinde, harmonikleri belirlemek için kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Harmonik güç akışı yöntemi, bozulmuş ve bozulmamış akım yöntemi, süperpozisyon yöntemi, Harmonik durum tahmin yöntemi, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu Standart normuna göre akım ve gerilim fazör yöntemi gibi yöntemler tartışılmıştır [22]. Ayrıca, rüzgar türbinlerinin iletim sisteminin kısa devre kapasitesine katkısı minimumdur, bu da iletim bağlantısını zayıflatır ve gerilimde artan harmonik seviyeleri ile sonuçlanır. Bir SMSJ rüzgar enerjisi santralının orta gerilim şebekesine entegrasyonu, 2 kHz ile 150 kHz frekans aralığında harmonikler üretir. Güç hattı iletişiminin etkin bir şekilde arızalanmasına neden olabilir. Reis A. ve arkadaşları [23], her bir rüzgar türbini tarafından üretilen akım harmoniklerini azaltmak için filtrelerin fonksiyonlarını tam dönüştürücü rüzgar türbinlerine entegre etmek için bir kontrol stratejisi oluşturmuşlar. Geliştirilen strateji, inverter geriliminin açısını ve genliğini düzenleyerek akım harmoniklerini azaltır, böylece bara invertör geriliminden farklı harmonikleri ortadan kaldırmaktadır. Vargas ve Ramirez, rüzgar türbini değişkenlerinin mekanik ve elektriksel geçici durumlarının harmoniklerinin frekanslarını incelemek için genişletilmiş bir harmonik etki alanı modeli önermişlerdir [24]. Ayrıca, uygun enerji depolama sistemlerinin ve filtrenin devreye alınması, rüzgar santrallerinin entegrasyonu nedeniyle ortaya çıkan harmonikleri azaltmaktadır. Özetlemek gerekirse, dönüştürücülerin geliştirilmesi, güvenilir bir güç kaynağı yapmak için rüzgar çiftlikleri entegrasyonu tarafından üretilen harmonikleri bastırmak için daha fazla araştırma gerekmektedir.

3.5. Açısız Kararlılık / Alanlar Arası Salınım

Açısız kararlılık, güç sistemindeki birbirine bağlı makinelerin herhangi bir bozulmaya maruz kalarak senkronize kalabilme yeteneğidir [25]. Şebekede artan rüzgar enerjisi kullanımı, küçük sinyal kararlılığını

iyileştirir. Kısa vadede, rüzgar türbininin reaktif gücü, güç sisteminde açılabilir kararlılık yaratabilir. ÇBİJ tabanlı rüzgar türbinlerinin sayısındaki istikrarlı artışın, bir toplu güç sisteminin kararlılığı (geçici ve küçük sinyal) üzerindeki etkisi incelendiğinde, rüzgar üretim miktarı ile ilgili olarak güç sisteminin genel ataletinde önemli bir değişiklik olduğunu göstermektedir. Rüzgar türbinlerinin şebekeye katkısı ne kadar yüksekse, atalet o kadar düşük olmaktadır[26]. Ayrıca, senkron jeneratörleri dolaylı olarak birçok rüzgar türbininin entegrasyonu sonucu şebekeyi kararsızlaştırabilir. Hız regülatörleri, frekans kontrolünü desteklemek için senkron jeneratörler tarafından düzenlenebilir. Bununla birlikte senkron jeneratörlerden farklı olarak, rüzgar türbinini jeneratörleri yalnızca küçük bir miktar için birincil frekans desteğine katkıda bulunabilir [27]. Rüzgar gücü çıkış dalgalanmaları, üretim ve yük uyumsuzluğundan dolayı şebeke gerilim kararlılığını da zayıflatacaktır [28]. Rüzgar türbinlerinin elektrik üretimindeki beklenen payının yıllar içinde önemli ölçüde artması göz önüne alındığında, rüzgar gücünün olumsuz etkileriyle başa çıkmak için güç sistemlerinde daha fazla esnekliğe ihtiyaç duyulacaktır. Rüzgar çiftlikleri ile entegre elektrik şebekelerinin açılabilir kararlılığıyla başa çıkabilmek için araştırmacıların bu konuyu daha derinlemesine araştırmaları gerekmektedir. Yenilenebilir enerjinin güç sistemlerine etkin bir şekilde entegrasyonu için esnekliği artırmak için dört ana seçenek önerilmiştir [29]:

- Sevk edilebilir üretim
- İletim ve dağıtım genişletmesi
- Talep tarafı yönetimi
- Enerji depolama

3.6. Şebeke Güvenilirliği ve Dayanıklılığı

Rüzgar enerjisinin artan etkisi, rüzgar gücü çıkış dalgalanmaları kontrol edilemediğinden ve genellikle rüzgar üretimi talep modeliyle ilgili olmadığından, sistem güvenilirliğini etkiler. Bu durum tepe ve yoğun olmayan dönemler arasındaki farkın artmasına neden olur. Şebeke güvenilirliğinin yapı taşları şu şekilde özetlenebilir 1) Elektrik sistemi içerisinde üretim ve talep dengesini sağlayarak sabit tutarak ve dengesizlik durumlarında üretimi veya talebi azaltarak hızlı tepki vererek frekans desteği sunmak. 2) Sistemin çökmesini önlemek için rutin veya acil çalışma durumlarında gerilimi şebekenin çalışma sınırları içinde tutarak desteklemek [30]. Konvansiyonel üretim sistemi bu hizmetleri çalışmasının önemli bir parçası olarak sağlar, ancak rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir kaynaklarının yeni bir elektrik kaynağı olarak ortaya çıkması şebekenin dinamiklerini değiştirmiştir.

1) Gerilim Desteği

a: Reaktif Güç ve Gerilim Düzenleme

İnverter tabanlı kaynaklı sistemlerde sistemin, beklenmedik durum öncesi veya sonrası programlanmış voltajı korumak için sınırlamalar dahilinde daha fazla reaktif akım sağlayabiliyorsa, evirici bunu yapacak şekilde programlanmalıdır. Senkron bir makineye benzer şekilde, aktif güç çıkışını düşürmeden kararlı durum voltajını korumak için inverterin tam kapasitesinden yararlanılmalıdır. Rüzgar türbinleri, kontrol devresinin bir parçası olan inverter, güç elektroniği aracılığıyla şebekeye bu hizmeti sağlayabilir. Bu hizmet, türbin güç üretse de üretmese de mevcuttur.

b: Alçak Gerilim Geçiş

Şebekenin belirli bir bölgesinde meydana gelen arıza başlı başına bir risk olmayabilir ancak düşük gerilim durumunda çalışan koruma cihazları nedeniyle üreten kaynakların kaybolması tamamen çökmeye neden olabilir. Bu nedenle üretim kaynakları, koruma cihazlarının arızalı parçaları izole edebilmesi ve kontrolörlerin şebekeyi yeniden dengeleyebilmesi için voltaj düşüşünü belirli bir süre boyunca sürdürecektir bir sistemle tasarlanmıştır. Rüzgar türbinleri, beklenmedik olaylar sırasında şebekede kalmalarını ve gerilim düşüşünü aşmalarını sağlayan kontrolörlerle tasarlanmıştır [31].

2) Frekans Desteği

a: Frekans Düşüşü / Hızlı Frekans Cevabı

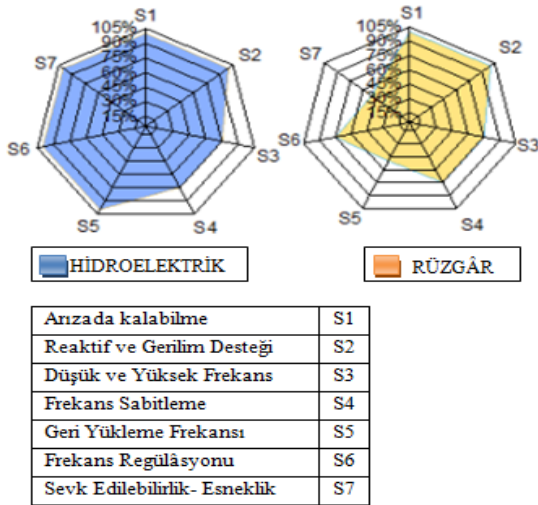
Acil bir durumda (iletim hattının veya birincil üretim kaynağının kaybı), sistem frekansı, sistemin ataletine bağlı bir oranda azalır. Bu aşamada frekansı yavaşlatmanın ve düşük frekans röleleri yükselmeden önce en alt noktaya ulaşmaya yardımcı olmanın iki yolu vardır. Birinci yol, büyük geleneksel jeneratörlerin özelliği olan büyük atalet momentidir. İkinci yol, şebekeye yüksek miktarda aktif güç enjekte etmek ve hızlı frekans yanıtı olarak bilinen şeyde yeterli kinetik enerji sağlamaktır. Son zamanlarda rüzgar türbinleri bu hizmeti ek kontroller yoluyla sağlayabilmektedir.

b: Frekans Düzenleme

Bu işlem, frekansı normal çalışma değerinde ayarlamak için geri besleme sinyaline yanıt veren jeneratörler tarafından gerçekleştirilir. Bu hizmet, bir acil durumun ardından normal çalışma veya arızadan kurturma süresi sırasında kullanılır. Rüzgar türbinleri, ihtiyaç anında yeterli kapasitenin olması (rüzgar mevcudiyeti ve üretilen gücün türbinin maksimum gücünden daha az olması) şartıyla bu hizmete katılabilir.

3.7. Esneklik

Şebekedeki değişiklikler, elektrik güç sisteminin genel bir özelliğidir. Bu nedenle esnek kaynaklar, ister beklenmedik ister rastgele meydana gelsin, bu değişikliklere karşı koyabilir. Esneklik, aşağı-yukarı yönlerde rampalamayı, hızlı başlama süresini, hızlı kapanma süresini, minimum (durma süresi/yükselme süresi) ve minimum kararlı üretim seviyesini içerebilir. Rüzgar türbinleri, kontrolde güç elektroniği kullanmaları nedeniyle üretim modunda ve hızlı tepki ile bu hizmete aşağı yönde katkıda bulunabilir. Ayrıca ön-kısıtlı modda ise yukarı yönde hizmet verebilmektedir. Bunlara rağmen, rüzgarın aralıklı doğası, rüzgar türbinleri tarafından istendiğinde bu hizmeti çok maliyetli hale getirir. Rüzgar türbinleri aracılığıyla bu hizmetten yararlanmanın maliyetini azaltmak için çaba sarf edilmektedir. Şekil 6'da rüzgar türbini güvenilirlik ve esneklik hizmetlerinin bir özeti. Güç sisteminde en iyi güvenilirlik ve esneklik sağlayıcısı olan hidroelektrik ile rüzgar türbinlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Rüzgar türbininin gerilim geçişi, reaktif güç desteği ile ilgili olarak mükemmel bir hizmet verdiğini, frekansını yavaşlatma, frekansını stabilize etme ve düzenlemede çok iyi olduğunu görebiliriz. Frekans kurtarma aşamasında ve esneklikteki performansı ortalamadadır. Bu durumda maliyetten kaynaklanmaktadır [32].



Şekil 6. Hidrolik enerjiye kıyasla güvenilirlik/esneklik hizmetinde rüzgar performansı [32].

3.8. Koruma Zorlukları

En yaygın güç sistemi arızası türlerinden biri kısa devredir. Bu nedenle koruma cihazları, bir elektrik kısa devresi durumunda tedarikçiler veya tüketiciler tarafından ekipman kaybını veya hasarı önlemek için çalışan kalkanı temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin iletim şebekesinin kısa devre katkısının değerlendirilmesi,

bu santrallerin etkilerinin ve şebeke elemanlarında oluşturabilecekleri stresin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Rüzgar türbinlerinin etkisi ve kısa devre katkısı rüzgar türbinlerinin tipine bağlıdır. Rüzgar türbinlerinin ayrıntılı modelleri ve özellikleri [33]–[34]'de bulunmaktadır. Tip 1 ve Tip 2 rüzgar türbinleri, rotorun ek direnci ile temsil edilen Tip 2'nin küçük bir farkı ile hemen hemen aynı özelliklere sahiptir ve bu nedenle bu iki tipin kısa devre akımına katkısı hemen hemen aynıdır. Tip 1, 2 ve 3'teki kısa devre akımı en yüksektir ve anma akımının 3 ile 6 katı arasında değişen bir değerle 3 fazlı arızada meydana gelir. Tip 4'e gelince, kısa devre akımı, nominal akımın değerine (%110 veya daha fazla) eşit bir değer bulur ve bunun nedeni, devresinin şebekeden bir dönüştürücü ile ayrılmasıdır [35]. Ortak bağlantı noktasındaki kısa devre hızı, paralel olarak bağlanan rüzgar türbinlerinin sayısına ve tipine bağlıdır. İletim ağları, arıza empedansının değişmesi nedeniyle rölelerin yetersiz/aşırı erişim sorunu dahil olmak üzere rüzgar gücünün toplu nüfuzu nedeniyle farklı koruma zorluklarıyla karşı karşıyadır. Koruma cihazlarının seçimi ve koordinasyonuna ek olarak arıza akımının seviyesi, rüzgarla birleştirilmiş mikro şebekelerin temel zorluklarıdır [36]. Literatürde birçok çözüm arasında uyarlamalı aşırı akım koruma şeması [37], arıza mesafesi tahmini tabanlı koruma şeması [38], bulanık çıkarım sistemi tabanlı şema [39], mikroişlemci tabanlı şema [40], salınım frekansı ve geçici güç tabanlı şema [41], gerilim-akım ters zaman tabanlı şema [42] yaygın olarak kullanılan koruma şemalarıdır. Ayrıca, rüzgar santralleri için jeneratör tipi seçimi, yani senkron jeneratör, indüksiyon jeneratör veya dönüştürücü arayüzlü jeneratör, elektrik şebekelerinin koruma şemasının tasarımında da hayati bir rol oynar. Senkron jeneratörler uzun süreli yüksek akım sürdürülebilirlik özelliklerine sahiptir ve endüktif jeneratörlerin arıza akımı kademeli olarak azalır. Tersine, dönüştürücü arabirimli jeneratörlerin kısa devre akımı, jeneratörlerin nominal akım değerinin iki veya üç katı ile sınırlıdır [43], alçak gerilim şebekeleri için, yenilenebilir enerji varlığındaki koruma sistemleri, yeni bir çok yönlü güç akışı olgusuna maruz kaldığından, özellikle dağıtılmış jeneratörlerde özel dikkat gerektirir. Özetlemek gerekirse, her koruma planının artıları ve eksileri vardır. Buna göre, korumanın her yönü verilen güç sistemi şebekeleri için kapsamlı koruma planlarının geliştirilmesine ve sistem operatörlerinin koruma sistemini gözden geçirmesi gereken şebekedeki rüzgar türbinlerinin penetrasyon düzeyi için ölçülebilir oranların belirlenmesine hala ihtiyaç vardır.

3.9. Alçak Gerilimde Şebekede Kalabilme Yeteneği

Rüzgar türbini tabanlı elektrik santrallerinin arıza veya

gerilim düşüşleri sırasında belirli bir süre boyunca şebekeye bağlı kalabilme kabiliyetine alçak gerilimde Şebekede kalabilme yeteneği denir[44]. Literatürde, çeşitli kontrol stratejileri dahil olmak üzere, sistemin devam etme yeteneğini geliştirmek için çeşitli yenilikçi teknikler incelenmiştir. [45]'deki kontrol stratejisinde SMSJ tabanlı bir rüzgar türbininin çalışma güvenilirliğini artırmak için çift yönlü alçaltıcı/yükseltici dönüştürücü ile şebeke tarafı dönüştürücü arasında entegre bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Bir rüzgar türbininin kısa devreye tepkisi rüzgar türbininin tipine bağlıdır. Örneğin, ÇBİJ tabanlı türbinin terminalinde arıza meydana gelirse, kısa devre akımı, türbine zarar verebilecek nominal rotor akımının birimi (p.u.) başına 5 ile 6 kadar ulaşabilir.

3.10. Planlama Zorlukları

Tartışılan operasyonel ve koruma zorluklarına ek olarak, rüzgar enerjisinin büyük ölçekli entegrasyonu, güç sistemi planlamasına da karmaşıklıklar getirmiştir. Geleneksel ancak yaygın olarak benimsenen güç sistemi planlama ve simülasyon modelleme araçları, çoğu durumda maliyet minimizasyonunun amaç fonksiyonu olduğu optimal üretim portföylerini tasarlamak için kullanılır [46]. Bu tür modelleme yaklaşımları, yenilenebilir enerji ile ilgili belirsizlikleri ve önerilen çözüm yönlerini planlama aşamalarında dikkate almaz [47]. Ancak, rüzgar enerjisi sisteminin sınırlı sevk edilebilirliği nedeniyle, sevk edilebilir enerji santrali düşük rüzgar hızı sırasında hızlı bir üretim takviyesi sağlar, enerji depolama sistemi dalgalanmayı yumuşatır, iletim şebekesi üretim ve talebi dengeler ayrıca talep tarafı yönetimi kritik olmayan yükleri kontrol ederek sistem esnekliğini güçlendirir [48].

Bu nedenle, mevcut esnek çözümler göz önünde bulundurularak rüzgar enerjisinin ekonomisini ve teknikliğini elde etmek için planlama araçlarının güncellenmesi gerekmektedir.

Buna karşılık, araştırmacılar, rüzgar enerjisinin toplu entegrasyonu nedeniyle geleneksel güç sistemi planlama araçlarının zorluklarıyla başa çıkmak için çaba sarf etmektedirler. Örneğin, Rong et al. [49], ısı depolama sisteminde fazladan rüzgar enerjisi tüketerek hibrit sistemlerden en yüksek ekonomik faydayı elde etmek için koordineli bir dağıtım yöntemi geliştirdi. Rüzgar enerjisinin entegrasyonunu ve enerji depolama teknolojisinin rolünü göz önünde bulundurularak üretim genişletme planlama modelinde hata büyüklüğünü azaltmak için gelişmiş bir metodolojide sunulmuştur [50]. Üretim esnekliği, talep tarafı yönetimi, enerji depolama sisteminin rolü dahil olmak üzere daha fazla kısıtlama ve faydası göz önünde bulundurularak, kesintili RES'in toplu entegrasyonu altında güç sistemi planlama modellerinde daha fazla araştırmaya

geliştirmeye hala ihtiyaç duyulmaktadır.

3.11. İletim, İletişim ve Güvenlik Zorlukları

Yük merkezlerinden uzakta inşa edilen rüzgar enerjisi santralleri, iletim altyapısı veya iletim tıkanıklığı üzerindeki stres, düşük yük dönemlerinde aşırı arz, elektrik piyasası politikası, şebeke esnekliği ve arabağlantı sorunları dahil olmak üzere rüzgar enerjisi üretiminin azaltılmasının en çok bilinen nedenleridir [51]–[52]. Bununla birlikte, rüzgar enerjisinin kesintilerden kaçınarak enerji üretimine faydalı bir şekilde dahil edilmesi için iletim altyapısının güçlendirilmesine ilişkin daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Müşterilere kesintisiz, güvenli enerji temini sağlamak için akıllı şebekelerle iletişim ve güvenlik unsurları çok önemlidir. Yük merkezlerinden uzakta bulunan rüzgar çiftlikleri, gerçek zamanlı olarak izlemeli ve mükemmel programlama için internet protokolü aracılığıyla kontrol merkezine iletilmelidir. Ancak mevcut rüzgar çiftliği izleme ve kontrol sistemleri dış saldırılara karşı savunmasız kalması, olası kötü niyetli saldırılar sebebi ile veri güvenliği konusunda endişelendirmiştir [53]-[54].

3.12. Elektrik Piyasası Zorlukları

Elektrik piyasaları, bir emtia olarak elektriğin anında alınıp satılması gerekmektedir. Bu nedenle, doğası gereği çok karmaşık olan bu kaynakların elektrik üretim belirsizlikleri, başta kısa vadeli piyasada olmak üzere elektrik piyasalarına katılımlarında engeller yaratmaktadır. Çünkü belirsizlikler geleneksel elektrik santrallerinin üretim ve talebi dengelemek için verimsiz çalışmasına yol açmaktadır. Rüzgar enerjisi üreticileri, tam üretim garantileri olmadığı için gün öncesi piyasasında ihaleye katılma konusunda biraz dirençlidir. Hatta beklenen çıktıdan daha düşük bir üretim sunabilirler, bu da tesisin maksimum güç noktasının altında çalışabileceğinden daha düşük gelirlere yol açabilir. Bununla birlikte, rüzgar enerjisi üretiminin zirvesi, yük talebinin zirvesi aynı anda gerçekleşmeyebilir ve bu da yük merkezlerinde operasyonel zorluklara yol açabilir. Uygun piyasa çerçevesinin ve akıllı teşvik paketlerinin olmaması yenilenebilir enerji ticaretini engellemektedir [55]. Ortaya çıkan elektrik piyasası zorluklarını belirlemek, literatürde bildirilen birkaç ihale stratejisini tartışmak, bu tür zorluklarla başa çıkmada etkili bir şekilde yardımcı olabilir. Li ve Park [56], Amerika 'nın elektrik piyasasının bir rüzgar çiftliğinden toplanan bir dizi gerçek veri için gerekli piyasa bilgilerini içeren kısa vadeli elektrik piyasasında gelişmiş bir rüzgar enerjisi ihale stratejisi önerdi. Aquila ve arkadaşları [57], riske maruz değer tekniğini kullanarak Brezilya elektrik piyasasındaki ana belirsizlik parametrelerini ve risklerini belirlemek için

rüzgar enerjisi santrallerine yatırım yapmanın fizibilitesini analiz etti. Önerilen yaklaşım, bu tür projeler için daha yüksek ekonomik fizibilite olasılığını doğruladı. Ayrıca, yenilenebilir enerji nüfusunun artmasıyla birlikte değişken üretim kaynaklarının gelecekteki enerji sistemleri üzerindeki etkisini ölçmek için önerilen yeni bir yaklaşım, elektrik fiyatının düştüğünü gösterdi [58].

4. Rüzgar Santrallerinin Şebeke Bağlantı Kriterleri

Rüzgâr santrallerinin ulusal enerji ağlarına entegrasyonu tüketici tarafında istenmeyen durumlara neden olabilir. Bu sebeple kamu kurumları da üretici ve tüketici arasında şebeke dengesinin korunması için gerekli sınırlamaların uyulmasını talep etmekle yükümlüdür [59]. Ülkemizde 2008 yılında yayınlanan yönetmeliğin EK-18'ine göre detaylı sınırlamalar belirlenmiştir. 2008 yılında yapılan bu güncelleme ile arıza sonrası sisteme katkı, aktif güç kontrolü, frekans tepkisi ve reaktif güç kapasitesi konularında önemli kısıtlamalara ve teknik detaylara yer verilmiştir [60], Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK-18 içerisinde belirtilen sınırlamalar iletim sistemine bağlı rüzgâr enerji santralleri ile kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine bağlı rüzgâr enerji santralleri için geçerlidir [61].

4.1. Şebeke Kodları

Elektrik şebekesinin güvenli, emniyetli, güvenilir ve ekonomik işletim için teknik özellikleri, yaygın olarak şebeke kodu olarak bilinir. Herhangi bir şebeke kodu, güç sisteminin bütünlüğünü ve çalışmasını izlemekten sorumlu yetkililer tarafından tasarlanır. İçeriği, başta iletim şirketleri olmak üzere katılımcıların gereksinimlerine göre ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilmektedir. Tüm Rüzgar enerjisi üreticileri, şebeke frekansı ve gerilim değişimi gereklilikleri, arıza anından, reaktif güç ve güç faktörü düzenleme yeteneklerini içeren mevcut şebeke kodlarına bağlı kalmalıdır. Türkiye'de rüzgar santrallerinin karşılaması gereken teknik şartlar Enerji Piyasası Denetleme Kurulu tarafından 24.09.2008 tarihinde yayınlanmıştır. O zamana kadar rüzgar santralleri için tek kriter, şebekeye her noktadan bağlanabilecek kapasiteydi. Bu kriter, herhangi bir noktadan şebekeye bağlanacak rüzgar santrallerinin kurulu gücünün, ilgili erişim noktasının kısa devre MVA'sının %5'ine kadar sınırlandırılmasıydı. Yönetmeliğe göre rüzgar enerjisi santralının üç ana özelliğini kapsar; Arızda kalabilme yeteneği, gerilim/reaktif güç yanıtı ve frekans/aktif güç yanıtı.

Genel olarak Türkiye Elektrik Şebeke Yönetmeliğinin

rüzgar santralleri ile ilgili eki olan Ek 18, teknik özellikler açısından oldukça katıdır. Birinci nesil rüzgar türbinlerini yani sabit hızlı rüzgar türbinlerini tamamen ortadan kaldırıyor. Ek 18'in gerekliliklerini sağlamak için, karmaşık güç elektroniği sistemleri ile herhangi bir senkron/asenkron makine kullanılabilir. Ancak Ek 18, bir iletim sistemine bağlı rüzgar santralleri ile ilgili tüm hususları kapsamamaktadır. Reaktif güç tepki hızları, yüksek gerilimde çalışma kapasitesi, güç faktörü aralığı ve rampa oranı, piyasadaki üreticiler tarafından sorulan sorulardan bazılarıdır. Ayrıca %5 sınırlaması rüzgar enerjisi piyasasında yatırımcılar için önemli bir engeldir. Rüzgarın olduğu yerlerin çoğunda iletim şebekesi yeterince güçlü değildir. Kısa devre güç limiti aynı kalsa bile teknik gereksinimler Elektrik İletim Sistemi İşletmecileri (EİSİ) tarafından revize edilmelidir [61].

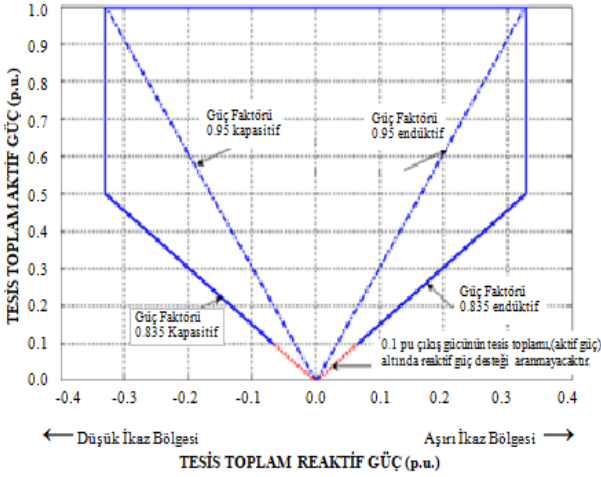
4.2. Aktif Güç Kontrolü

Rüzgar türbinleri, aktif güç çıkışlarını düzenleyerek şebeke işletim kontrolüne dinamik olarak katılmak zorundadır. Şebeke kodlarındaki aktif güç düzenlemesi, maksimum aktif gücü sınırlayan, aktif güç çıkışını dengeleyen ve yukarı veya aşağı yönde rampa oranlarını tanımlayan aktif güç kontrol modlarını içermektedir [4]. Elektrikliğin depolanmasının günümüzde hala zor olması sebebiyle, santraller tarafından üretilen güç ile şebeke tarafından tüketilen güç ve sistemdeki kayıplar arasındaki eşitliğin bozulmaması güç sistemi için dengenin devam ettirilmesi anlamına gelmektedir [62]. Türkiye'de, rüzgâra dayalı enerji üretim tesisleri aktif güç çıkışlarını, gerekli durumlarda Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından gönderilecek sinyallerle, üretim tesisinin mevcut şartlardaki kurulu gücünün %20 - %100'ü arasında otomatik olarak kontrol edilebilme yeteneğine sahip olmalıdır [61]. Bu şarta bağlı olarak da, kurulu gücü 100 MW ve altındaki üretim tesisleri, yük alma hızı dakikada santral kurulu gücünün %5'ini geçmemelidir, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün %5'inden az olmamalıdır. Kurulu gücü 100 MW'ın üzerinde olan üretim tesislerinde ise yük alma hızı dakikada santral kurulu gücünün %4'ünü geçmemelidir, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün %4'ünden az olmamalıdır [61].

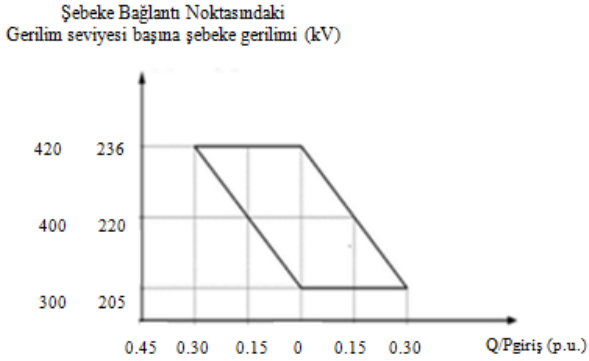
4.3. Reaktif Güç ve Gerilim Kontrolü

Rüzgar türbinleri, şebeke bağlantı noktasındaki gerilim sapsmalarına ve EİSİ'ni tarafından gönderilen reaktif güç referanslarına cevaben reaktif güç çıkışlarını düzenlemek zorundadır. Reaktif güç gereksinimleri, bağlantı noktasının kısa devre gücü, X/R oranı ve rüzgar gücü penetrasyon seviyesini içeren şebeke bağlantı noktası özelliklerine

bağlıdır. Şebeke işletimi için, EİSİ'yi tarafından belirlenen reaktif güç referansları için üç farklı olasılık vardır; reaktif güç, güç faktörü ve gerilim referansları. Şebeke kodları, sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilen P/Q ve V/Q eğrileri gibi bu reaktif güç çalışma koşullarını belirtir. Ayrıca reaktif güç rampa hızı, reaktif güç kontrolü, ölçüm doğruluğu, reaktif güç değişimi için oturma ve yükselme süreleri şebeke kodlarında belirtilmiştir. Türkiye şebeke yönetmeliği gereğince de Şekil 7'de belirtildiği üzere 0,835 kapasitif 0,835 endüktif güç faktörü ile sınırlandırılmış alanda rüzgâr santralleri sistem bağlantı noktasında her noktada çalışabilir olması gerekmektedir [61].



Şekil 7. Rüzgâr Santrali Reaktif Güç Kapasite Eğrisi [61].



Şekil 8. V-Q Bağımlılığı [61].

4.4. Frekans ve Gerilim Çalışma Aralıkları

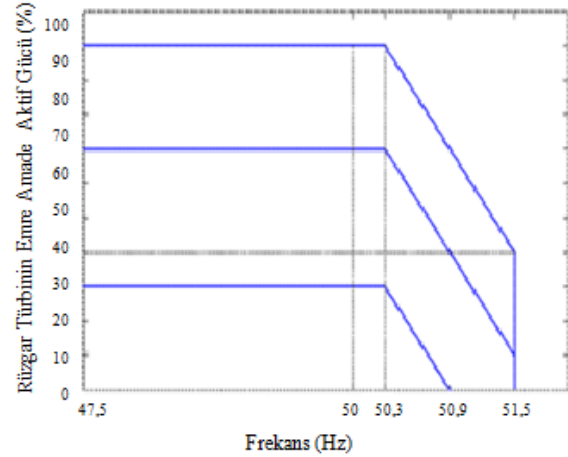
Rüzgâr türbinleri, şebeke bozulmalarından kaynaklanan kararsızlıkları önlemek için ortak bağlantı noktasının anma gerilimi ve frekans değerleri civarında bir aralıkta çalışma kabiliyetine sahip olmalıdır. Güç sisteminin frekansının kontrolü, direkt olarak üretim tesisinin aktif güç kontrolü ile ilişkilidir. Üretim ve tüketim arasındaki arz talep dengesinin bozulması frekans kararlılığını da bozacaktır [63]. Santraller tarafından sağlanan güç, tüketimin

gereksiniminden fazla olması halinde frekansda artış olurken, tam tersi durumunda da frekansda azalma olacaktır. Şebeke yönetmeliğine göre rüzgâr santralleri Tablo 1'de belirtilen çalışma sürelerine karşılık gelen frekans aralıklarında çalışmalıdır.

Tablo 1. Frekans ve şebekeye bağlı kalma süreleri [61].

Frekans Aralığı	Minimum Çalışma Süresi
$50,5 \text{ Hz} \leq f < 51,5 \text{ Hz}$	1 saat
$49 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$	Sürekli
$48,5 \text{ Hz} \leq f < 49 \text{ Hz}$	1 saat
$48 \text{ Hz} \leq f < 48,5 \text{ Hz}$	20 dakika
$47,5 \text{ Hz} \leq f < 48 \text{ Hz}$	10 dakika

Ayrıca yönetmeliğe göre şebeke frekansı 50,2 Hz'in üzerine çıkması halinde rüzgâr santrallerinin çıkış aktif gücü Şekil 9'da belirtilen eğrinin sınırları dâhilinde kalması zorunludur. Şebeke frekansının 47,5-50,3 Hz aralığında olduğu sürede rüzgâr santrali üretebileceği gücün tamamını üretmek zorundadır. Şekilde gösterildiği üzere frekans değeri 50,3 Hz'in üzerine çıktığında, aktif güç-frekans karakteristiklerini takip ederek %4 hız düşümü değerini sağlayacak şekilde yük atmalı ve 51,5 Hz'e ulaştığıdaysa tamamen şebekeden ayrılmalıdır [61].



Şekil 9. Güç-Frekans eğrisi [61].

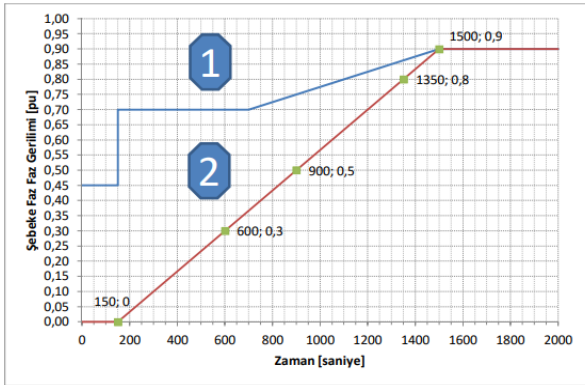
4.5. Arıza Sonrası Sisteme Katkı (ASK) Yeteneği

Şebeke kesintileri sırasında, gerilim düşüşleri tipik olarak, kararsızlığa ve hatta elektrik kesintilerine yol açabilecek daha da kötü sistem koşulları yaratacak olan RES bağlantılarının kesilmesine yol açar. Bu sorunlardan kaçınmak için, şebeke kodları, gerilim düşüşü çok düşük seviyelere ulaşsa bile RES'lerin çalışmaya devam etmesini, reaktif akım enjekte ederek gerilim geri kazanımını desteklemesini ve arıza giderme sonrasında sınırlı rampa değerleri ile aktif gücü geri kazanmasını gerektirir. Tüm bu özellikler rüzgâr türbininin ASK yeteneği olarak şu şekilde tanımlanmaktadır [4];

- RES'lerin şebekeden ayrılmadan dayanabilmesi gereken simetrik ve asimetrik arızalar için minimum ve maksimum gerilim geçişi ve kurtarma eğimi açısından ASK,
- Arıza ve kurtarma sırasında aktif güç ve reaktif güç sınırlaması,
- Arıza ve kurtarma sırasında gerilim desteği için reaktif akım enjeksiyonu,
- Arıza giderme sonrasında sınırlı rampa ile aktif gücün geri yüklenmesi.

Genel olarak şebeke kodlarında, Şekil 10'da ASK'yi, şebeke bağlantı noktasında sınırlayıcı gerilim eğrisi olarak tanımlar. Taralı alanların açıklaması şu şekilde yapılabilir:

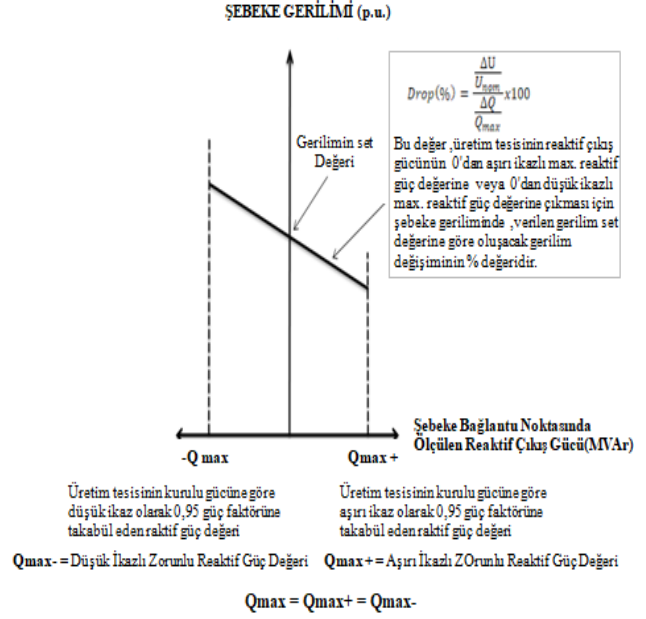
1. Bölge de bozulmalardan kaynaklanan 3 fazlı kısa devreler veya simetrik gerilim düşüşleri, kararsızlığa veya rüzgar türbinlerinin güç sisteminden ayrılmasına yol açmamalıdır.
2. Bölge de iki seçenek vardır. İlk seçenek, rüzgar türbinlerinin arıza sırasında şebekeye bağlı kalması gerektiğidir. Rüzgar türbinleri ihtiyacı karşılayamıyorsa, EİSİ ile anlaşarak sınır çizgisini değiştirmeye izin verilir. İkinci seçenekte, türbinler arızadan geçerken kararsız hale gelirse veya jeneratör koruması devreye girerse, EİSİ ile anlaşarak rüzgar türbinlerinin güç sisteminden kısa süreli olarak ayrılmasına izin verilir.
- Kırmızı çizgi altındaki bölgede iserüzgar türbinlerinin şebekeden kısa süreli kesintisi kabul edilir. Ayrıca rüzgar türbinlerinin koruma sistemleri ile devreden çıkarılmasına izin verilmektedir.



Şekil 10. PCC'de Gerilim Sınırlama Eğrileri [61].

Yönetmelikçe, rüzgâr santralleri için bağlantı noktası geriliminin 0,9 pu ve 1,1 pu değerleri arası normal işletim koşulu olarak tanımlanmıştır. TEİAŞ tarafından iletilen set değerlerine göre rüzgâr santralleri şebeke bağlantı noktasındaki gerilim değişimlerine Şekil 11'deki formülasyonda belirlenen oransal yanıtı vermelidir. Formülde "droop" gerilim düşümünü ifade ederken TEİAŞ tarafından belirlenmekte ve %2 - %7 arasında değişmektedir. Drop değeri üretim tesisinin reaktif çıkış gücünü 0'dan aşırı ikazlı maksimum reaktif güç değerine veya 0'dan düşük ikazlı maksimum reaktif çıkış gücüne

değerine çıkması için şebeke geriliminde verilen gerilim set değerine göre oluşacak % gerilim değişimidir [61].



Şekil 11. Şebeke Arızası Sırasında Gerilim Desteği Prensipleri [61].

4.6. Enerji Depolama Sistemleri

Enerji Depolama Sisteminin (EDS), şebeke esnekliğini, ve güvenilirliğini artırmak için çok önemli teknolojilerden biridir. Bu teknoloji aynı zamanda, Yenilebilir Enerji Kaynaklarının şebekeye etkin bir şekilde entegre edilmesine, rekabetçi elektrik piyasasında tepe yük talebini ve elektrik fiyatını düşürmeye yardımcı olabilir. Son zamanlarda, Batarya enerji depolama sistemi (BEDS), maliyetlerinin azalması ve daha yüksek dönüşüm verimliliği nedeniyle yaygın olarak ilgi görmektedir [64]. Diğer EDS teknolojileri arasında, volan EDS elektromekanik depolama sistemi, süper kapasitör EDS elektrostatik depolama sistemi ve süper iletken manyetik EDS doğrudan enerji depolama sistemi sayılabilir. BEDS, düşük güç yoğunluğu nedeniyle dinamik tepkisi yavaş olduğu için elektrik şebekesinde güç kontrolü zorlukları yaratmaktadır. Buna karşılık, valon ve süper kapasitör, ömürlerini azaltan yüksek bir güç talebi sağlayabilir. Mevcut depolama teknolojilerinin hiçbiri fiziksel sınırlamaları nedeniyle hem enerji hem de güç yoğunluğunu aynı anda karşılayamamaktadır. Bu nedenle, hem yüksek enerji hem de güç uygulamaları için uygun olan mevcut BEDS'ni hibritleyerek enerji yönetiminde depolama sisteminin geçici ve kararlı durum performansını zenginleştirmek gerekmektedir. Rüzgâr türbinlerinde Enerji depolama sistemleri türbin çıkışı iyileştirebilir ve rampa oranını (MW/Min) kontrol edebilir bu da rüzgar kaynağını programlamada biraz güvenilir hale getirir. Optimal depolama sisteminin boyutu, rüzgar enerjisi tahmin

hatalarının dikkatli bir şekilde anlaşılmasını gerektiren, araştırmacıların ve sistem operatörlerinin karşılaştığı zorluktur [65]. Shi ve arkadaşları [66], optimum depolama boyutunu elde etmek ve kısa vadede öngörülemez rüzgar enerjisinin zamanlamasını iyileştirmek için bir hibrit güç depolama sistemi (pil ve süper kapasitör) önermiştir. Ayrıca, bu enerji depolama sistemleri, frekans regülasyonu, gerilim profili iyileştirmesi, güç kalitesi düzeltilmesi ve tepe yük talebini, yük kaydırma ve enerji yönetimi dahil olmak üzere talep yanıtı sağlama yeteneğine sahiptir [67].

Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri altyapısının geliştirilmesi, ömürlerinin uzatılması, zorlu hava koşullarına dayanıklılıkları, maliyetlerinin düşürülmesi, enerji depolama şirketleri ve üreticileri için en kritik kaygılardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle araştırmacıların bu alana daha fazla dikkat etmesi, depolama kapasitesi ve depolama süresinin nasıl uzatılacağı konusunda çözümler bulması gerekmektedir.

4.7. Modern İzleme ve Kontrol Stratejileri

Rüzgar türbini kontrol sistemlerinin amacı, rüzgar hızı dalgalanmaları nedeniyle türbinin izin verilen sınırlar içinde çalışmasını sağlamak ve ayrıca rüzgardan mümkün olan maksimum gücü elde etmektir. Ayrıca kontrol cihazları, gerilim veya frekansın bozulmasına neden olan bir arıza durumunda şebekeyi desteklemek için rüzgar türbinlerinin katılımını sağlar. Tablo 2’de, rüzgar türbinlerinde kullanılan kontrol türlerini ve teknikleri göstermektedir.

Tablo 2. Rüzgar türbinleri için izleme ve kontrol stratejileri.

Türleri (referans)	Teknikler
Tork Control [68]	Optimum Tork Kontrol
	Uç Hız Oranı Kontrol
	Tepe Tırmanma
	Kayar Mod Kontrol
	Güç Sinyali Geri Besleme
Yunuslama açısı Kontrol [69]	Toplu eğim Kontrol
	Bireysel eğim kontrol
Şebeke Entegrasyonu kontrol [70]-[71]	Frekans Regülasyonu
	Reaktif Güç Kontrol

4.8. Yenilenebilir Enerji Politikaları

Rüzgar enerjisinin toplam elektrik enerjisi ürününe katkısı, gözden kaçırılmaması gereken bir gerçek haline gelmiştir. Birçok ülke, üretimlerinde %20’yi aşan rüzgar enerjisini paylaşmaktadır [72]. Bütün bunlar, birkaç ülkeyi bu endüstrinin büyümesine yardımcı olan ve aynı zamanda bu ülkelerin ekonomik, sosyal ve çevresel yönlerini destekleyen yasalar, politikalar çıkarmaya teşvik etti.

Aşağıdaki Tablo 3’de rüzgardan en çok enerji üreten beş ülkenin en belirgin politikalarına genel bir bakış sunmaktadır.

Tablo 3. Seçilmiş ülkelerde rüzgar enerji politikaları.

Ülkeler	Kurulum Kapasite [73]	Aktivasyon Yılı	Politika Durumu	Politika Türü
Çin	221 GW	2001-2018	Yürürlükte	Düzenleyici araçlar, Bilgi sağlama, Kesintisiz tarifeler/primler, Vergi indirimi, Doğrudan yatırım [74].
ABD	96,5 GW	1994-2010	Yürürlükte	Kodlar ve standartlar, Teknoloji gelişim, Hibeler ve sübvansiyonlar, Yükümlülük şemaları, Kamu gönüllü programları, Yenilebilir portföy standartları[75].
Almanya	59,3 GW	1989-2012	Yürürlükte	Kesintisiz tarifeler/primler, Hibeler ve sübvansiyonlar, Stratejik planlama [76].
Hindistan	35 GW	2000-2018	Yürürlükte	Hibeler ve sübvansiyonlar, Yeşil sertifikalar, Krediler, Stratejik planlama, Vergi indirimi [77].
İspanya	23 GW	2007-2016	Yürürlükte	Sanayi regülasyonu, Kesintisiz tarifeler/primler, Kodlar ve standartlar,

5. Sonuçlar

Günümüzde artış gösteren rüzgar santrallerinin enterkonnekte sisteme bağlantı kriterleri ve sistem üzerindeki etkileri büyük önem kazanmıştır. Yapılan detaylı incelemeler sonucunda rüzgar enerjisinin elektrik şebekelerine entegrasyonunda bazı zorluklarla karşılaşıldığı saptanmıştır. Yapılan bu çalışma ile rüzgar enerjisi santrallerinin elektrik şebekelerine entegrasyonunda karşılaşılan zorluklar, alınabilecek önlemler ve bulgular aşağıda sıralanmaktadır.

- Tartışılan zorluklar arasında, rüzgar enerjisi kesintisi, reaktif güç desteği, gerilim ve frekans kararlılığı, güç kalitesi sorunları, arızadan kur-tulma yeteneği, şebeke güvenilirliği ve da-yanıklılığı, koruma, siber güvenlik, esneklik, el-ektrik piyasası ve planlama zorluklarına odaklanılmıştır.

- Zorluklarla mücadele etmek için şebeke kodları, enerji depolama sistemleri ve rüzgar enerjisi politikası, modern izleme ve kontrol stratejileri dahil olmak üzere mevcut çözüm metodolojilerini gözden geçirilmiştir.

- Bu zorlukların birçoğuna olumlu yada olumsuz etki eden rüzgar türbin teknolojilerinin önemine değinilmiştir. Bu türbinlerin şebeke uyumluluk kriterleri karşılaştırmış ve mevcut rüzgâr türbin teknolojilerinin 5-10 yıl içerisinde şebeke yönetmeliklerinin etkisiyle pozitif anlamda gelişeceği görülmüştür.

- Gerekli özelliklere sahip enerji depolama sistem-leri, sevk edilebilirliği ve güvenilirliği de dahil olmak üzere rüzgar enerjisi sistemlerinin şebeke entegrasyonu ile ilgili birçok sorunu çözüle-bileceği görülmektedir. Büyük ölçekli enerji de-polama sistemleri altyapısının geliştirilmesi, ömürlerinin uzatılması, zorlu hava koşullarına dayanıklılıkları ve maliyetlerinin düşürülmesi, enerji depolama üreticileri için en kritik kaygılardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, araştırmacıların sektörel ve yönetsel olarak bu alana daha fazla dikkat etmesi, de-polama kapasitesi ve depolama süresinin nasıl uzatılacağı konusunda çözümler bulmaları ger-ekmektedir.

- Araştırmacılar, rüzgar enerjisi sistemlerinin şebekelere güvenilir bir şekilde entegrasyonunu sağlamak için rüzgar enerjisi üretim belirsizlikleri ile talep tarafı yönetimi arasındaki bağlantıyı da keşfetmelidirler. Gelecekte rüzgar türbinleri için izleme, kontrol stratejileri, tahmin modelleri geliştirirken tahmin doğruluğunu artırmak ve hesaplama yükünü azaltmak için yeni olasılıksal belirsizlik yöntemlerinin kullanılması yararlı olacaktır.

- Türkiye’de politika yapıcılarının gelecekteki ener-ji stratejilerini geliştirmede, ekonomik, sosyal ve çevresel yönlerini daha iyi sürdürülebilir poli-tikalar benimseyebilmeleri için şebeke ente-grasyonundaki zorlukları tüm yönleri ile bir ara-da görmeleri sağlanmıştır.

- Bu çalışmanın gelecekteki bir uzantısı olarak, benzer zorlukları ve bunların dağıtım şebekeleri üzerindeki etkilerini incelemekte literatüre katkı sağlayacaktır.

- Teknolojik ilerleme ve devam eden kapsamlı araştırmalar nedeniyle çok kısa bir süre içinde diğer birçok yenilikçi çözüm metodolojilerinin ortaya çıkması beklenmektedir. Bununla birlikte, rüzgar enerjisi kesintisi, esneklik ve güvenilirlik konuları dahil olmak üzere rüzgar enerjisinin elektrik şebekelerine entegrasyonu ile ilgili endişeler hala mevcuttur.

Elde edilen sonuçlar ile bu alanda akademik araştırma gerçekleştirecek araştırmacılara gelecekte rüzgar enerjisinin artış hızı ile bu zorluklar arasındaki ilişkiyi bir bütün halinde görmeleri, sektörel ve yönetsel bakış açısı kazandırılabilceği, aynı zamanda literatürdeki boşlukların tespitine yönelik katkı sunulabileceği düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu. 2021. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB).
- [2] Wu Y.H., Chang S.M. and Mandal P., 2019. Grid-connected wind power plants: a survey on the integration requirements in modern grid codes. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 55 (5).
- [3] Ahuja H., Bhuvanewari G., Balasubramanian R., 2011. Performance comparison of dfig and pmsg based wecs. IET Conference on Renewable Power Generation, New Delhi, India.
- [4] Shakır R.A., Fahad S.M.I, Fahad A.Al-Sulaman, Ibrahim M.E., 2020. Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia, January 8, 10857–10870.
- [5] Tsili, M., Patsiouras, S., Papathanassiou, S., 2008. “A review of grid code technical requirements for wind farms”, IET Renewable Power Generation, 2:271- 273, 31 July 2008, Denmark
- [6] Ak M. A., 2011. Rüzgâr santrallerinin şebekeye entegrasyonu ve şebeke üzerine etkileri. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Singh M. and Santoso S., 2011. Dynamic models for wind turbines and wind power plants. Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/SR-5500-52780, XEE-8-77567-01; TRN: US201124%%377, 2011
- [8] Wind Turbine Plant Capabilities Report, 2013. WindIntegration Studies, Austral. Energy Market Operator, Melbourne, VIC, Australia,
- [9] Khadem S.K., Basu M., Conlon M.F., 2010, Power Quality in Grid connected Renewable Energy Systems: Role of Custom Power Devices, Dublin Institute of Technology Kevin Street, Dublin 8, Ireland, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, March, III
- [10] Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M, Timbus A. V., 2006. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. IEEE Trns Indust Elect, 53 (5), 1398 – 1409.
- [11] Dehghan S.M., Mohamadian M., and Varjani A.Y., 2009. A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter, IEEE Trns Energy Conv, 24 (3), 714 – 724.

- [12] Chowdhury S.P., CShowdhury A., Crossleyb P.A., 2009. Islanding protection of active distribution networks with renewable distributed generators: A comprehensive survey. *Electric Power Systems Research*, 79, 984–992.
- [13] Giebel G. and Kariniotakis G., 2017. Wind power forecasting a review of the state of the art. In *Renewable Energy Forecasting*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2017, 59–109, doi: 10.1016/b978-0-08-100504-0.00003-2.
- [14] Rona B, 2014. Rüzgâr santrallerinin güç sistemlerine entegrasyonu ve şebeke yönetmeliğine göre analizi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Zhang Q. Li, Y., Lin T. Ji, X. and Cai Z., 2018. Volt/Var control for power grids with connections of large-scale wind farms: A review. *IEEE Access*, 6, 26675–26692, doi: 10.1109.
- [16] Xie, Z. Xu, L. Yang, J. Ostergaard, Y. Xue, and K. P. Wong, 2013. A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support. *IEEE Trans. Power Syst.*, 28 (3), 3302–3310, Aug., doi: 10.1109
- [17] Zhou Y., Nguyen D. D., Kjaer P. C., and Saylor S., 2013. Connecting wind power plant with weak grid - Challenges and solutions. in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting*, Jul. doi: 10.1109.
- [18] Liu J., Yao W., Wen J., Fang J., Jiang L., He H., and Cheng S., 2020. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of gridconnected DFIG wind farm, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 11 (1), 545–557, Jan. 2020, doi: 10.1109
- [19] Kroposki B., 2017. Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 5 (6), 831–837, Nov. doi: 10.1007.
- [20] Morren J., De Haan S., Kling W., and Ferreira J., 2006. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control, *IEEE Trans. Power Syst.*, 21 (1), 433–434, Feb. doi: 10.1109.
- [21] Y. Wang, J. Meng, X. Zhang, and L. Xu, 2015. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 6 (2), 565–574, Apr., doi: 10.1109/tste.2015.2394363.
- [22] Schwanz D., Bollen M., and Larsson A., 2018. Some methods for harmonic emission determination in wind power plants. In *Proc. IEEE 18th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (ICHQP)*, May, doi: 10.1109.
- [23] Reis A., Moura L. P., and Oliveira J. C., 2016. Mitigation of harmonic current produced by wind turbine throughout converter switching controll. In *Proc. 17th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (ICHQP)*, Oct. 2016, doi: 10.1109/ichqp.2016.7783477.
- [24] U. Vargas and A. Ramirez, 2016. Extended harmonic domain model of a wind turbine generator for harmonic transient analysis. *IEEE Trans. Power Del.*, 31, (3), 1360–1368, Jun., doi: 10.1109.
- [25] Kundur P., 2007. *Power system stability*. in *Power System Stability and Control*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1–10. [Online]. Available: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1004391169>, doi: 10.1201/9781420009248.
- [26] Gautam D., Vittal V., and Harbour T., 2009. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, 24 (3), 1426–1434, Aug., doi: 10.1109.
- [27] Sun Y., Zhang Z., Li G., and Lin J., 2010. Review on Frequency Control of Power Systems with Wind Power Penetration. In *Power System Technology*, 1–8.
- [28] Le H. T., Santoso S., and Nguyen T. Q., 2012. Augmenting Wind Power Penetration and Grid Voltage Stability Limits Using ESS: Application Design, Sizing, and a Case Study. *IEEE Trans. Power Syst.*, 27 (1), 161–171.
- [29] Various Authors, 2015. *Commercialisation of Energy Storage in Europe*.
- [30] NERC. Essential-Reliability-Services-Task-Force-(ERSTF). 2019. Accessed: Oct. 9, [Online]. Available: [https://www.nerc.com/comm/Other/Pages/Essential-Reliability-Services-Task-Force-\(ERSTF\).aspx](https://www.nerc.com/comm/Other/Pages/Essential-Reliability-Services-Task-Force-(ERSTF).aspx).
- [31] DEIF. LVRT—Low Voltage Ride Through: Wind Power. Accessed: Oct. 9, 2019. [Online]. Available: <https://www.deif.com/wind-power/technology/lvrt—low-voltage-ride-through>.
- [32] Milligan M., 2018. Sources of grid reliability services. *Electr. J.*, 31 (9), 1–7, Nov, doi: 10.1016/j.tej.2018.10.002.
- [33] Malekian K., Shirvani A., Schmidt U., and Schufft W., 2009. Detailed modeling of wind power plants incorporating variable-speed Synchronous Generator. In *Proc. IEEE Elect. Power Energy Conf. (EPEC)*, Oct., doi: 10.1109/epec.2009.5420926.
- [34] Muljadi E., Zhang Y. C., Gevorgian V., and Kosterev D., 2016. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. In

- Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep., doi: 10.1109.
- [35] Camm et al. E. H., 2009. Characteristics of wind turbine generators for wind power plants. In Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, Jul. 2009, doi: 10.1109/pes.2009.5275330.
- [36] Telukunta V. Pradhan J., Agrawal A., Singh M. and Srivani S. G., 2017. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review. CSEE J. Power Energy Syst., 3 (4), 365–379, Dec., doi: 10.17775.
- [37] Piesciorovsky E.C., and Schulz N. N., 2017. Comparison of programmable logic and setting group methods for adaptive overcurrent protection in microgrids. Electr. Power Syst. Res., 151, 273–282, Oct., doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.035.
- [38] Zhang L., Tai N., Huang W., and Wang Y., 2019. Fault distance estimation based protection scheme for DC microgrids. J. Eng., 2019 (16), 1199–1203, Mar., doi: 10.1049.
- [39] Abdali A., Noroozian R, and Mazlumi K., 2019. Simultaneous control and protection schemes for DC multi microgrids systems. Int. J. Elect. Power Energy Syst., 104, 230–245, Jan., doi: 10.1016.
- [40] Zamani M. A., Sidhu T. S., and Yazdani A., 2011. A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage microgrids. IEEE Trans. Power Del., 26 (3), 1873–1883, Jul., doi: 10.1109.
- [41] Mohanty R. and Pradhan A. K., 2019. DC ring bus microgrid protection using the oscillation frequency and transient power. IEEE Syst. J., 13 (1), 875–884, Mar., doi: 10.1109.
- [42] Singh M. and Agrawal A., 2019. Voltage–current–time inverse-based protection coordination of photovoltaic power systems. IET Gener. Transmiss. Distrib. 13 (6), 794–804, Mar, doi: 10.1049/ietgtd.2018.6143..
- [43] Eltigani D. and Masri S., 2015. Challenges of integrating renewable energy sources to smart grids: A review. Renew. Sustain. Energy Rev., 52, 770–780, Dec., doi: 10.1016/j.rser.2015.07.140.
- [44] Mahela O.P., Gupta N., Khosravy M, and Patel N., 2019. Comprehensive overview of low voltage ride through methods of grid integrated wind generator. IEEE Access, 7, 99299–99326, doi: 10.1109/access.2019.2930413.
- [45] Glover J. D., Sarma M. S., and Overbye T., 2012. Power System Analysis & Design, SI Version. Boston, MA, USA: Cengage Learning.
- [46] Deng X. and Lv T., 2020. Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models. J. Cleaner Prod., 246, Feb., Art. no. 118962, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118962.
- [47] Ringkjøb H. K., Haugan P. M., and Solbrekke I. M, 2018. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewable. Renew. Sustain. Energy Rev., 96, 440–459, Nov, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.002.
- [48] Zhou S., Wang Y., Zhou Y., Clarke L. E., and Edmonds J. A., 2018. Roles of wind and solar energy in China’s power sector: Implications of intermittency constraints. Appl. Energy, 213, 22–30, Mar., doi: 10.1016.
- [49] Rong S., Chen X., Guan W., and Xu M., 2019. Coordinated dispatching strategy of multiple energy sources for wind power consumption. J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 7 (6), 1461–1471, Nov., doi: 10.1007/s40565-019-0540-7.
- [50] Scott I. J., Carvalho P. M., Botterud A., and Silva C. A., 2019. Clustering representative days for power systems generation expansion planning: Capturing the effects of variable renewables and energy storage Appl. Energy, 253, Nov., Art. no. 113603, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113603.
- [51] Vargas L. S., Bustos-Turu G., and Larrain F., 2015. Wind power curtailment and energy storage in transmission congestion management considering power plants ramp rates. In Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, Jul., doi: 10.1109/pesgm.2015.7285712.
- [52] Bird L., Cochran J., and Wang X., 2014. Wind and solar energy curtailment: Experience and practices in the United States. Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-60983, Mar., doi: 10.2172/1126842.
- [53] Nourian A. and Madnick S., 2018. A systems theoretic approach to the security threats in cyber physical systems applied to stuxnet. IEEE Trans. Dependable Secure Comput., 15 (1), 2–13, Jan., doi: 10.1109/tdsc.2015.2509994.
- [54] Lai J., Duan B., Su Y., Li L, and Yin Q., 2017. An active security defense strategy for wind farm based on automated decision. in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, Jul., doi: 10.1109.
- [55] Abhinav R. and Pindoriya N. M., 2018. Opportunities and key challenges for wind energy trading with high penetration in Indian power market. Energy for Sustain. Develop. 47, 53–61, Dec., doi: 10.1016/j.esd.2018.08.007.

- [56] Li S., and Park C. S., 2018. Wind power bidding strategy in the short-term electricity market. *Energy Econ.*, 75, 336–344, Sep., doi: 10.1016/j.eneco.2018.08.029.
- [57] Aquila G., Rotela Junior P., De Oliveira Pamplona E., and De Queiroz A. R., 2017. Wind power feasibility analysis under uncertainty in the Brazilian electricity market. *Energy Econ.*, 65, 127–136, Jun., doi: 10.1016/j.eneco.2017.04.027.
- [58] Sorknæs P., Djørup S. R., Lund H., and Thellufsen J. Z., 2019. Quantifying the influence of wind power and photovoltaic on future electricity market prices. *Energy Convers. Manage.* 180, 312–324, Jan., doi: 10.1016/j.enconman.2018.11.007.
- [59] S. Heieder, 2001, “Grid integration of wind energy converters and wind field applications,” 1.Rüzgâr Sempozyumu, İzmir.
- [60] Koç E., ve Güven A. N., 2010. Modeling and investigation of fault ride through capability of variable speed wind turbines. In *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, IEEE, 22-26.
- [61] Elektrik şebeke yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik, T.C. Resmi Gazete 2013. Sayı: 28517, Ocak.
- [62] Tang X., Yin M., Shen C., Xu Y., Dong Z. Y., ve Zou X., 2018. Active power control of wind turbine generators via coordinated rotor speed and pitch angle regulation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10 (2), 822-832.
- [63] Tur M. R., 2019. Grid Code Requirements of Wind Power, Integration Problems and Solutions. In VII. Umteb International Congress on Vocational & technical sciences, 42.
- [64] Larcher D. and Tarascon J. M., 2015. Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chem*, 7 (1), 19–29, Jan., doi: 10.1038/nchem.2085.
- [65] Wu J., Zhang B., Li H., Li Z., Chen Y., and Miao X., 2014. Statistical distribution for wind power forecast error and its application to determine optimal size of energy storage system. *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, 55, 100–107, Feb., Mdoi: 10.1016.
- [66] Shi J., Wang L., Lee W. J., Cheng X., and Zong X., 2019. Hybrid Energy Storage System optimization enabling very short-term wind power generation scheduling based on output feature extraction. *Appl. Energy*, 256, Art. no. 113915, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113915.
- [67] Xie L., Carvalho P. M. S., Ferreira L. A. F. M., Liu J., Krogh B. H., Popli N., and Ilić M. D., 2011. Wind integration in power systems: Operational challenges and possible solutions. *Proc. IEEE*, 99 (1), 214–232, doi:10.1109/jproc.2010.2070051.
- [68] Abdullah M., Yatim A., Tan C., and Saidur R., 2012. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16 (5) 3220–3227, Jun., doi: 10.1016/j.rser.2012.02.016.
- [69] Lasheen A. and Elshafei A. L., 2016. Wind-turbine collective-pitch control via a fuzzy predictive algorithm. *Renew. Energy*, 87, 298–306, Mar, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.030.
- [70] Attya A., Dominguez-Garcia J., and Anaya-Lara O., 2018. A review on frequency support provision by wind power plants: Current and future challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81, 2071–2087, Jan., doi: 10.1016/j.rser.2017.06.016.
- [71] Weng Y. T., and Hsu Y. Y., 2016. Reactive power control strategy for a wind farm with DFIG. *Renew. Energy*, 94, 383–390, Aug., doi: 10.1016/j.renene.2016.03.072.
- [72] Komusanac I., Fraile D., and Brindley G., 2019. *Wind Energy in Europe in 2018 Trends and Statistics*. Brussels, Belgium: WindEurope, Feb.
- [73] *World’s Top 10 Countries in Wind Energy Capacity—ET Energy World*, 2019.
- [74] Beijing, China. 2018. *Interim Administrative Measures for the Development and Construction of Decentralized Wind Power Projects*. [Online]. Available: http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201804/t20180416_3150.htm.
- [75] S. Singer, 2017. *Tribal energy program for California Indian Tribes*. Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, CA, USA, Tech. Rep. LLNL-TR-723042, Feb., doi: 10.2172/1343849.
- [76] *The Iea/Irena Renewable Policies and Measures Database*, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/policiesandmeasures/renewable-energy>.
- [77] Wind Energy Division, 2018. *National wind-solar hybrid policy*,” *Ministry New Renew. Energy*, 238–278 (238), 1–8.
- [78] Ministry of Industry of Tourism and Commerce, 2013. *Feed-in tariffs for electricity from renewable energy sources*, 1–66.



Pişirime Uygun Duvar Karosu Üretiminde Şeker Sanayii Atıklarının Değerlendirilmesi

Evaluation of Sugar Industry Waste in Production of Suitable for Double-Fired Wall Tile

Nihan ERCİOĞLU AKDOĞAN^{1,*} , Elif UBAY² 

¹ Kimya Mühendisliği, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-1528-9914

² Seranit Seramik Fabrikası, ARGE Merkezi, Eskişehir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-8008-7772

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 19/06/2022

Kabul Tarihi : 31/08/2022

Ahtar Kelimeler

Kalsit
Atık Yönetimi
Şeker Pancarı Atığı
Döngüsel Ekonomi

Özet

Bu çalışmada, kalsit yerine kalsiyum oksit içeriği yüksek olan (%45,84) şeker pancarı filtre pres atıklarının duvar karosu üretimindeki kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu sayede, şeker üretimi sonrası açığa çıkan ve yığınlar oluşturarak çevreyi kirleten şeker üretim atıklarının, ticari ürünlerin üretilirken kullanılması sağlanarak atık malzemelerin çevreye zararları önenebilmektedir. Aynı zamanda kalsit hammadde rezervlerindeki azalmanın önüne geçmek için alternatif oluşturabilecek potansiyele sahiptir. Daha önce herhangi bir seramik fabrikası tarafından duvar karosu üretimi için böylesine kritik bir hammaddenin, bir atıktan karşılanmaması çalışmanın özgün ve yenilikçi yönünü ortaya koymaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Eskişehir Şeker Fabrikası'ndan, şeker üretim prosesinin ikincil kireçleme adımında atık olarak ortaya çıkan filtre pres keki kullanılmıştır. Atık malzemenin XRF, XRD, TGA, tane boyutu dağılımı ve rutubet analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ticari olarak kullanılan kalsit ile karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak, standart duvar karosu reçetesine kalsit yerine kütlece %6-%12 oranları arasında atık pres keki ilavesiyle üretilmiş karoların, pişme küçülme, üç nokta eğme, su emme, küçük renk farklılıkları TSE standartlarına göre karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara göre %6 atık içeriğine sahip olan duvar karolarının mukavemeti 182,48 kg/cm² olarak hesaplanmış olup diğer fiziksel testleri de olumlu sonuç vermiştir. Ayrıca atık malzemenin, sürekli üretim sistemine entegrasyonunun sağlanması için de atık malzemenin deşirmene şarj edilme yöntemleri araştırılmıştır.

Research Paper

Received Date : 19/06/2022

Accepted Date : 31/08/2022

Keywords

Calcite
Waste Management
Sugar Beet Pulp
Circular Economy

Abstract

In this study, the usability of sugar beet filter press waste with high calcium oxide content (45.84%) instead of calcite in wall tile production was investigated. Sugar production wastes occurring in the sugar production could pollute the environment by forming heaps. Therefore, the harm of the wastes on the environment could be prevented by using of the sugar production wastes instead of the commercial products. Also, the wastes have a potential for alternative calcite raw materials, and thereby the decreases in the calcite reserves could be prevented. In this study, these wastes were used in the first time for the production of wall tile for a ceramic factory. For these purposes, the wastes from the sugar factory, which is produced in the secondary calcination step of the sugar production process, were used. XRF, XRD, TGA, particle size distribution, and moisture analysis of the waste material were performed. The results obtained were compared with the commercial calcite. Moreover, the physical properties of the tiles produced by adding 6%-12% waste by mass instead of calcite in the standard wall tile recipe were compared according to TSE standards. According to the obtained results, the strength of the tiles with 6% waste content was found to be 182.48 kg/cm². In addition, the methods were researched to ensure the integration of waste material into the continuous production system.

1. Giriş

Seramik duvar karoları diğer kaplama malzemelerine göre yüksek poroziteye ve su emmeye sahip kaplama malzemeleri olarak karakterize edilmektedirler (Dana,

2002; Nihan Ercioğlu, 2019). %10'un üzerinde su emmeye sahip olan duvar karoları; tek veya çift pişirim yöntemi ile 1100-1150°C sıcaklık aralığında 35-45 dakikalık pişirim sürelerinde üretilmektedir (Amorós JL, 2010; Amorós JL, 2002). Seramik duvar karosu bünyeleri kil-kaolen, kalsit ve

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): nihanercioglu@gmail.com



kuvars hammaddelerinin belirli oranlarda karışımı ile hazırlanmaktadır. Duvar karosu bünyesinde kullanılan kil ve kaolen bünyeye plastiklik sağlarken, CaO kaynağı olarak %10-15 civarında kullanılan kalsit ise kil ve kaolenin dekompozisyonu sonucu oluşan alümina-silikat ile reaksiyona girerek anortit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) oluşturmaktadır (Olokode, 2015; Sokolář, 2012). Duvar karosu üretiminde kullanılan kalsit, kalsiyum karbonat kaynağıdır. Kalsit (CaCO_3), seramik sektöründe 40-100 mikron boyutlarında öğütüldükten sonra reçetelere katılmaktadır. Seramik sektöründe de kalsit kullanımı son beş yılda hızlı bir artış göstermiştir. Kalsit bir mineral adı olup karbonatlı kayaları oluşturan bu mineralin kimyasal yapısı CaCO_3 'tür (Sokolář, 2012; Javier Castellano, 2022). Çeşitli şekillerde kristal halde bulunan (rombaeder, skalenoeeder şeklinde kristallenir) camsı parlaklıkta, renksiz saydam yapıdadır (WMorse, 1986). Kolay öğütülür ve beyaz renkli bir toz elde edilir. Sertliği mohs skalasına göre 3, yoğunluğu ise 2,6-2,7 aralığındadır. Ülkemizde kalsit adı ile üretilen mineral, karbonatlı kayaların (kireçtaşı, mermer, tebeşir) ana mineralidir (Javier Castellano, 2022; Remoroza, 2011).

Duvar karosu reçetesinde kompozisyonda feldispat gibi ergiticiler oldukça az miktarda kullanıldığından pişirim esnasında sinterleşme gerçekleşmez. Böylece, karbonatların dekompozisyonu ile duvar karosu bünyesi %30'un üzerinde porozite içeren ve dolayısıyla %10'un üzerinde su emme değeri olan bir yapıda oluşmaktadır (Swapan K.D., 2005; Escardino A., 2010). Oluşan poroz yapıdan dolayı, duvar karosu ürünlerde dikkat edilmesi gereken en önemli teknik özellik nem genleşmesi değeridir (Zvezdin, 2006). Nem genleşmesinin duvar karolarında ebatların büyümesi ile alakalı olarak %0,03'ü aşması durumunda sırda oluşan çekme gerilmelerinden dolayı sır çatlamalarını önlemek için sır basma gerilmesi bünye gerilme değerinin altında olacak şekilde üretim yapılmaktadır. Seramik duvar karoları reaksiyona girmemiş CaO, alkali oksitler, demir oksit, titan oksit gibi hammaddelerin oluşturduğu amorf camsı faz ve/veya reaksiyona girmeden kalan amorf aluminasilikattan dolayı nem genleşmesi gösterebilmektedirler (Zvezdin, 2006; Elimbi, 2014). Bu nedenle de bünye kompozisyonlarında feldispat, nefelin gibi ergiticiler oldukça düşük miktarlarda kullanılmaktadır (Zvezdin, 2006; V. I. Korkin, 1984; Nihan Ercioğlu, 2021).

Aynı etkiyi gösterebilecek seviyede CaO içeren şeker fabrikaları atıklarının (pres filter keki), kalsit yerine denenebileceği düşünülmektedir. Şeker fabrikası atıkları birçok farklı sektörde kullanılmaktadır (Erdem, M., Akdoğan, E., & Bekki, A, 2021). Şeker üretim endüstrisinde kireçtaşı; kok kömürü ile silindirik yapıya sahip olan kireç ocağına üst noktadan yüklenir ve yaklaşık 36 saat sonra kireç ocağının altından kireç olarak alınır. Elde edilen kireç, sıcak su ile söndürülerek süzülür ve şeker üretim

proseslerinde şerbet artımında kullanılır. Pancardan elde edilen belirli sıcaklıktaki ham şerbet ile kireç karıştırılır. Ham şerbet içindeki koloidal maddeler ile çökelti sağlanır (Kiliç). Şerbete ilave edilen fazla kireç, karbonatlama kazanlarında CO_2 ile şerbetten uzaklaştırılır. Buradan alınan çamurlu şerbetin çamur kısmı dekantörlerde çöktürülür. Çöken çamurlu kısım pres filtrelerin yardımı ile süzülür. Pres filtrelerden çıkan yaklaşık %70-80 kuru madde içeren atığa pres filtre keki (PFK) adı verilir (Kiliç; Bakanlık; Aydemir, 2017). PFK; katı atık yönetmeliği gereği bertaraf edilmesi veya açılacak çukurlarda depolanması gerekmektedir. Yeraltı suyunun kirlenmemesi için açılacak çukurların tabanlarına sızdırmazlık malzemesi döşenmesi zorunludur. Bu yasal prosedürler ışığında yıllık üretimde ortaya çıkan atığın çok fazla olması, şeker endüstrisine ek maliyetler getirmektedir. Eskişehir Şeker Fabrikası'nda 2015-2016 üretiminde, yaklaşık 50.000 ton pres filtre keki atık olarak ortaya çıkmıştır (Şeker).

İçerik olarak magnezyum kalsiyum karbonat olan bu atığın duvar karosu üretiminde kullanılmakta olan kalsit yerine kullanılması amaçlanmıştır. Böylece, PFK'nın seramik karo üretiminde değerlendirilmesi sonucunda çevresel ortama atılan şeker üretimi atıklarından yararlanarak hem ekonomik değeri yüksek olan bir ürünün üretilmesinin sağlanması hem de üretim sonrası açığa çıkarak yığınlar oluşturan şeker üretim atığının yararlı ürünlerin üretilmesinde kullanılarak, atıkların verdiği zararın minimize edilmesinin sağlanması amaçlanmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

Çalışma kapsamında, ürünün yapısal ve mekanik özelliklerinin korunarak, fırın proses optimizasyonu sağlanarak reçetelerde kullanılacak malzemelerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi planlanan duvar karosu seramik uygulamasında kullanılacak hammaddeler, farklı mevki/ocaklardan temin edilen kil, kalsit, pegmatit ve silis kumu, hammaddelerinden elde edilen harmanlar seçilerek reçeteler oluşturulmuştur. Reçetede kullanmış olduğumuz hammaddelerden olan kil iki farklı firmadan tedarik edilmiştir. Bu firmalar, Türkiye'de İstanbul şehrinde, Şile bölgesinde bulunan Sörhaz ve Erel Madencilik firmalarıdır. ESAN firmasından silis kumu, Sibelco Firmasından albit, pegmatit hammaddesi Hasözçelik ve Kayıhan Madencilik firmalarından ve kalsit Şahin Mineral firmasından tedarik edilmiştir. Bunun yanı sıra reçetede atık olarak kullanılan, şeker pancarı ikinci kireçleme atığı olan PFK Eskişehir Şeker Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Çamur reçetesinin reolojisi için gerekli olan silikat Likit Kimya firmasından tedarik edilmiştir. Bu ürünlerde yüksek saflıkta toz elde edilmesi gerekli değildir. Değirmenler içerisinde kullanılan su; fabrikamız atık su tesisinden elde edilen arıtma sularındır.

2.1. Şeker Pancarı İkinci Kireçleme Atığı (Pres Filtre Keki) Üretimi

Şeker pancarı çiftçi tarafından traktör, kamyon, vb. araçlarla fabrikaya doğrudan getirilir. Kabule uygun bulunan pancarlar silolara alınır. Silolarda bulunan pancar, yüzdürme kanallarından fabrikaya genellikle su ile sevk edilir (Şeker). Pancar yüzdürme kanalları vasıtasıyla fabrikaya sevk edilen pancar içindeki otlar kanallar üzerinde bulunan ot tutucuda, taşlar ise taş tutucuda ayrıştırılır. Taşından, kumundan ve toprağından kısmen ayrılan pancar; döner kollu yıkama teknesinde 10-15 dakika döndürülerek yıkanır. Yıkama işlemi; ön yıkama, esas yıkama ve durulamayı içerir. Yıkanan pancarlar, kıyım makinelerinde tırtıklı cıps şeklinde kıyılır. Kıyılan pancar nakil bandında sürekli otomatik kantarda tartılarak haşlama teknesine verilir. Kıyımlar silindirik bir kazan olan haşlama teknesine alınarak burada karıştırılır ve ısıtılır. Isıtma işlemi, Kule Difüzörü adı verilen dikey silindirik bir kazandan alınan sıcak sirkülasyon şerbeti ile yapılır. Haşlama teknesinde pancar kıyımları şerbetle karıştırılarak difüzyon kulesinin alt süzgecinin hemen üzerine basılır. Burada amaç kule içindeki sıcaklığın optimal difüzyon sıcaklığı olan 70-72 °C'ye getirilmesi ve pancarın hücrelerini denatüre ederek şeker çıkışının sağlanmasıdır. Kule içinde yatayla 30°'lik açı yapan dönen kanatlar vasıtasıyla kıyımlar kulenin altından tepesine doğru, ham şerbet ise kulenin alt kısmına doğru ilerler. Kulenin üstünden şekeri alınmış yaş pancar posası helezon vasıtasıyla pancar posası preselerine verilir. Kulenin alt ve yan süzgeçlerinden alınan sirkülasyon şerbeti tekrar haşlama teknesine verilir. Haşlama teknesine verilen şerbetin bir kısmı kıyım girişi tarafındaki süzgeç vasıtasıyla ham şerbet olarak çekilerek arıtıma verilir (Kiliç; Şeker).

Ham şerbet bir tekne içinde kireçlenerek kademeli olarak pH 11'e getirilir. Burada amaç şerbet içindeki şeker dışı maddeleri çöktürmektir. Difüzyondan alınan ham şerbetin kuru maddesi %12-17, şeker yüzdesi %11-15 ve saflığı yaklaşık 84-89 civarındadır. I. Kireçleme denilen bu işlem altı bölmeli, tabandan biraz yüksekte olan U şeklinde

levhalarla bölünmüş bir tekne içinde yapılır. I. Kireçleme pancara göre %0,2 CaO içerir ve kireçleme süresi 20 dakika, sıcaklığı 65 °C, son bölmenin pH'sı ise 11 civarındadır (Şeker).

I. ve II. Kireçlemeden geçen ham şerbet 80-82 °C'de I. Karbonatlamaya gelir. Karbonatlama kazanı silindirik bir kuleye benzemekte olup, ters akım prensibine göre çalışmaktadır. Kireçlenmiş şerbet üstten, karbondioksit gazı ise alt kısımdan verilir. Çökme işlemi tamamlanmış şerbet, karbonatlama kazanının alt kısmından alınır. I. Karbonatlamaya pH'ı 12 olarak gelen kireçli şerbet, I. Karbonatlamayı 10,8-11,2 arasındaki pH ile terk eder. I. Karbonatlama sonrası çamurlu şerbet, yoğunluk farkı dolayısıyla çamur parçacıklarının dibe çökmesi ilkesine dayanan bir dekantörde çöktürülür. Dekantörün üstünde berrak şerbet altında ise çamurlu şerbet birikir. Dekantör çamurlu şerbeti pompa vasıtasıyla pres filtrelelere veya döner filtrelelere göndererek şerbetin çamurdan ayrılması sağlar. Filtre sonrası elde edilen şerbet, dekantörün üstündeki berrak şerbet ile karıştırılarak ısıtıcılara gönderilir. Isıtıcılarda 94-96 °C'ye kadar ısıtılan şerbet II. Karbonatlamaya basılır. Açığa çıkan %70 kuru maddeli çamur 'Pres Filtre keki (PFK)' olarak tanımlanmaktadır (Şeker; Aydemir, 2017).

2.2. Reçetelerin Geliştirilmesi

PFK, içerik olarak %70-80 oranında kalsit (CaCO₃) ihtiva etmekte olduğundan seramik karo imalatında kullanılan ticari kalsit yerine geçebilecek alternatif malzeme olarak reçetede kullanılmıştır. Reçeteler bu kapsamda oluşturulmuştur. Tablo 1'de standart duvar karo reçetesinin bileşenlerinin kütlece oranları verilmiştir. Atık kullanımı amacıyla, Tablo 1'de verilen standart duvar karo reçetesi içerisine, standart reçetede bulunan miktar olan kütlece %12 oranından başlanılarak, farklı oranlarda PFK ilave edilerek reçeteler hazırlanmıştır.

Tablo 1. Standart duvar karo reçetesi bileşenlerinin kütlece oranları

Numune (%m)	Kil1	Kil2	Pegmatit	Silis	Kalsit	PFK
Standart	32	20	21	15	12	-
DB220	32	20	21	15	6	6
DB221	32	20	21	15	-	12

2.3. Laboratuvar Ölçekli Granül ve Seramik Üretim Prosesi

Geleneksel seramik ürünlerin üretiminde mekanik yöntemlerle toz üretimi yaygın olarak kullanılmaktadır. En

yaygın tane boyutu küçültme yöntemi bilyeli öğütmedir. Bilyeli değirmenler (ball milling), silindirik, küre ya da çubuk şeklindeki bir öğütme ortamı ve çözücü (su) ile dolu kendi eksenini etrafında dönerler. Böylece kullanılan hammaddeleri incelterek tane boyutunu küçültürler. Bu

amaçla, öğütme işlemlerimizde Ceramic Instrument markalı alümina bilyeli jet değirmenler kullanılmıştır. Değirmen içerisine konulan 500 gram malzemenin öğütme işlemi 25 dakika süresince 200 rpm hızla gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemi tamamlandığında hazırlanan çamur tepsiler içerisine dökülerek etüv içerisinde 1000C sıcaklıkta kuruyana kadar bekletilmiştir. Kurutma işlemi tamamlanan çamur demir merdaneler yardımı ile ezilerek toz haline getirilmiştir. Toz tane boyutunu ayarlamak ve granül elde etmek için 325 µm boyutundaki eleklerden geçirilerek granül masse edilmiştir.

Toz malzeme Şekil 1'de gösterilen el presi kullanılarak 140 bar basınç ile 10x20cm2 boyutlarında preslenir. Böylece ham karolar elde edilmiş olur. Tüm reçeteler, duvar karosu pişiriminde kullanılan fırın rejimi olan, 1145 °C ve 41 dk fırın rejiminde pişirilmiştir. Elde edilen karolar kırılarak, atık malzemenin black core oluşumuna etki edip etmediği incelenmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar ölçekli el presi

2.4. X-Işınları Floresans Spektrometresi ile Kimyasal Analiz

XRF sistemleri ile farklı formlardaki numunelerde bor-uranyum aralığındaki elementlerin analizleri numune matrisine bağlı olarak, ppt-% konsantrasyon mertebesinde, tahribatsız, hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılmaktadır. Kaba olarak gelen numune tungsten karbür kobalt (WC-Co) hallkallı öğütücü ile ~63 µm altına gelecek şekilde öğütülmektedir. Daha sonra numune ~105±5°C etüvde 4 saat kurutulmak üzere bekletilmektedir. Ham numunelerin, ~1000°C'de kızdırma kaybına bakılmaktadır. XRF analizinin gerçekleştirilebilmesi için numuneler eritiş yöntemi ile hazırlanmıştır. XRF cihazı ile katı ve sıvı örneklerin elementel veya bileşik olarak kalitatif, yarı-kantitatif ve kantitatif analizleri yapılmaktadır. Platin kroze içerisinden çıkarılan camlaştırılmış numuneler XRF cihazına yerleştirilerek analizleri gerçekleştirilmiştir. Bor'dan Uranyum'a kadar olan elementler için tarama yapılmıştır. PFK ve kalsit, Seramik Araştırma Merkezi'nde

uygun metoda göre hazırlanıp Rigaku marka ZSX Primus model XRF cihazı ile ölçüme alınmıştır.

2.5. X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizi

X-Işınları Difraksiyonu (XRD) yöntemi ile katıların kristal yapıları incelenmekte ve içeriğindeki fazlar tespit edilmektedir. X-Işını Kırınım yöntemi, her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanmaktadır. Her bir kristal faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. Kaba olarak gelen numuneler tungsten halkalı öğütücü ile ~63 µm altına gelecek şekilde öğütülmelidir. Daha sonra numune ~105±5°C etüvde 4 saat kurutulmak üzere bekletilmektedir. Numuneler, Seramik Araştırma Merkezi'nde uygun metoduna göre hazırlanarak Rigaku marka Miniflex 600 model XRD cihazı kullanılarak standart tarama aralığında ($2\theta=5^\circ -70^\circ$) ölçüm yapılmıştır.

2.6. Termogravimetrik Analiz

Numunede sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle kaybı ve/veya kazanımlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Geliştirilen bünyelerin kalsinasyon sıcaklıkları TG-DTA Cihazı, STA 409PG LUXX marka ve model cihaz kullanılarak incelenmiştir. Kalsiyum karbonat bileşiğinin kalsine olduğu sıcaklık araştırılmıştır ve termal gravimetrik analiz cihazıyla kalsinasyon sıcaklığı ölçülmüştür ve kalsitin TGA sonucu ile karşılaştırılmıştır.

2.7. Tane Boyut Analizi

Kalsit ve PFK, uygun ortamlarda dağıtılarak (su) tane boyut ve dağılımı Malvern Mastersizer 2000 G marka cihazında lazer difraksiyon yöntemiyle ölçülmüştür. Lazer difraksiyon yöntemiyle tane boyut ve dağılımı ölçülen solüsyonların d(0,1), d(0,5) ve d(0,9) değerleri belirlenmiştir. Burada, d(0,1); süspansiyon içerisindeki partiküllerin hacimce %10'unun küçük olduğu boyut değerini, d(0,5); solüsyonların içerisindeki partiküllerin hacimce %50'sinin küçük olduğu boyut değerini ve d(0,9); solüsyonların içerisindeki partiküllerin %90'ının küçük olduğu boyut değerini temsil etmektedir.

2.8. Su Emme Testi

Su emme testi için, Gabrielli markalı vakumlu su emme cihazı kullanılmaktadır. Duvar karolarda su emme değerinin $10\% < E \leq 20\%$ değerleri arasında olması beklenmektedir. 10x20 cm2 ebatlarında preslenip pişirilen numune iki

parçaya bölünür. Parçalardan bir tanesi su emme testi için ayrılır. Alınan parçaların kuru ağırlıkları tartılır (wk) kaydedilir. Parçalar dik olarak numune taşıyıcı kaba yerleştirilir. Vakum altında 45 dakika boyunca tamamı suya batmış olarak bekletilmiştir. Vakumdan çıkarılan numunelerin yüzeyindeki su bir havlu yardımı ile kurulanmıştır. Parçalar tek tek tartılarak su emiş ağırlıkları (wd) kaydedilmiştir. Bulunan tartım sonuçları kullanılarak, su emme yüzdesi hesaplanmıştır.

2.9. Üç Nokta Eğme Testi

3 Nokta eğme testi, iki desteğe serbest olarak oturtulan, dikdörtgen kesitli düz bir numune parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir kuvvet uygulandığında oluşan biçim değiştirmesi olarak tanımlanmaktadır. Numunelerin ham-kuru ve pişmiş mukavemetleri Ceramic Instruments marka MOR 3-E modeli 3 nokta eğme cihazında ölçülmüştür. Aşağıda verilen denklem yardımı ile hesaplanmıştır. Eğme deneyi sonucunda eğme momenti (P) cihazdan okunur. Böylece; çubuğun genişliği (b), numune kalınlığı (d) ve mesnetler arası mesafe (destek aralığı, L) değerleri yerine konularak mukavemet (σ) Eşitlik 1'deki gibi hesaplanır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Tüm reçeteler, 1145 °C-41 dakika fırın rejiminde pişirilmiştir. Yapılan testlerden kimyasal analiz, XRD, TGA ve tane boyutu analizi, elek bakiye ve rutubet oranı testleri kalsit ve pres filtre kekine uygulanırken; pişme küçülme, üç

nokta eğme, su emme, küçük renk farklılıkları testleri standart ve tasarlanan duvar karosu reçetelerine uygulanmıştır. Kalsit ve pres filtre kekinin elek bakiye ve rutubet değerleri kontrol edilmiştir. Elek bakiye oranları ve rutubet değerleri ise sırasıyla pres filtre kekinin %6,21 ve %27,54 iken kalsitin %0,74 ve %0,15'tir. Bu değerler, pres filtre kekinin sürekli üretim sistemine doğrudan şarj edilmesini engellemekte olup bu sorun süreç iyileştirme için teknik yaklaşımlar bölümünde ele alınmıştır.

3.1. Kimyasal ve Minerolojik Analizler

PFK'nin ve ticari kalsitin kompozisyon karakterizasyonu, XRF cihazıyla yapılmıştır. Standart duvar karosunda kullanılan ticari kalsit ve atık malzeme olan PFK'nin kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'den de görülebileceği gibi, CaO oranının PFK atığında ~%46, ticari kalsitin içeriğinde ise ~%55 oranında bulunduğu tespit edilmiştir. PFK atığındaki MgO oranı, kalsit malzemesinin içeriğine kıyasla yaklaşık olarak 5,3 katı miktarda ölçülmüştür. MgO, yüksek sıcaklıklarda ergitici olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, düşük miktarda magnezyum termal genleşmeyi kontrol etmeye yardımcı olur. Kalsit hammaddesinin XRF analizinde, eser miktarda Mg içeriğine rastlanmıştır. Bunun yanı sıra, PFK atığında, ticari kalsite kıyasla Na₂O oranının ise 33 kat fazla olduğu XRF sonucundan hesaplanmıştır. Bünyelerde toplam alkali içeriğinin artması ile ergitici özellik de artmaktadır. Ateş zayıyatı bünyedeki organik madde ve sudan ileri gelmekte olup kalsit ve PFK'de sırasıyla, ~%43 ve %46 olarak ölçülmüştür. Bunların dışındaki tespit edilen bileşiklerin benzer özellikte olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Ticari kalsit ve pres filtre kekinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)

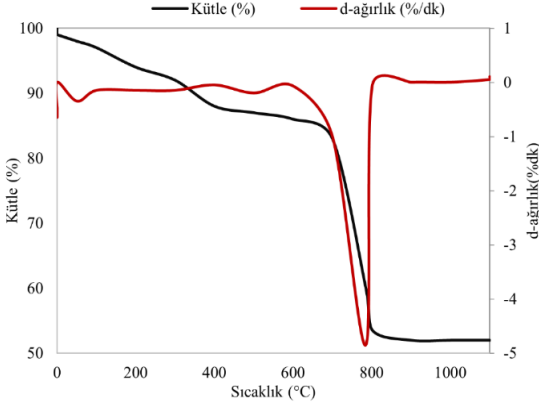
	Kızdırma Kaybı (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	FeO ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
Kalsit	42,67	0,81	0,21	0,01	0,08	55,48	0,63	0,05	0,02
PFK	46,00	0,70	0,45	0,02	0,25	45,84	3,36	1,64	0,00

Kalsit ve PFK atığını minerolojik olarak incelemek için XRD grafikleri oluşturulmuş olup, pres filtre kekinin minerolojik analizi sonucunda içeriğindeki %76 oranında kalsiyum karbonatı, MgCaCO₃ formunda bulundurduğu tespit edilmiştir. Ticari kalsit numunesinin XRD sonucu analiz edilmiş olup içeriğinde yüksek oranda kalsit (CaCO₃) fazının olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, kalsit içeriğindeki eser miktardaki Mg içeriğinden kaynaklı olarak, dolomit (CaMg(CO₃)₂) fazının da bulunduğu tespit edilmiştir.

3.2. Termal Gravimetrik Analiz

Numunenin kütlelerinde artan sıcaklık sonucu meydana gelen ağırlık değişimleri kantitatif olarak ölçülmüştür. İçeriğinde ~%46 oranında söndürülmemiş kireç (CaO) bulunduran pres filtre kekinin termal gravimetrik analizi ile kalsinasyon sıcaklığı incelenerek, CaMg(CO₃)₂ bileşiğinin kalsine olduğu sıcaklık tespit edilmiştir. Pres filtre kekinin TGA sonucu Şekil 2'de verilmiştir. Pres filtre kek atık malzemesinin TGA grafiği sonucuna göre içeriğinde bulunan CaMg(CO₃)₂ kalsinasyonu 727 °C ve 776°C aralığında gerçekleşmektedir. Pres filtre kek malzemesi,

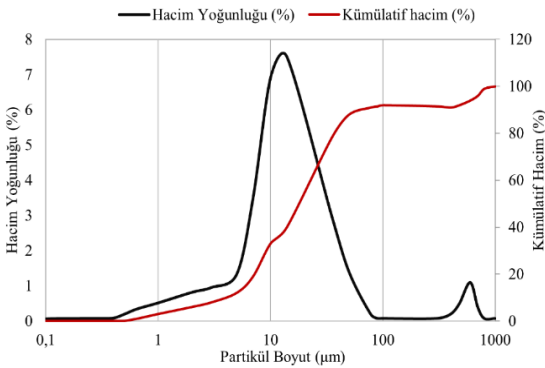
kalsinasyonu 700-800°C sıcaklık aralığında gerçekleşen kalsit ile bozunma sıcaklığı açısından benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak, duvar karosu pişirim uygulaması sırasında PFK'nin, kalsitin reaksiyona girdiği sıcaklıkta reaksiyona gireceğinden dolayı pişirmede herhangi bir soruna neden olmayacağı anlaşılmıştır. Bu sonuca bağlı olarak atık malzeme ile üretilen ürünlerin pişme küçülme değerlerinin, standart duvar karosu pişme küçülme değerleri ile yakın sonuçlar elde edileceği ön görülmektedir.



Şekil 2. Pres filtre kekin TGA sonuç grafiği

3.3. Tane Boyut Dağılımı Analizi

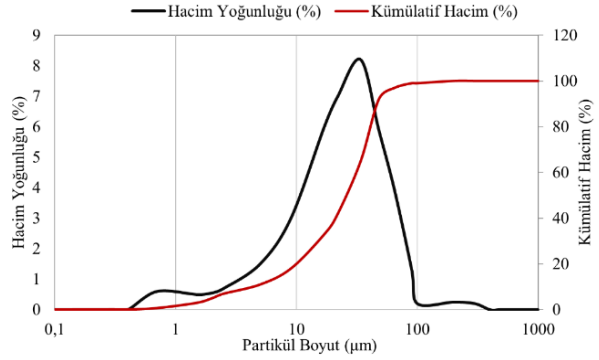
PFK ve kalsitin tane boyut dağılımının analizi yapılmıştır. Lazer difraksiyon yöntemiyle tane boyut ve dağılımı ölçülen solüsyonların d(0,1), d(0,5) ve d(0,9) değerleri belirlenmiştir. Şekil 3'te bulunan grafiğe göre filter pres atığının d(0,5) değeri 40 µm olarak ölçülmüştür. Bu veriler incelendiğinde FPC atığının tane boyut dağılımının heterojen olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Pres filtre atığı tane boyutu analizi

Firma bünyesinde kullanılan kalsit mikronize kalsit olup kalsitin tane boyut dağılımı analizine göre, d(0,5) değeri 15,6 µm olarak ölçülmüştür. Kalsit tane boyutu analizi Şekil 4'te gösterilmektedir. Tane boyutu ölçüm sonuçlarına göre

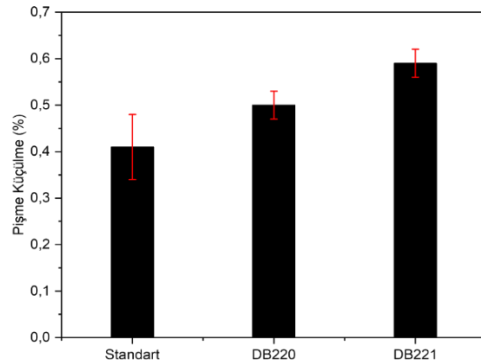
pres filtre kekinin tane boyutu, kalsitin tane boyutundan yaklaşık 2,5 kat daha büyük olarak ölçülmüştür.



Şekil 4. Kalsit tane boyutu analizi

3.4. Pişme Küçülme Oranları

Şekillendirilen numuneler etüvde 100°C'de kurutulduktan sonra, 1145 °C ve 41 dakika fırın rejiminde pişirilmiştir. %6 kalsit ve %6 PFK içeren DB220 reçetesi ve %12 PFK içeren DB221 reçetesinin pişme küçülme değerleri sırasıyla %0,5 ve %0,59'dur. Kalsit ile PFK ilave edilen reçetenin pişme küçülmesi Reçete içerisinde %6 ve %12 PFK bulunan numunelerin pişme küçülme oranları Şekil 5'te verilmiştir. Sonuçların standarta yakın olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5). DB221 (%12 atık) numunesi hiç ticari kalsit içermemesine rağmen pişme küçülme değeri standarta göre önemli bir artış göstermemiştir ve bu özellik, pişme küçülme oranının düşük olması duvar karo üretiminde istenilen bir özelliktir. PFK kızdırma kaybının kalsitin kızdırma kaybından büyük olması ve %10 oranındaki CaO miktar farkı, atık içerikli olan numunelerin pişme küçülme oranlarının standart duvar karosu reçetesininkinden bir miktar fazla olmasına neden olmuştur. Gözlemlenen pişme küçülme değerleri açısından CaO içeriği yüksek olan pres filtre atığın duvar karosu üretiminde kalsit yerine kullanılmasında sakınca olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Duvar karosu pişme küçülme oranlarının karşılaştırılması

3.5. Üç Nokta Eğme Testi

Ceramic Instruments markalı üç nokta eğme cihazında yapılan eğme mukavemeti testi sonucunda DB221, DB220 numunelerinin eğilme mukavemetleri standarta göre zayıf olduğu tespit edilmiştir. DB221 numunesinin eğilme mukavemeti standarta göre %34, DB220 numunesinin eğilme mukavemeti ise standarta göre %13,7 azalmıştır. PFK girdisi mukavemeti düşürmüştür. TSE standartlarına göre duvar karosu minimum mukavemeti 175 kg/cm² olması gerekmektedir. Atık içerikli ürünlerden DB220 ürünü TSE standartını sağlamıştır. Eğme mukavemet değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Mukavemet testi sonuçları

	DB220	DB221	Standart
Mukavemet Değerleri (kg/cm ²)	182,48	139,44	211,33

3.6. Su Emme Testi

Numunelerin su emme testleri, vakumlu su emme cihazında vakum altında bekletilerek yapılmıştır. Numunelerin su emme değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 4'de verilmiştir. Su emme değerlerine göre DB221 numunesi en yüksek su emme değerine sahiptir. DB220 numunesinin ise su emme değeri standartından daha düşük hesaplanmıştır. Sonuç olarak, düşük oranda PFK ilaveli DB220 numunesinin su emme değeri standarta göre düşüken, kalsitin tamamen çıkarılıp pres filtre kekinin ilave edildiği DB221 kodlu numunede su emme değerinde artışın olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4. Su emme testi sonuçları




	DB220	DB221	Standart
Su Emme Değerleri (%)	17,76	20,47	18,23

3.7. Küçük Renk Farklılıkları Tayini Testi

Pişirimi tamamlanan karoların renk değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. Tablo 5'te değerler verilmiştir. Küçük renk farklılıkları testinin sonuçlarında, kalsit içerikli standart numune ile atık girdisiyle üretilen numunelerin L, a, b sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak pres filtre kekinin kalsit yerine kullanımında, duvar karosu massesinin rengini standarda göre değiştirmedeği görülmüştür. Bu sayede pres filtre atığının

renk konusunda kalsitle benzer davranış gösterdiği kanıtlanmıştır. Tablo 5'te ürünlerin renk görünümü için görselleri paylaşılmıştır.

Tablo 5. Renk ölçüm değerleri

	DB220	DB221	Standart
L	69,80	70,87	70,01
a	8,43	7,73	8,74
b	19,61	18,70	19,03
Görsel			

3.8. Süreç İyileştirme İçin Teknik Yaklaşımlar

Pres filtre atığının değirmene şarj edilmesinin iki yolla mümkün olabileceği öngörülmüştür. Birinci yolda, rutubet değeri %27,54 olan pres filtre atığının hammadde sahasına serilerek doğal kurutma yöntemiyle rutubet oranının %16 ve altına kadar düşürülebilir. Sonraki adımda ise pres filtre atığının, duvar karosu standart reçetesinde varolan killer ile harman yapılması, kilin kırıcıdan geçirilmesi ve değirmene kil beşerleri aracılığıyla şarj edilirliliği öngörülmüştür; ancak bu yöntemin uygulanması sürekli üretim sisteminde sorunlar ortaya çıkarabilir. Bu sorunlardan ilki uygulanması planlanan doğal kurutmada dolayı yüksek alan ve süre gereksinimi olmuştur. İkinci ve en önemli sorun ise filtre pres atığı oranının sürekli değişkenlik göstermesidir. Bunun sebebi ise filtre atığının tane boyutlarının büyük olması ve harmanın kepçe ile gerekli hassasiyetten uzak yapılmasıdır. Bu sorun, duvar karosu için kritik öneme sahip olan CaO oranının reçeteye stabil olarak giremeyeceği anlamına gelmektedir. Ayrıca, atık malzemenin değirmende öğütüldükten sonra kalıntı (20-63 µm arası tane boyutu) halinde kalabilme ihtimali de vardır.

Atık malzemenin çamur içerisinde kalıntı halinde kalması (20-63 µm arası tane boyutu), bir başka deyişle, istenen tane boyutuna (yaklaşık 15 µm) indirilememesi, pişirme sonrasında, yapıda serbest CaO bileşiklerinin kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, nihai ürünün kullanım esnasında rutubet ile karşılaşmasıyla yapıda kalan serbest CaO bileşiklerinin reaksiyon göstererek yapıyı çatlatma riskini ortaya çıkarmaktadır. Diğer taraftan, nihai ürünün içerisindeki atık malzeme oranı, harmanın karışım hassasiyetinin düşük olması sebebiyle, sürekli değişkenlik gösterebilir. Bunun sonucunda, CaO oranının kritik olduğu pişme küçülme değerleri, pişirim süreleri, ham ve pişmiş ürün mukavemetleri, su emme değerleri büyük sapmalar gösterecektir. Tüm bu sorunlardan dolayı ilk yöntemin uygulanması reddedilmiştir.

İkinci yolda, pres filtre atığının değirmene pnömatik sistemle şarj edilmesi planlanmıştır. Bunun için pres filtre atığı kurutma fırınında kurutulur ve kuru öğütücüde öğütülür. Bu sayede atık malzeme, duvar karosu değirmenine girmeden önce istenilen elek bakiye ve nem değerlerine ulaştırılabilir. Bu işlemlerden sonra atık malzeme ve kalsit %50+%50 karışım yapılarak pnömatik sistemle değirmene dahil edilebilir. İşletmede tek pnömatik şarj sistemi olmasından dolayı, pres filtre atığının duvar karosu değirmenine şarjı ancak kalsitle karıştırılarak mümkün olabilmektedir. Bu yöntem ile pres filtre atığının tane boyutu ve elek bakiye oranındaki istenilen seviyeler, atığın duvar karosu değirmenine şarjından önce sağlanır. Bu sayede atık malzeme, duvar karosu karışımı içerisine sabit oranda ve gereken hassasiyette dahil edilebilmektedir. Aynı zamanda bu yöntem, atık malzemenin çamur içerisinde kalıntı olarak (20-63 µm arası tane boyutu) bulunma riskini ortadan kaldırmaktadır. Böylece nihai ürünün kalsit içeriğindeki değişimler ve pişme sonrası yapıda serbest CaO kalıntılarının bulunması engellenebilir. Ayrıca, kurutmanın kurutma fırınıyla yapılmasından dolayı hem zamandan hem de alandan tasarruf edilecektir. Tüm avantaj ve dezavantajlar gözönüne alındığında pres filtre kekinin ancak pnömatik sistemle %6 oranında kalsit yerine reçeteye beslenebileceği kanaatine varılmıştır.

4. Sonuçlar

XRF sonuçlarına göre pres filtre atığı, %45 CaO içeriğiyle, %55 CaO içeren kalsit yerine kullanılabilir alternatif bir malzeme olarak görülmüştür. TGA analizi ile kalsit ve pres filtre kekinin CaO oluşum sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar duvar karosu pişirimi sırasında oluşacak olan reaksiyonların başlangıç sıcaklıklarında sapma olmayacağını kanıtlanmıştır. Hammaddelere uygulanan diğer testler neticesinde pres filtre kekinin tane boyutu, elek bakiye ve rutubet değerlerinin kalsitin değerlerinden çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Pres filtre kekinin tane boyutu d(0,5):40 µm iken kalsitin d(0,5):15,6 µm'dir. Pres filtre kekinin elek bakiyesi ve rutubet değeri ise sırasıyla %6,21 ve %27,54 iken kalsitin %0,74 ve %0,15'tir. Bu değerler, pres filtre kekinin sürekli üretim sistemine doğrudan şarj edilmesini engellemektedir ve bu sorun süreç geliştirmede teknik yaklaşımlar bölümünde ele alınmıştır.

Pres filtre keki içeren ürünlerin pişme küçülme, su emme, L, a, b değerlerinin standart ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Reçetede, pres filtre keki oranının artmasıyla mukavemetin düştüğü tespit edilmiştir. Tüm kalsitin çıkarılıp yerine pres filtre kekinin kullanıldığı üründe mukavemet değeri TSE standartının altına düşmüştür (139,44 kg/cm²<175 kg/cm²). Bu sonuç, kalsitin

yerine tamamen pres filtre kekinin girilemeyeceğini göstermektedir; ancak hem kalsit hem de pres filtre kekinin reçeteye birlikte girilmiş olduğu DB220 numunesinin mukavemet değeri (182,48 kg/cm²>75 kg/cm²) standartları karşılamaktadır. Ayrıca, pres filtre keki içeren ürünlerin standart duvar karosu reçetesine göre pişme küçülme oranlarının daha yüksek olduğu görülmüştür; ancak gözlemlenen fark çok azdır. Yapılan deneysel çalışmalara göre kalsit yerine pres filtre keki ilavesiyle üretilen ürünlerden, standarta en yakın özellik gösteren ürün DB220 (%6 kalsit + %6 pres filtre keki) reçetesi olmuştur.

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

Proje çalışmaları süresince finansal destek sağlayarak çalışmanın ortaya çıkmasına destek olan Seranit Grup yönetim kuruluna ve Seranit Seramik Fabrikası yönetim kuruluna teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Emre Akdoğan'a değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Amorós JL, O. M.-T. 2010. Porous single-fired wall tile bodies: Influence of quartz particle size on tile properties. J. Eur. Ceram.Soc., 30, 17-28.

- [2] Amoros JL, S. E. 2002. Mechanical properties of green ceramic bodies. *Applied Ceramic Technology*, 2, 96-143.
- [3] Aydemir, K. 2017. Elazığ Şeker Fabrikasında Enerji ve Ekserji Analizi. Elazığ: Fırat Üniversitesi.
- [4] Bakanlık, T. Ç. (n.d.). Sanayiden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Belirlenmesi ve Azaltılmasına Yönelik Uygulamanın Kolaylaştırılmasının Sağlanması Projesi. Retrieved from https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/24_seker-uret-m--20200103075114.pdf
- [5] Dana, K., 2002. Some Studies on Ceramic Body Compositions for Wall and Floor Tiles. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 61, 83-86.
- [6] Elimbi A. D., 2014. Effects of Alkaline Additives on the Thermal Behavior and Properties of Cameroonian Poorly Fluxing Clay Ceramics. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2, 484-501.
- [7] Erdem M., Akdogan E., Bekki, A., 2021. Optimization and characterization studies on ecopolyol production from solvothermal acid-catalyzed liquefaction of sugar beet pulp using response surface methodology. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16. doi:<https://doi.org/10.1007/S13399-021-01579-7>
- [8] Escardino A., G.-T. J., 2010. Calcium carbonate thermal decomposition in white-body wall tile during firing. I. Kinetic study. *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 1989-2001.
- [9] Javier Castellano V. S., 2022. Composición para baldosas de revestimiento escalable a nivel industrial basada en la economía circular. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- [10] Kiliç S. (n.d.). Dünya ve Türkiye'de şekerin Tarihçesi. Çanakkale: On Dokuz Mayıs Üniversitesi. Retrieved from <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/serdar.kilic/133433/3-%20C5%9Eeker%20C3%9Cretimi.pdf>.
- [11] Nihan Ercioğlu E. U. 2021. An environmentally-friendly process for preparing commercial ceramic foam composites based on frit/glass wastes. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18, 850-861. doi:10.1111/ijac.13683.
- [12] Nihan Ercioğlu E. U., 2019. Arıtma Tesisinden Geri Kazanılan Preslenmiş Atığın Seramik Yer Karosu Bünyesinde Alternatif Hammadde Olarak Kullanılması İçin Formülasyon ve Süreç Geliştirme. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, (Özel sayı), 54-61.
- [13] Olokode O. S., 2015. Strength Characteristics of Nigerian Quartzitic and Kaolinitic Clays in Wall Tile Composition. *Journal of Natural Sciences Engineering and Technology*, 10, 116-126.
- [14] Remoroza A., (2011). Calcite Mineral Scaling Potentials of High-Temperature Geothermal Wells. *Geology*.
- [15] Sokolář R. V., 2012. Mechanical properties of ceramic bodies based on calcite waste. *Ceramics International*, 38, 6607-6612.
- [16] Swapan K. D., 2005. Shrinkage and strength behaviour of quartzitic and kaolinitic clays in wall tile compositions. *Applied Clay Science*, 29, 137-143.
- [17] Şeker T., (n.d.). Şeker Üretim Teknolojisi. Retrieved from <https://www.turkseker.gov.tr/?ModulID=3&MenuID=55>.
- [18] Korķin V. I., Solnyshkina T. N., Mamchur N. I. , 1984. Natural diopside product as promising ceramic material. *Steklo Keram*, 3, 21-22.
- [19] Morse, J. W., 1986. The surface chemistry of calcium carbonate minerals in natural waters: An overview. *Marine Chemistry*, 20(1). doi: [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(86\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0304-4203(86)90068-X).
- [20] Zvezdin D. K., 2006. Moisture expansion of ceramic tiles in double firing. *Glass Ceram*, 63, 20-21. doi:10.1007/s10717-006-0025-9.



Al-7Si-0.3Mg Alaşımının Isıl İşlem Prosesinin Calphad Metodolojisi ile Modellenmesi ve Simülasyonu

Modeling and Simulation of The Heat Treatment Process of Al-7Si-0.3Mg Alloy with Calphad Methodology

Yağız AKYILDIZ¹ , Bartu SİMSAR² , Ümit KUTSAL³ , Yağız ARSLAN⁴ , Adnan AKMAN⁵ , Atıf KARKINLI⁶ , Rıdvan YAMANOĞLU^{7,*} 

¹Onatus Öngörü Teknolojileri, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-6012-9795

²TUSAŞ, Ankara, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1041-6504

³Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-8426-0050

⁴Onatus Öngörü Teknolojileri, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-2769-5215

⁵Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, TU Delft, Hollanda, **Orcid:** 0000-0002-6873-7311

⁶Metaller ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1258-9281

⁷Metaller ve Malzeme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 000-0002-4661-8215

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 17/05/2022

Kabul Tarihi : 01/09/2022

Anahtar Kelimeler

Al-7Si-0.3Mg
A356
Isıl İşlem
Modelleme
Simülasyon
Thermo-Calc

Research Paper

Received Date : 17/05/2022

Accepted Date : 01/09/2022

Keywords

Al-7Si-0.3Mg
A356
Heat Treatment
Modelling
Simulator

Özet

Al-Si-Mg alaşımlarında çökelti sertleşmesi yöntemi ile mukavemet artışı sağlanabilmektedir. Çökelti sertleşmesi prosesinde sıcaklık ve süre önemli bir parametredir. Su verme prosesi sonrasında, aşırı doymuş yapının belirli bir sıcaklıkta belli bir süre tutulması ile denge dışı çökelti oluşturularak mukavemet artışı sağlanmaktadır. Bu modelleme ve simülasyon çalışmasında Al-7Si-0.3Mg alaşımının Thermo-Calc yazılımı ile sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları analiz edilmiştir. Alaşım içerisindeki fazların kritik dönüşüm sıcaklıkları hesaplanmıştır. Ayrıca TC-Prisma yazılımı ile 180°C'de farklı yaşlandırma süreleri (2, 4, 6 ve 8 saat) ile çökelti boyutu ve mukavemet analizleri yapılmıştır. Böylece alüminyum alaşımlarına sık uygulanan ısıtım prosesinin modelleme ve simülasyon çalışmaları ile analizleri yapılarak proses dizaynı konusunda öngörüler ortaya konmuştur. Çalışmanın çıktıları ile Türkçe literatüre katkı sunulması amaçlanmıştır.

Abstract

Strength can be increased with the precipitation hardening method in the Al-Si-Mg alloys. Temperature and time are important parameters in the precipitation hardening process. After the quenching process, by keeping the supersaturated structure at a certain temperature for a certain period, non-equilibrium precipitates are formed, resulting in an increase in strength. In this modeling and simulation study, temperature-dependent phase fractions of Al-7Si-0.3Mg alloy were analyzed with Thermo-Calc software. The critical transformation temperatures of the phases in the alloy were calculated. In addition, precipitate size and strength analyzes were performed with TC-Prisma software at 180°C with different aging times (2, 4, 6, and 8 hours). So, the heat treatment process, which is frequently applied to aluminum alloys, has been analyzed with modeling and simulation studies, and the prediction about the process design has been revealed. It is aimed to contribute to the Turkish literature with the outputs of the study.

1. Giriş

Alüminyum esaslı malzemeler yüksek spesifik mukavemetleri, üstün korozyon dirençleri, ısıtım ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle demir dışı malzemeler arasında oldukça fazla tercih edilmektedirler. Alüminyum alaşımları

içerisinde, Al-Si alaşımları; başta otomotiv, havacılık ve savunma sanayisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1-4]. Al-Si alaşımları, genel döküm alaşımlarının yaklaşık olarak %90'ını oluşturmaktadır ve bu alaşım grubunda, genellikle ilk olarak ötektik altı Al-7Si-0.3Mg (A356) alaşımı akla gelmektedir. Alaşıma ilave edilen Mg

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): ryamanoglu@kocaeli.edu.tr



sayesinde, T6 ısıtma işlemi uygulanarak mukavemet değerlerinde etkili bir artış sağlanmaktadır [5-7].

T6 ısıtma işlemi çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarından oluşur. Çözeltiye alma işlemi, alaşım içerisinde mukavemete katkı sunan Mg_2Si , Al_2Cu ve Al_3Sc gibi çökeltilerinin solvüs sıcaklığının üzerinde belli bir süre tutulması ile gerçekleşir. Bu sayede tane sınırlarında sürekli yapıda oluşan bu çökeltilerin α -Al içerisinde çözünmesi sağlanır. Çözeltiye alma ile elde edilen homojen yapıya su verilerek aşırı doymuş α -Al taneleri elde edilir [8]. Ardından solvüs sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta, magnezyum ve silisyumun difüzyonuna izin verilerek denge dışı çökeltilerin oluşturulması sağlanır. Yaşlandırma prosesinde ilk olarak, çok hızlı oluşup büyüyen Guinier-Preston (GP) çökeltileri; sürenin artması ile birlikte, difüzyon devam ederken β'' ve β' çökeltileri oluşmaktadır [9, 10].

Günümüz mühendislik çalışmalarında, modelleme ve simülasyon analizleri ile mühendislik problemlerinin çözümlenmesinin önemi giderek artmaktadır. Dijital tasarım süreçleri, mühendislik parçalarının kimyasal bileşiminden yola çıkılarak üretimi, imalat zinciri döngüleri, nihai işlemler ve servis koşullarının bir bütün olarak bilgisayar ortamında dijital ikizlerinin oluşturulmasına dayanmaktadır [11, 12]. Bu yaklaşım ile mühendislik parçalarının tasarım ve optimizasyon çalışmalarında; olası hatalar engellenmekte, optimum proses parametreleri ve nihai malzeme özellikleri saptanmakta, çevresel kaygılar azaltılmakta, enerji verimliliği ve maliyet tasarruf çalışmaları yapılmaktadır. Son yıllarda özellikle otomotiv, savunma, havacılık, tıp alanlarında dijital tasarım süreçleri ile yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Kimyasal bileşim ve sıcaklık ilişkisinden yola çıkarak CALPHAD (CALculation of PHase Diagram) metodolojisi ile malzeme tabanlı modelleme çalışmaları sayesinde; termodinamik, termokinetik, termofiziksel, termomekanik özellikler hesaplanabilmektedir. Bilgisayar ortamındaki bu çözümler, özellikle ısıtma işlemi gibi yüksek enerji gerekliliği ve çevreye etkisi olan proseslerin yapılabilirliği açısından oldukça önemlidir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları ile zaman, enerji, hammadde, insan/saat, test, deneme yanılma maliyetleri düşürülerek optimum tasarımlar yapılabilmektedir [13-15].

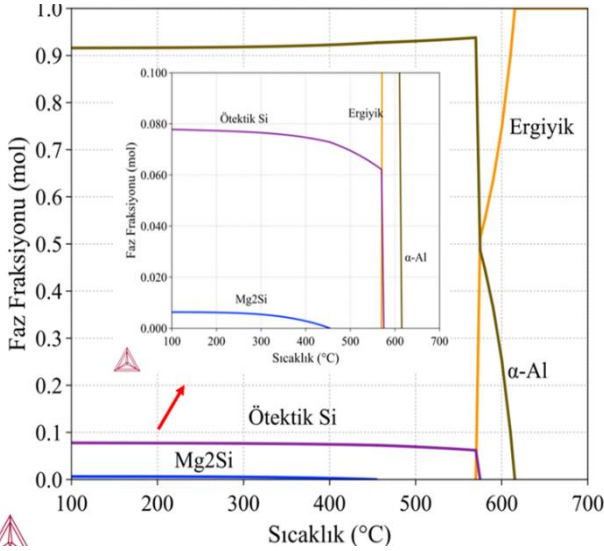
Bu modelleme ve simülasyon çalışmasında, Al-7Si-0.3Mg alaşımının Thermo-Calc yazılımı ile termodinamik analiz yapılarak, sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu ve kritik dönüşüm sıcaklıkları analiz edilmiştir. Daha sonra, ısıtma proseslerinde malzeme özelliklerini etkileyen çökelti sertleşmesi süreci için farklı yaşlandırma sürelerinde; malzemenin termodinamik, termokinetik ve termomekanik özellikleri hesaplanmıştır. Elde edilen çıktıların Türkçe literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

Çalışma kapsamında seçilen Al-Si-Mg alaşımının kimyasal kompozisyonu (ağ. %) 7 Si ve 0.3 Mg olarak belirlenmiştir. Alaşımın kimyasal kompozisyonundan yola çıkılarak, sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, termodinamik olarak faz ve kritik dönüşüm sıcaklıkları hesaplanmıştır. Termodinamik hesaplamalar için Thermo-Calc yazılımı 2022a versiyonu TCAL8.1 veri tabanı kullanılmıştır. Al-Si-Mg alaşımının ısıtma işlemi sırasında, yaşlandırma adımına odaklanılmıştır. Yaşlandırma prosesinin modellenmesinde, TC-Prisma yazılımı 2022a versiyonu TCAL8.1 termodinamik ve MOBAL7 termokinetik veri tabanı kullanılmıştır. Yaşlandırma prosesinde, başarılı bir şekilde çözeltiye alma ve su verme işlemi uygulanmış yapı modellenmiştir. Modelleme sonucunda ortalama yarıçap ve mukavemet değeri simüle edilmiştir. Alaşım içerisinde çökelen Mg_2Si çökeltilerinin homojen çökeltilmesi varsayılmıştır. Al-7Si-0.3Mg alaşımına $180^\circ C$ 'de sabit sıcaklıkta 2, 4, 6 ve 8 saatlik yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Böylelikle 4 farklı yaşlandırma operasyonu yapılmış ve akma dayanımına etkisi incelenmiştir. Bununla birlikte çökelti yarıçapının $180^\circ C$ 'de süreye bağlı olarak değişimi de hesaplanmış ve çökelti yarıçapı ile akma dayanımı arasındaki ilişki incelenmiştir.

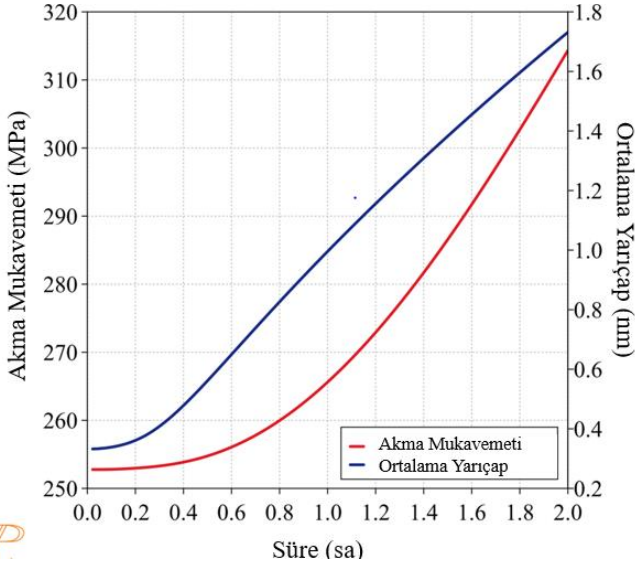
3. Bulgular ve Tartışmalar

Thermo-Calc yazılımıyla hesaplanan termodinamik karakterizasyon sonucunda, Al-7Si-0.3Mg alaşımının sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu Şekil 1' de verilmiştir. Al-Si-Mg alaşımında Si ve Mg elementleri 1:2 stokiometrik oranda Mg_2Si çökeltilmesini oluşturmaktadır [15] ve oluşan bu çökelti daha sonra ısıtma işlemi sırasında mukavemet artışını sağlamaktadır. Ötektik altı alaşımlarda sıvı fazdan ilk olarak α -Al katılaşmaktadır. Al-7Si-0.3Mg alaşımında $615^\circ C$ 'de katılaşma meydana gelmektedir. Al-Si alaşımlarında $577^\circ C$ 'de meydana gelen ötektik reaksiyon Al-7Si-0.3Mg'de $3^\circ C$ 'lik bir düşüş ile $574^\circ C$ 'de başlamaktadır. Ötektik reaksiyon çok bileşenli sistemlerde bir alana dönüşerek, ergiyik $5^\circ C$ 'lik bir sıcaklık aralığında α -Al ve ötektik Si'ye $569^\circ C$ 'de dönüşmektedir. Mg ve Si'nin oluşturduğu çökelti fazı, $454^\circ C$ 'de çökelmeye başlamaktadır. Çözeltiye alma ısıtma işlemi süreci için alaşımın en az $454^\circ C$ 'nin üzerinde prosese alınması gerekmektedir. Katılaşma ile birlikte Al-7Si-0.3Mg alaşımında oda sıcaklığında %7.8 ötektik Si, %91.6 α -Al ve %0.6 Mg_2Si fazları bulunmaktadır.



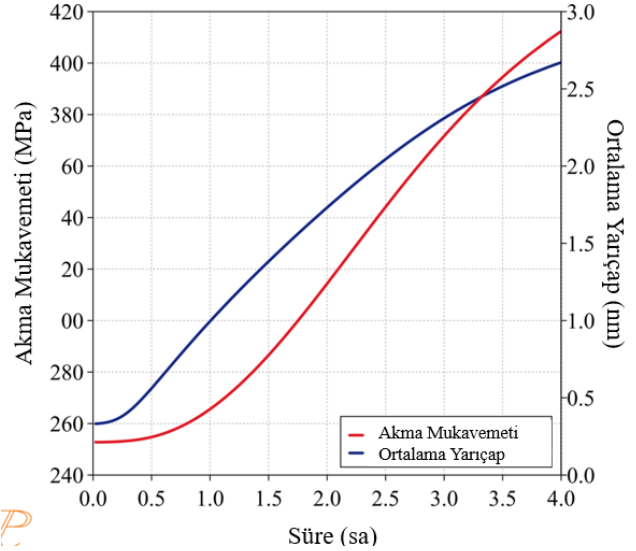
Şekil 1. Al-7Si-0.3Mg alaşımında sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu

Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'deki 2, 4, 6 ve 8 saat süreli yaşlandırma prosesinin simülasyonu sonucunda elde edilen ortalama partikül boyutu ve mukavemet değerleri Şekil 2, 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Şekil 2'de, 180°C'de 2 saat boyunca uygulanan yapay yaşlandırma sonucunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı sırasıyla 314 MPa ve 1.73 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 2 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları

Şekil 3'te ise, alaşımın yaşlandırma prosesine devam edilmesi sonucunda, yaklaşık 3 saat 20 dakika sonunda akma mukavemeti ve çökelti yarıçapının kesiştiği görülmektedir. Bu kesişmedeki akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değerleri 412 MPa ve 2.62 nm'dir.



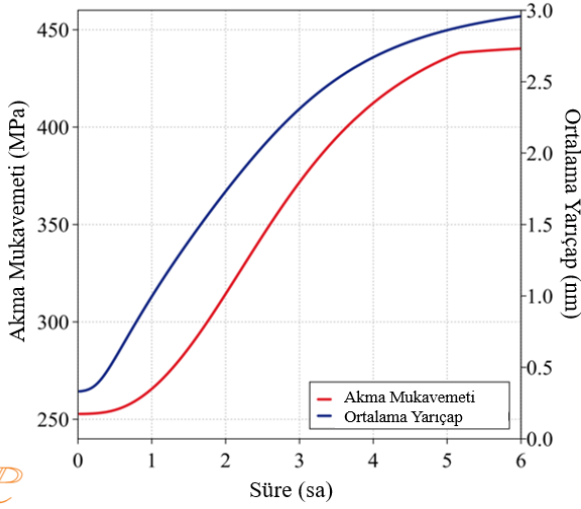
Şekil 3: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 4 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları

Bu kesişmeden sonra, çökelti yarıçapındaki artış hızı azalmaya başlamaktadır. Bu aşamada mukavemet bir süre daha düşük hızda artacak, azalmaya başlamasıyla taneler kabalaşacak ve Orowan mekanizmasıyla mukavemet 1/r ile orantılı olacaktır. Faz dönüşümü tarafından bakılacak olursa: β'' fazının sabit yaşlandırma sıcaklığında, süreye bağlı olarak, mukavemetin de düşmesiyle β' fazına dönüşmesi, bir sonraki adımda beklenmektedir. Ancak β'' fazının literatürde iğnemsî yapıda olduğu ve daha kararlı durumdaki β' fazının yapı içerisinde istendiği bilinmelidir [16].

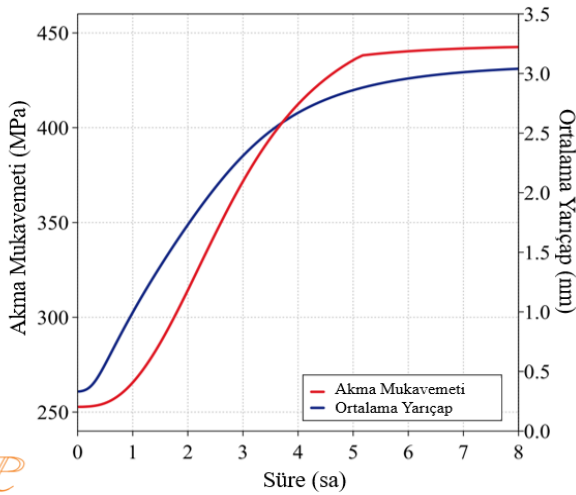
Kesişme noktasından sonra, mukavemet artış hızındaki azalma ve çökeltilerin büyümesi ve kabalaşması sebebiyle optimum sürenin 4 saat olduğu söylenebilir. 4 saat sonunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değerleri sırasıyla 412 MPa ve 2.7 nm'dir. Bu süre, literatürle karşılaştırılmıştır. Möller ve ark. [17], Mg içeriğinin A356 alaşımının yaşlanma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve A356'nın 160°C'de suni yaşlandırmasının 180°C yaşlandırmaya kıyasla daha yüksek pik sertlik ürettiğini ortaya koymuşlardır. Başka bir çalışmada, Rosso ve Grande [18], reo-döküm A356 için T6 işleminin optimizasyonunu inceleyerek mekanik özellikler açısından optimum yapay yaşlandırma işleminin 180°C'de 4 saat olduğunu öne sürülmüştür. Benzer şekilde Dewhirst ve ark. [19], A356 alaşımında T6 işleminin optimizasyonunu için 180°C'de 4 saat yaşlandırmanın gerekli olduğunu ifade etmişlerdir.

Şekil 4'te, akma mukavemeti eğrisinin tepe noktasından sonra, beklendiği gibi, 5. saat ile birlikte mukavemetteki artış hızı azalmıştır. 6 saat sonunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değeri sırasıyla 442 MPa ve 3 nm'dir. Bu noktada parçamızın en yüksek mukavemet

değeri söz konusudur ve faz dönüşümü için gerekli enerjinin toplanarak eğrinin tepe noktasından sonra düşüşüyle birlikte, β'' fazının dönüşümü tamamlanmış olacaktır.



Şekil 4: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 6 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları



Şekil 5: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 8 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları

Şekil 5'te 8 saatlik yaşlandırma modellenmiştir. 8 saat sonunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değerleri 443 MPa ve 3.1 nm'dir. Yaşlandırma boyunca yaklaşık 3.5 saat sonunda akma mukavemeti eğrisi ve çökelti yarıçapı eğrilerinde kesişme görülmüştür. Bu noktaya kadar sürekli artan mukavemet, kesişme noktasından sonra bir süre daha artarak, beşinci saat sonrasında artışın sabitlendiği tespit edilmiştir. Kabalaşma evresinde çökelti, daha küçük çökeltilere oranla dislokasyonları sarmaya başlar. Tane sınırlarında, tane köşelerinde, tane kenarlarında veya tane içerisinde homojen çökelen çökelti sıcaklığa bağlı sürenin artmaya başlaması

ile dağılmaya başlarlar. Kabalaşma ve dağılmanın olacağı evre mukavemet yarıçapın artışıyla ters orantılı ilerler. Ayrıca β' fazı, β kararlı fazına dönüşerek en düşük mukavemet gözlemlenebilir [20].

Ghulam ve ark. A357 alaşımı için Mg_2Si çökeltilerinin boyutunun mekanik özelliklere etkisini inceleyerek, aşırı yaşlanmanın sadece çökeltilerin uzunluğunu arttırmadığı, ayrıca iğnemi β'' yapısının çubuk tipi β' çökeltilerine kısmi dönüşümüne de neden olduğunu ifade etmişlerdir. Bu durumun aynı zamanda sertlik ve süneklikteki azalmanın temel nedeni olduğunu ve aşırı yaşlanma üzerine mukavemet özelliklerinde az da olsa bir artış olduğunu iddia etmişlerdir. Ayrıca 175 °C' de 12 saatlik aşırı yaşlandırmada sünekliğin düştüğünü ortaya koyarak, bu durumu çökelti boyutlarındaki kabalaşmayla ilişkilendirmişlerdir [21]. Bu çalışmada ise, akma mukavemeti ve çökelti kritik yarıçapındaki kesişim sonucunda, mukavemetin çalışmayla benzer şekilde arttığı görülmüştür. Bu çalışmada gözlenen sünekliğin, muhtemel yapı değişikliği sebebiyle akma dayanımının maksimum değere ulaşmasıyla en düşük süneklik olabileceği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Al-7Si-0.3Mg alaşımının Thermo-Calc yazılımı ile sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları analiz edilmiştir. Alaşım içerisindeki fazların kritik dönüşüm sıcaklıkları hesaplanmıştır. Ayrıca TC-Prisma yazılımı ile 180°C'de farklı yaşlandırma süreleri ile çökelti boyutu ve mukavemet analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Al-7Si-0.3Mg alaşımı için ergime sıcaklığı 615°C, çözeltilmeye alma sıcaklığı minimum 454°C ve ötektik reaksiyon ise 574 °C olarak hesaplanmıştır. Al-7Si-0.3Mg alaşımı oda sıcaklığında %7.8 ötektik Si, %91.6 α -Al ve %0.6 Mg_2Si fazlarını içermektedir.
- CALPHAD metodolojisi ile 180°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat yaşlandırma prosesleri modellenmiştir. Modelleme sonucunda, 4. Saat ile birlikte akma dayanımındaki artış hızı azalmaya başlamış, 5. saat ile birlikte nispeten sabitlenmiştir.
- Yapılan modellemeler ile maksimum mukavemete ulaşan Al-7Si-0.3Mg alaşımının, β'' fazından β' ve β fazlarına geçişle birlikte çekirdeklenme teorisine ve çökelti termokinetiğine uygun şekilde çökelti boyutlarındaki küçülmeler literatür ile doğrulanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Kaufman J. G., (2000). Applications for aluminum alloys and tempers. Introduction to Aluminum Alloys and Tempers; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1100, 242.
- [2] Karakulak E., Yamanoglu R., Erten U., Zeren A., Zor S., Zeren M., (2014). Investigation of corrosion and mechanical properties of Al-Cu-SiC-xNi composite alloys. *Materials & Design*, 59, 33-37.
- [3] Yamanoglu R., Zeren M., German R. M., (2012). Solidification characteristics of atomized AlCu4Mg1-SiC composite powders. *Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy*, 48(1), 73-79.
- [4] Zeren M., Karakulak E., Gümüş S., (2011). Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(8), 1698-1702.
- [5] Baskaran J., Raghuvaran P., Ashwin S., (2021). Experimental investigation on the effect of microstructure modifiers and heat treatment influence on A356 alloy. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3007-3010.
- [6] Yasin M., Razak A., (2022). Effect of high temperature solution heat treatment time on quality index and morphology of A356 DC alloy. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1924-1928.
- [7] Cheng W., Liu C. Y., Huang H. F., Zhang L., Zhang B., Shi L., (2021). High strength and ductility of Al-Si-Mg alloys fabricated by deformation and heat treatment. *Materials Characterization*, 178, 111278.
- [8] Rajan T. S., Sharma C. P., Sharma A. K., (2011). Heat treatment: principles and techniques. PHI Learning Pvt. Ltd.
- [9] Rheingans B., Mittemeijer E. J., (2015). Modelling precipitation kinetics: Evaluation of the thermodynamics of nucleation and growth. *Calphad*, 50, 49-58.
- [10] Totten G. E., MacKenzie D. S., (2016). Modeling and Simulation of the Heat Treatment of Aluminum Alloys.
- [11] Akyıldız Y., Öztürk O., Simsar B., (2021). Al-10Si-xMg Alaşımının CALPHAD Metodolojisi ile Termodinamik Karakterizasyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(3), 699-704.
- [12] Akyıldız Y., Akman A., Horasan B., Yamanoglu R., Aydın H., 2022. Investigating The Effect Of Quenching Media And Agitation Conditions On The Microstructure, Hardness, And Stress Distribution Of Aisi 4140 Steel By Using Fem. 16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, Mardin, Turkey, February 22-23, pp. 156-163.
- [13] Ågren J., (1996). Calculation of phase diagrams: Calphad. *Current opinion in solid state and materials science*, 1(3), 355-360.
- [14] Akyıldız Y., Arslan Y., Aydın H., Yamanoglu R., 2022. Fe-Mn-C Çeliğinin Calphad Metodolojisi ile Hesaplanan Sinterleme Sıcaklığının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi. 16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, Mardin, Turkey, February 22-23, pp. 164-174.
- [15] Yamanoglu R., Akyıldız Y., Öztürk O., 2021. AlSi10Mg Alaşımının Toz Metalurjisi ile Üretimi: Basınç Destekli Sinterleme ve CALPHAD Metodolojisi. *International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies, Bandırma Onyeddi Eylül Üniversitesi*, 314-325.
- [16] Polat A., Avsar M., Ozturk F., (2015). Effects of the artificial-aging temperature and time on the mechanical properties and springback behavior of AA6061. *Material in tehnologije*, 49(4), 487-493.
- [17] Möller H., Govender G., Stumpf W. E., (2007). Natural and artificial aging response of semisolid metal processed Al-Si-Mg alloy A356. *International Journal of Cast Metals Research*, 20(6), 340-346.
- [18] Rosso M., Actis Grande M., (2006). Optimization of heat treatment cycles for automotive parts produced by rheocasting process. In *Solid State Phenomena* (Vol. 116, pp. 505-508). Trans Tech Publications Ltd.
- [19] Dewhirst B. A., (2005). Optimization of the heat treatment of semi solid processed A356 aluminum alloy. *Optimization*, 2005, 11-17.
- [20] Gladman T., (1999). Precipitation hardening in metals. *Materials science and technology*, 15(1), 30-36.
- [21] Asghar G., Peng L., Fu P., Yuan L., Liu Y., (2020). Role of Mg2Si precipitates size in determining the ductility of A357 cast alloy. *Materials & Design*, 186, 108280.