



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kömür yakıtlı termik santralin çalışma esnekliğinin incelenmesi

Investigations of operational flexibility of coal-fired thermal power plants

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet TONTU

ORCID : 0000-0002-7040-2131

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tontu M., “Kömür yakıtlı termik santralin çalışma esnekliğinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 24(3): 893-902, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.719875

Kömür Yakıtlı Termik Santralin Çalışma Esnekliğinin İncelenmesi

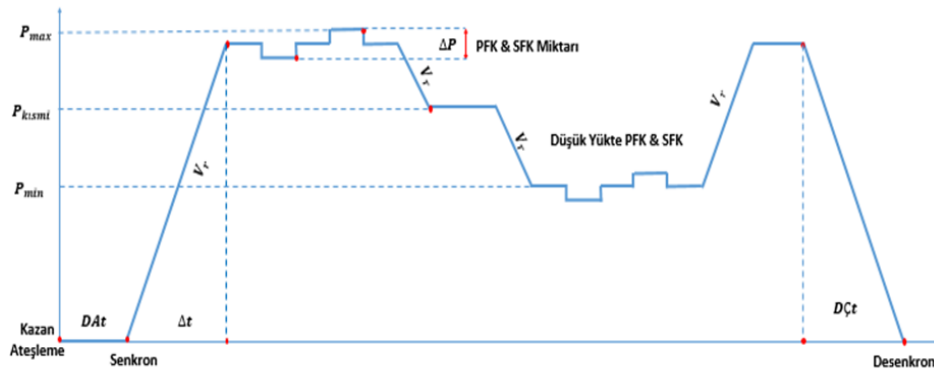
Investigations of Operational Flexibility of Coal-Fired Thermal Power Plants

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Minimum çalışma yükünün azaltılması/ Reduction of minimum working load.
- ❖ Santral yük rampa hızının artırılması/ Increasing the plant load ramp.
- ❖ Primer ve sekonder destek mekanizmalarına katılımın sağlanması/ Ensuring participation in primary and secondary support mechanisms.
- ❖ Devreye alma programının iyileştirilmesi/ Improving the start-up procedure.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Kömür yakıtlı termik santrallerin operasyonel faaliyetlerde değişikliğe gidilerek esnekliğinin artırılması amaçlanmıştır/ It is aimed to increase the flexibility of coal-fired thermal power plants by changing the operational activities.



Şekil. Esneklik parametrelerine genel bakış/ Figure. Flexibility parameters overview

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı dört farklı esneklik yönteminde kabiliyetini arttırmaktır/The aim of this study is to increase its capability in four different flexibility methods.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Operasyonel esnekliğinin artırılması için ilgili gerçek testler uygulanmıştır/ Relevant real tests have been applied to increase operational flexibility.

Özgünlük (Originality)

Termik santrallerin mevcut çalışma rejimlerini geliştirerek yeni piyasa koşullarına adaptasyonun sağlanması/ Ensuring adaptation to new market conditions by improving the existing working regimes of thermal power plants.

Bulgular (Findings)

Daha önce % 40 belirlenen minimum yük değeri % 30 değerine revize edilmiş ayrıca primer ve sekonder frekans destek testlerinden başarıyla geçmiş bununla beraber yük alma/atma hızı 20 MW/dk değerine iyileştirilmiştir. Son olarak, devreye alma programı optimize edilmiş minimum yardımcı yakıtla devreye alacak şekilde geliştirilmiştir/The minimum load value which was previously determined as % 40 was revised to % 30, the primary and secondary frequency tests were also successful and the load ramp up/down values were improved to 20MW/min. Finally, the start-up program has been developed to perform with minimum auxiliary fuel.

Sonuç (Conclusion)

Yapılan çalışmalar sonucunda 4 farklı esneklik kategorisinde santral sınır değerlerin dışına çıkmadan başarılı olmuştur/As a result of the 4 different studies in the flexibility categories, the power plant has been successful without exceeding the limit values.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kömür Yakıtlı Termik Santralin Çalışma Esnekliğinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet TONTU*

Iskenderun Enerji ve Ticaret A.Ş., Operasyon Bölümü, Adana, Turkey

(Geliş/Received : 13.04.2020 ; Kabul/Accepted : 20.05.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 20.05.2020)

ÖZ

Bu çalışmada kömür yakıtlı termik santrallerin operasyonel faaliyetlerde değişikliğe gidilerek esnekliğinin artırılması amaçlanmıştır. Son yıllarda yenilenebilir kaynaklı enerji üretiminin büyük ölçüde artmasıyla termik santrallerin yenilenebilir kaynaklı enerji üretimiyle rekabet yeteneğinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Ayrıca yenilenebilir kaynaklı enerji üretimi anlık değişimler gösterebildiği için termik santrallere şebeke dengeleme yönünden daha çok iş düşmektedir. Bu sebepten dolayı, termik santrallerin operasyonel esnekliğinin artırılması 4 ana başlık altında incelenmiştir: minimum yükte çalışma, hızlı yük alma ve atma, devreye alma prosedürü optimizasyonu ve son olarak primer ve sekonder destek kabiliyetlerinin artırılması çalışmalarını kapsamaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda 4 farklı esneklik kategorisinde santral sınır değerlerin dışına çıkmadan başarılı olmuştur. Daha önce % 40 belirlenen minimum yük değeri % 30 değerine revize edilmiş ayrıca primer ve sekonder frekans destek testlerinden başarıyla geçmiş bununla beraber yük alma/atma hızı 20 MW/dk değerine iyileştirilmiştir. Son olarak, devreye alma programı optimize edilmiş minimum yardımcı yakıtla devreye alacak şekilde geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Esneklik, termik santral, çalışma rejimleri, minimum yük, yük alma/atma hızı.

Investigations of Operational Flexibility of Coal-Fired Thermal Power Plants

ABSTRACT

This study is aimed to change the operational activities of coal fired power plants to effectively increase its flexibility. With the large scale increase of generation in renewable energy in recent years, the need to develop skills in the area of competitiveness in thermal power plants has emerged. In addition, since renewable energy can have instantaneous changes in production, there is more work needed to be done for thermal power plants that balance the grid. Due to this reason, increasing the flexibility of thermal power plants is examined under 4 main headings: Working under minimum load, fast load ramp up/down, start-up procedure optimization and primary and secondary support capabilities. As a result of the 4 different studies in the flexibility categories, the power plant has been successful without exceeding the limit values. The minimum load value which was previously determined as % 40 was revised to % 30, the primary and secondary frequency tests were also successful and the load ramp up/down values were improved to 20MW/min. Finally, the start-up program has been developed to perform with minimum auxiliary fuel.

Keywords: Flexibility, thermal power plant, working conditions, minimum load, fast load ramp up/down.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

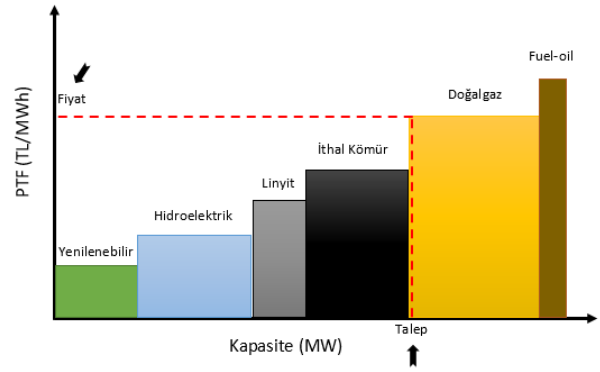
Elektrik ve diğer çoğu ürün arasındaki temel fark elektriğin pratik bir şekilde büyük ölçüde depolanamamasıdır. Elektriksel depolama maliyetleri hala çok yüksek maliyetli olup küçük ölçek uygulamaları mevcuttur [1]. Modern bir toplum için güvenli, temiz ve verimli elektrik üretim sistemlerinin varlığı gel ecek için önem arz etmektedir. Düşük karbon teknolojileri ve yenilenebilir enerji sistemleri günden güne dünyada artmaktadır ancak yapılan araştırmalara göre yakın ve orta vadede fosil kaynaklı enerji üretiminin küresel enerji talebine cevap vermesi muhtemeldir. Bu nedenle, başlangıçta baz yükte çalışmak için tasarlanan fosil yakıtlı enerji santralleri esneklikleri artırılarak ulusal şebekede stabilizasyon sağlamaları ve yenilenebilir

enerjinin yarattığı yük dengesizliklerini gidermelidir [2-3]. Fosil yakıtlı konvansiyonel santrallerin esnekliklerinin artırılması ekipmanların iyileştirilmesi, kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, çalışma parametrelerinin optimizasyonu ve sistem çalışma sınırlarının iyice belirlenmesi ile mümkün olacaktır. Ek olarak kömür yakıtlı elektrik santrallerinin esnek çalışması, kalifiye personel, öngörülü liderlik ve bu yeni çalışma rejimine başarılı bir şekilde adapte olmak için bütünsel bir yaklaşım ile yönetilmelidir [4]. Ayrıca yeni enerji ticaret mekanizması konvansiyonel enerji santrallerinin yeni operasyonel stratejiler belirlemesini mecbur kılmıştır. Şekil 1 de santrallerin kapasite-fiyat ilişkisini göstermektedir [5]. Şekilden de anlaşılacağı üzere termik santrallerin üretim maliyetleri yenilenebilir enerji üretimine göre yüksek olup ülkenin talep değeri belirli limitin üstüne çıkınca tesis devreye girecektir, düşük talep değerlerinde fiyat düşecek tesis kısmı yükte

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mtontu86@gmail.com.

çalışacak veya devreden çıkacaktır. Bu sebeplerden dolayı, esneklik kriterleri önümüzdeki süreçte daha fazla önem kazanacak ve gelişime ARGE çalışmaları gerektirecek konuların başında gelecektir.

Santrallerin esneklik artırımı çalışmaları ile ilgili literatürde kısıtlı sayıda çalışmalar vardır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir. Dotzauer ve ark. [6] biyogaz tesislerinin esnek çalışma rejimlerine odaklanan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, santralin esnekliği sistemin modüle edilebileceği üç boyutta (1) hızda (rampalar), (2) belirli yük koşulları için güç aralığı (bant genişliği) ve (3) süre bakımından incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına dayanarak esneklik potansiyeli için santral çalışma limitleri ve kısıtlamaları tespit edilmiştir. Hentschel ve ark. [7] dört farklı konvansiyonel santralin esnekliklerini incelemiş ve farklı esneklik seçeneklerini daha kolay daha etkili değerlendirmek için bir program geliştirmişlerdir. Bu çalışmada dört farklı santral için, düşük yük, devreye alma/çıkarma ve hızlı yük alma/atma gibi esneklik kriterlerinin işletme maliyeti ve verimliliğine etkileri incelenmiştir. Bahsedilen kriterler kömür santralleri üzerinde çok daha belirgin bir etkiye sahiptir. Kömür santrallerinin esnek çalışma operasyonlarıyla işletilmesiyle operasyonel çevikliği artmış ve net karda artış olduğunu tespit etmişlerdir. Salazar ve ark. [8] Kombine çevrim ve kömür yakıtlı santrallerinin esnek çalışma durumlarını ve çevreye etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar kombine çevrim santrallerin sadece daha verimli değil aynı zamanda daha hızlı ve genellikle kömürle çalışan elektrik santrallerinden daha az çevresel etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ancak, minimum çalışma yüklerinde, kombine çevrim santralleri daha az esnektir ve kömürle çalışan santrallerden daha fazla NO_x ve CO emisyonu üretmektedir. Richter ve ark [9] kömür yakmalı termik santrale termal enerji depolama sistemi entegre ederek operasyonel esnekliğini artırmayı amaçlamıştır. Bu çalışma neticesinde santralin dinamik yük kontrolü ve primer frekans kabiliyetlerini artırmıştır. Enerji deposunun boşaltılması ile % 4,3'e varan ek bir net gücü sağlar. Ayrıca, entegre enerji deposu santralin primer frekans kontrol besleme kapasitesini \pm % 2,8 geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. Sun ve ark. [10] 300 MW kapasiteli kömür yakmalı termik santrale katı-oksit yakıt hücresi integrasyonunu önermişlerdir. Bu sistem hem enerji depolama sağlayacak hemde santralin düşük yük operasyonlarında yanma stabilizasyonu sağlayacaktır. Bu çalışmanın neticesinde tesisin minimum yükünde %18 oranında bir düşme sağlanmıştır. Zhao ve ark. [11] 660 MW kapasiteli termik santralde, yüksek basınç ısıtıcıların besleme buharlarının parametrelerini değiştirerek dinamik bir model kurmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmanın neticesinde santralin operasyonel esnekliği artırılmış yük alma/atma hızı 40 MW/dk değerine iyileştirilmiştir. Aynı zamanda primer ve sekonder destek mekanizmalarına katılmayı kolaylaştırmışlardır.



Şekil 1. Merit order sıralaması (Merit order ranking)

Enerji talebi, nüfus artışı, sanayileşme, teknolojik gelişmeler, ülkenin mevcut ekonomik ve siyasi durumu gibi birçok parametreye bağlıdır. Çevresel etkilerin gitgide daha da önem kazanmasıyla yenilenebilir enerji yatırımlarının artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, termik santrallerinin çalışma rejimlerini ve operasyonel koşullarını revize etmeleri gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı bir termik santrale yatırım gerektirmeden mevcut potansiyelini kullanarak dört farklı esneklik metodunda kabiliyetini arttırmak ve bunu mevcut yüksek kapasiteli bir kömür yakıtlı termik santral üzerinde göstermektir. İyileştirilmesi hedeflenen esneklik kriterleri aşağıda belirtilmiştir:

- Minimum çalışma yükünün azaltılması
- Santral yük rampa hızının artırılması
- Primer ve sekonder destek mekanizmalarına katılımın sağlanması
- Devreye alma programının iyileştirilmesi

Ayrıca, artan yenilenebilir enerji rezervine karşı esneklik derecesini daha iyi bir duruma getirerek hem ekonomik hemde operasyonel çevikliğini arttırmaktır.

2.SİSTEM TANIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Bu çalışmada, Türkiye'nin güney bölgesinde yer alan maksimum 660 MW kapasiteye sahip termik santralin operasyonel stratejilerinin geliştirilmesi ve esnekliğinin artırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışma yapılan santral 15 yıldır aktif olarak çalışmakta olup düzenli bakım ve verimli işletme sayesinde dizayn noktalarından herhangi bir sapma olmamıştır. Bu santral kömür yakmalı bir tesis olup birincil enerji girdisi olan bitümlü kömürü genellikle Kolombiya ve Güney Afrika'dan ithal edilmektedir. Santral büyük ölçekli kompleks bir tesis olup bünyesinde buhar türbinleri, farklı çeşit pompalar, tek geçişli kömür yakmalı yüksek basınçlı buhar kazanı, deniz suyu soğutmalı kondenser ve baca gazı arıtma tesisi ve elektriksel toz tutma sistemini bulundurmaktadır. Sistemin genel çalışma parametreleri Çizelge 1 de verilmiştir [12].

Çizelge 1. Santralin genel çalışma parametreleri (General operation parameters of power plant)

Parametre	Birim	Değer
Kapasite	MW	660
Ana Buhar Basıncı	bar	177
Ana Buhar Sıcaklığı	°C	541
Ana Buhar Hattı Debisi	t/h	1886
OBT Giriş basıncı	bar	49
OBT Giriş Sıcaklığı	°C	539
YBT Çıkış Basıncı	bar	55
Kondenser Basıncı	bar	0.03
Deniz Suyu Sıcaklığı	°C	16
Kazan Giriş Su Sıcaklığı	°C	268
Kömür Tüketimi	t/h	220
Kömür Kalorifik Değeri	kcal/kg	6000

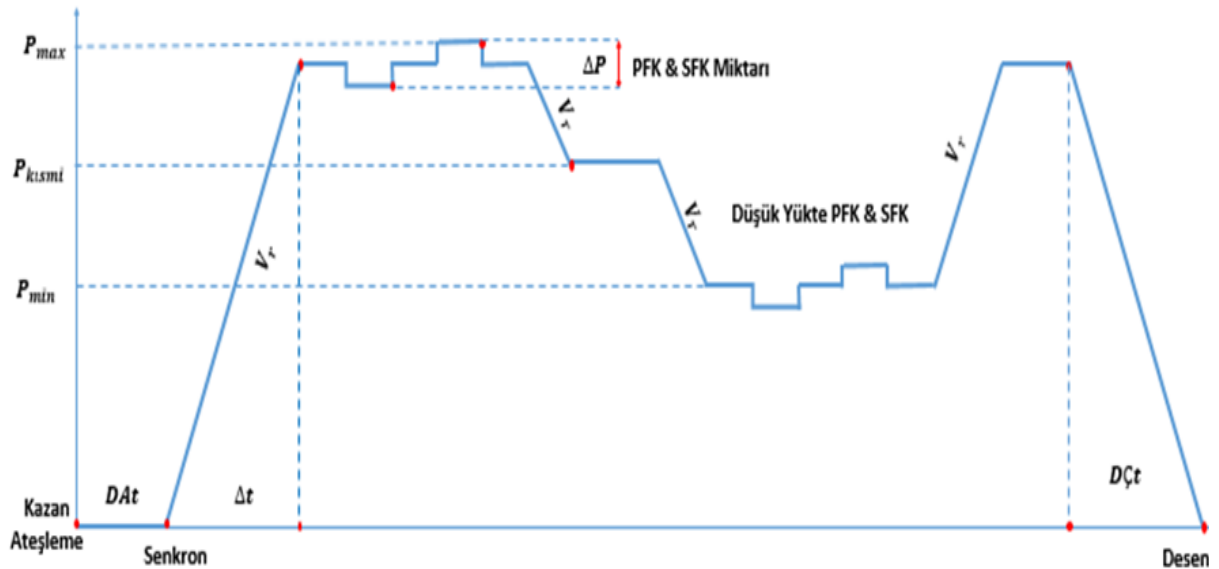
Santral yaklaşık yılda 8000 saat çalışıp yüksek emre amedeliğe sahiptir ancak santral çoğunlukla baz yükte yani genellikle tam yükte çalışmaktadır. Santralin yeni dönemde serbest piyasaya dahil olmasıyla beraber mevcut operasyonel çalışma yüklerinin ve koşullarının ekonomik karlılık açısından değişmesi öngörülmektedir bu sebeple mevcut operasyonel esnekliğinin ve çalışma stratejilerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Mevcut durum ve hedeflenen esneklik kriterleri Çizelge 2 de verilmiştir.

Çizelge 2. Mevcut ve hedeflenen esneklik kriterleri (Current and targeted flexibility criteria)

Kriter	Mevcut	Hedef
Minimum yük	40%	30%
Yük rampa hızı	1.5-3 %	6%
PFK Miktarı	0MW	33MW
SFK Miktarı	0MW	40MW
Devreye alma süresi		
Soğuk (>48s)	6	5
Ilık (<8-48s)	3	2
Sıcak (<8s)	1.5	1

3. ESNEKLİK ARTIRMA METODLARI (FLEXIBILITY IMPROVEMENT METHODS)

Santralin esnekliği üretilen gücün değişken şartlar ve koşullara rağmen talebi yerine getirme ve istenilen sürede tepki verme yetisi olarak tanımlanabilir. Santrallerin esneklik potansiyelleri içerdikleri teknolojik konfigürasyonla doğru orantılıdır. Teknik perspektif açısından değerlendirildiğinde termik santrallerin esnekliğinin artırılmasının 4 farklı ana boyutu vardır. Şekil 2 esneklik parametrelerine genel bir bakış sunmaktadır. Bu parametreler geliştirildiği zaman tesisin dinamik davranışları güçlenip kararlılığı artacaktır.

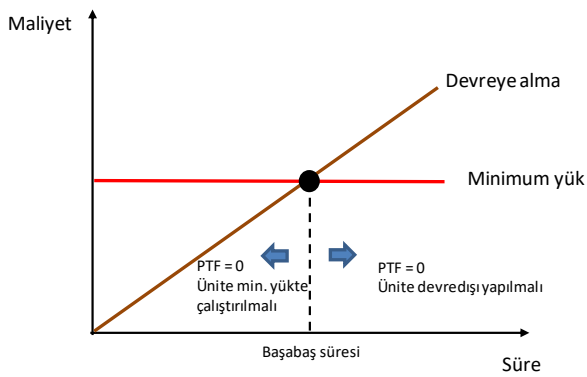
**Şekil 2.** Esneklik parametrelerine genel bakış (Flexibility parameters overview)

Termik santraller komplike sistemler olup sunulan esneklik kriterlerinin artırılması için santralde birkaç ön faaliyet yapılması gereklidir. Faaliyetler sırasıyla aşağıda özetlenmiştir.

1. Tarihsel analiz (Mevcut potansiyel)
2. Sınırların belirlenmesi
3. Hedefin belirlenmesi
4. Aksiyon planı hazırlanması
5. Testin uygulanması
6. Testte edilen sonuçların raporlanması

3.1. Minimum Yükte Çalışma (Minimum Load Operation)

Minimum yük, santralin sabit koşullar altında, güvenli ve emniyetli biçimde ve destekleyici yakıtlar olmadan kararlı şekilde çalıştığı en düşük yük seviyesini temsil eder. Düşük yükte çalışma daha çok yüksek emisyonlar, düşük verim ve güvenilir olmayan çalışma rejimi ile ilişkilendirilir. Diğer taraftan düşük yükte çalışma elektrik birim fiyatının düşük olduğu saatlerde kayıpları azaltır ayrıca devreden çıkma/girme sayısını azaltarak maliyetleri azaltır ve termal stresi engelleyerek ekipman ömrünü olumlu etkiler. Bununla beraber minimum yükte çalışma şebeke stabilizasyonu yönünden de oldukça önemli olup hızlıca yük alıp tam yüke çıkılabilir. Fakat minimum yük belirlenirken sistem potansiyeli, kabiliyeti, sınırları iyice gözden geçirilmeli ve ekipmanlar zarar görmeden uzun periyotta çalışacak şekilde belirlenmelidir [13]. Şekil 3 termik santralin piyasa fiyatına göre alınacak operasyonel durumu ortaya koymaktadır. Fiyat düşük olduğu süre biliniyorsa ve bu süre başabaş noktasından az ise ünite minimum yükte çalıştırılmalı aksi takdirde üniteyi devreden çıkartmak daha karlı olacaktır.

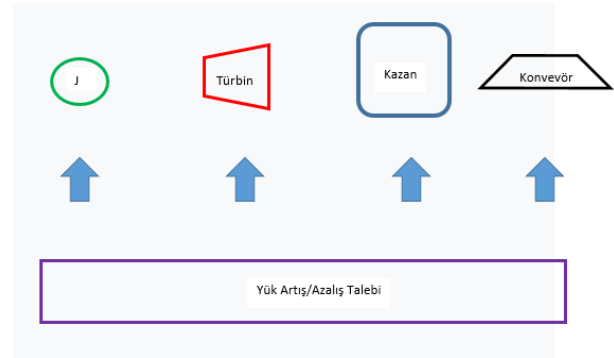


Şekil 3. Piyasa takas fiyatı & santral çalışma durumu (Market clearing price & plant operation status)

3.2. Yük Rampa Hızı (Load Ramp)

Rampa hızı, bir santralin güç çıkışını belli bir sürede ne kadar hızlı değiştirebileceğini gösterir. Yüksek rampa oranları değişen piyasa koşullarına hızlı tepki verilmesini sağlar. Ayrıca yüksek rampa hızlarına sahip dinamik

yapıdaki bir santral sekonder ve primer frekans destek piyasasına katılabilirler. Ayrıca, frekans destek mekanizmalarından ayrı olarak yük alma/atma talimatlarına harfiyen uygulamayı sağlar. Yük alma/atma talimatları normal çalışma durumuna göre avantajlı fiyatlar sunar. Bu nedenle, yüksek rampa hızları santralleri ekonomik yönden olumlu etkiler. Ancak, yüksek rampa hızları daha yüksek malzeme sıcaklığı değişimine sebep olacağından malzeme kalitesinin dayanımı yeterli olmalı veya kontrol sistem yazılımının bu değişimlere çözüm olmalı. Yüksek rampa hızları kömür yakıtlı termik santralde kazan ve türbin arasında bir koordinasyon sağlanarak başarılabilir genel olarak buhar türbinleri hızlı yük alabilirler fakat buhar kazanı daha yavaş kalmaktadır. Aşağıdaki şekil 4 görüldüğü üzere gelen yük talebiyle beraber kazana, türbine ve jeneratöre eş zamanlı emir gitmesi sağlanarak istenilen yük rampa hızının sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 4. Hızlı yük alma koordinasyonu (Coordination of fast ramp-up)

Santral rampası, bir yük takip operasyonunu ifade eder, rampa hızı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır [14].

$$\text{Rampa hızı } V_r = \frac{P_1 - P_2}{P_{max} \cdot \Delta t} * 100 \quad (1)$$

3.3. Devreye Alma Optimizasyonu (Start-up Optimization)

Devreye alma zamanı, kazan ateşlemesinin başlangıcı ile kararlı minimum yüke ulaşmaya kadar geçen süre olarak tanımlanır. Kısa devreye alma ve devreden çıkarma süreleri değişen pazar gereksinimlerine karşı hızlı bir yanıt alması açısından faydalıdır. Devreye alma zamanları santralin devredışı olma süreleri gözetilerek aşağıdaki gibi sınıflandırılır [15]:

- Sıcak Devreye Alma: <8 saat
- Ilık Devreye Alma: > 8 saat ve <48 saat
- Soğuk Devreye Alma: > 48 saat

Normal şartlarda termik santraller reaktif arıza olmadığı durumlarda baz yükte uzun süreli çalışabilirler ancak değişen market koşulları ile enerji arzının düştüğü ve

birim fiyatın maliyetinin altına düştüğü dönemlerde devreden çıkmaları öngörülmektedir. Termik santraller devreye alma sürecinde yardımcı yakıt kullandığı için bu sürenin optimize edilerek hem süreden hemde yakıttan tasarruf edilerek kazanç elde edilmelidir. Ayrıca hedeflenen zamanda devreye girme şebeke güvenliği ve santral ekonomisi için önem arz etmektedir. Buna karşın devreye alma süresi termal stresi önemli ölçüde etkiler ve termal stress ekipman üzerinde en ciddi etkiye sahiptir. Optimizasyon yapılırken ekipman ve malzeme marjin değerleri gözetilmeli, yakından takip edilmeli sadece ekonomik yönden bakılmamalıdır. Devreye alma prosedürlerinde asıl amaçlanan durum türbin ve kazan ısıtma sürelerini marjin dışına çıkılmadan optimum şekilde ayarlamaktır.

3.4. Primer ve Sekonder Frekans Destek (Primary and Secondary Frequency Support)

Elektrik şebekeleri, alternatif akım frekanslarını belirlenmiş limitler dahilinde tutmalıdır. Bir şebekedeki eşzamanlı kapasite (kömür, gaz ve nükleer), yük veya jeneratör hareketlerinde adım değişiklikleri meydana geldiğinde bu frekanstaki değişikliklere doğal bir direnç sağlayan ataletsel bir kütle oluşturur. Bununla birlikte, sistemin arzın talebe saniyeler içinde yeniden eşleştirilmesi için aktif desteğe sahip olması gerekir, böylece sistem frekansı değişmeye başladıktan sonra hızla geri yüklenebilir. Bu birincil frekans destek fonksiyonu, bazı tesislerin çok kısa vadeli reaktif bazda artırılmış veya azaltılmış güç tedarikine imkan verecek şekilde tasarlanıp çalıştırılmasını zorunlu kılmak suretiyle sağlanır. Bu fonksiyon, senkron tesisler, tipik olarak bazı gaz ve kömür yakmalı santraller tarafından sağlanmaktadır. Şebekelerdeki yenilenebilir enerji santrallerinin yüksek oranı, bu şebekelerin ataletlerinde bir düşüşe neden olur, çünkü bu tür santraller normalde frekans kontrolü sağlamaz. Sonuç olarak, fosil yakıtlı tesislerin azalan bir miktarının artması artık hizmet vermek zorunda kalmaktadır [16].

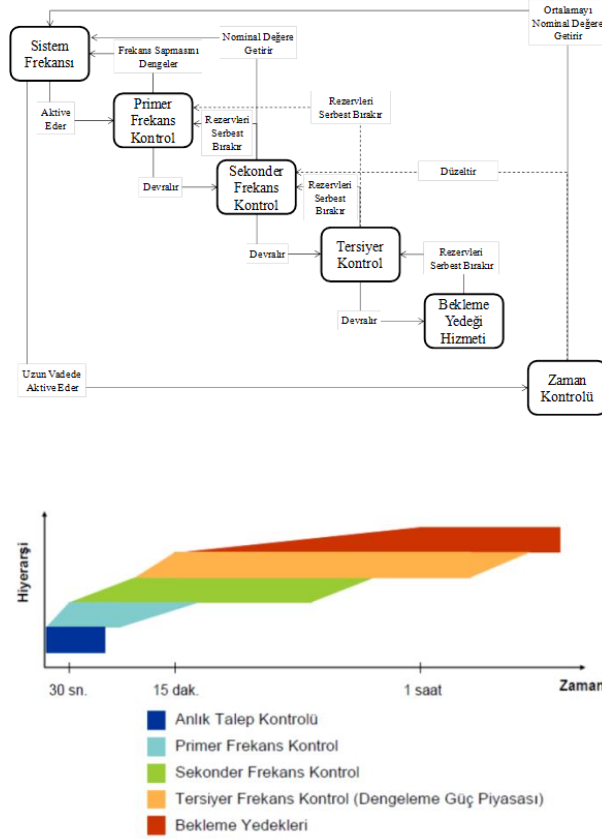
- Sistemde bir üretim ve/veya tüketim tesisinin devre harici olması,
- Arz ve talep arasında dengesizlik oluşması,
- Sistem frekansında sapma olması,
- Primer ve/veya sekonder frekans kontrol yedeklerinin kullanılması sebebiyle, söz konusu yedeklerin serbest bırakılması ihtiyacının ortaya çıkması,
- Tersiyer frekans kontrolü yedeklerin kullanılmasına rağmen tersiyer frekans kontrolü yedeği ihtiyacının devam etmesi,
- Sınır ötesi elektrik ticareti programında sapma olması.

Pek çok kömür yakıtlı enerji ünitesi halihazırda 30 saniyeden uzun olmayan bir sürede % 5 veya % 10'a varan çok hızlı çıktı değişiklikleri sağlamaları gerekiyor.

Fosil yakıtlı tesisler, geleneksel olarak türbin regülatörleri üzerinde birincil kontrol sağlar; bu, frekansı 15 dakika ile bir dakika içinde stabilize etmek için bir cevap verir, ancak daha hızlı olabilen başka yöntemler de vardır. Primer frekans kontrolü genel olarak türbin kontrol valfleri kısıtılarak kazanda ekstra basınç oluşturup frekans dalgalanmalarında bu rezervi kullanarak fazladan güç üretmektir. Ayrıca türbinden çekilen ara ısıtma buhar valflerinin kısılması türbinde ekstra güç üretmeye yararken kondansate kontrol vanasının kısılması besleme suyu tankındaki sıcak su rezervini kullanmak açısından frekans destek için önemlidir.

Sekonder frekans kontrol santrallerin belirli yükler içerisinde esnek bir şekilde kararlılığın bozulmadığı destek tipidir. Sekonder kontrolde yük tevzi merkezi anlık yük değerini değiştirebilir ve santrallerin bu değişime ayak uydurmaları zorunludur. Sekonder frekans kontrolü ani ve hızlı yük değişimleriyle frekans kontrolü yapmaya çalışır. Bekleme yedeği; devre harici bir üretim tesisinin ihtiyaç duyulması halinde MYTM'nin talimatı doğrultusunda devreye girmesi ile sağlanan işletme yedeğidir. Bekleme yedeği, üretim tesislerinin emre amadeliğindeki belirsizlikler veya hava koşullarında oluşan beklenmedik değişiklikler gibi önceden kestirilemeyen nedenlerle tüketimin hesaplanan talep tahminlerinin üzerinde gerçekleşmesi durumunda tersiyer kontrol yedeğinin serbest hale getirilmesi veya tersiyer kontrol yedeğinin yetersiz kalması durumunda tersiyer kontrol yedeğinin oluşturulması amacıyla kullanılır. Şekil 5a ve Şekil 5b frekans kontrol mekanizmalarının hiyerarşik sıralaması ve zamansal kontrolü açıkça göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere ilk primer kontrol 30 sn içinde ilk tepkiyi veriyor, daha sonra sekonder frekans kontrol ve arkasında sistem işleticisi santrallere yük alma ve atma emirlerini gönderir, ancak hala şebeke frekans değeri çalışma limitlerinin dışında ise MYTM bekleme yedeklerini devreye girme emri göndererek şebeke frekansını stabilizasyonunu sağlar.

Ayrıca, primer ve sekonder frekans mekanizmaları finansal olarak belirli zamanlarda tesise büyük katkılar sağlayabilir. Özellikle ülke elektrik tüketiminin puant değeri düşük olduğu zamanlarda elektrik birim fiyatıda düşük olmakta bundan dolayı daha az tesis devrede kalmaktadır. Mevcut devrede olan tesislerin frekans destek fiyatlarıda yüksek olmaktadır bu sayede birim fiyattan olan zararı frekans destek vererek tolere edebilirler. Frekans destek mekanizmaların önemli bir fonksiyonuda tesislerin devreden çıkma sayılarını azaltarak devreye alma maliyetlerinden olan kayıpları minimuma indirmede önemli rol oynar. Ayrıca, yenilenebilir enerji santrallerinin frekans destek yetenekleri düşük olduğundan fosil yakıtlı santralleri olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 5a & 5b. Frekans kontrol mekanizmalarının hiyerarşik sıralaması ve zamansal kontrolü (Hierarchical ordering and temporal control of frequency control mechanisms)

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Termik santraller kompleks sistemler olup işletilmesi ve elektrik üretimi yenilenebilir enerji santrallerine göre daha zahmetli ve daha zordur. Termik santraller genel olarak operasyonel rejimlerinin değişimine adaptasyonu daha zordur çünkü bünyesinde bir çok ekipman ve bunların işletme parametrelerinin yakından takip edilmesi gerekmektedir. Ülkedeki enerji piyasa şartlarının değişmesi ve santralin finansal boyutunun daha iyi bir duruma güncellenmesi için testlerin uygulanması gerekmektedir. 660 MW kapasiteye sahip endüstriyel kömür santralinin operasyonel esnekliğinin artırılması için ilgili testler uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde dört farklı esneklik artırımı için santralin limit değerleri ve kısıtları gözünde bulundurulmuştur.

4.1. Minimum Yükte Çalışma (Minimum Load Operation)

Bilindiği üzere santralin arşiv datalarına göre minimum kararlı yükü %40 olarak belirlenmişti. Yapılan çalışmalar sonucunda santralin minimum yükü %30 kadar indirilmiş stabil olarak çalıştırılmıştır. Çalışmalar esnasında öncelikli olarak değirmen besleme debileri,

kazan flame stabilizasyonu, evaporator çıkışındaki su miktarı, baca gazı sıcaklığı, ve türbin vibrasyonları göz önünde bulundurulmuştur. Öncelikli olarak Çizelge 3 de görüldüğü üzere değirmenler 10 kg/sn değerine kadar düşürülmüş ve flame sensörlerde herhangi bir kararsızlık problemi yaşanmamıştır. Ek olarak kömür kalitesi sürekliliğinin sağlanması yanma stabilizasyonu olumlu yönde etkilemiştir. Ayrıca kazan set basıncı artırılarak gizli ısı miktarının azaltılıp evaporator çıkışında doymuş buhar eldesi hedeflenip başarılmıştır ve sonucunda start-up tankına su gelmesi engellenmiştir. Ek olarak en önemli kriterlerden biri olan bacagazı sıcaklığı 315°C civarlarında kaldığından denox sistem stabil olarak çalışmaya devam etmiştir. Denox sistem 310°C bacagazı sıcaklığı altında devreden çıkıp NOx emisyonları limitlerin dışına çıkacağından %30 yüke düşebilmek için ekonomizer by-pass yatırımı gerekecekti. Diğer açıdan, minimum yükte türbin yatak ve gövde vibrasyonlarından herhangi bir olumsuzluk görülmemiştir. Ek olarak, türbinlerde ventilasyon problemi gözlemlenmemiştir. Son olarak, termik santraller baz yükte en yüksek verimliliğe sahiptir ama piyasa şartları kaynaklı kısmı yüklerde ve minimum yükte çalışması sebebiyle termal verimi düşmektedir.

Çizelge 3. Minimum yük testi parametreleri (%30) (Minimum load testing outputs)

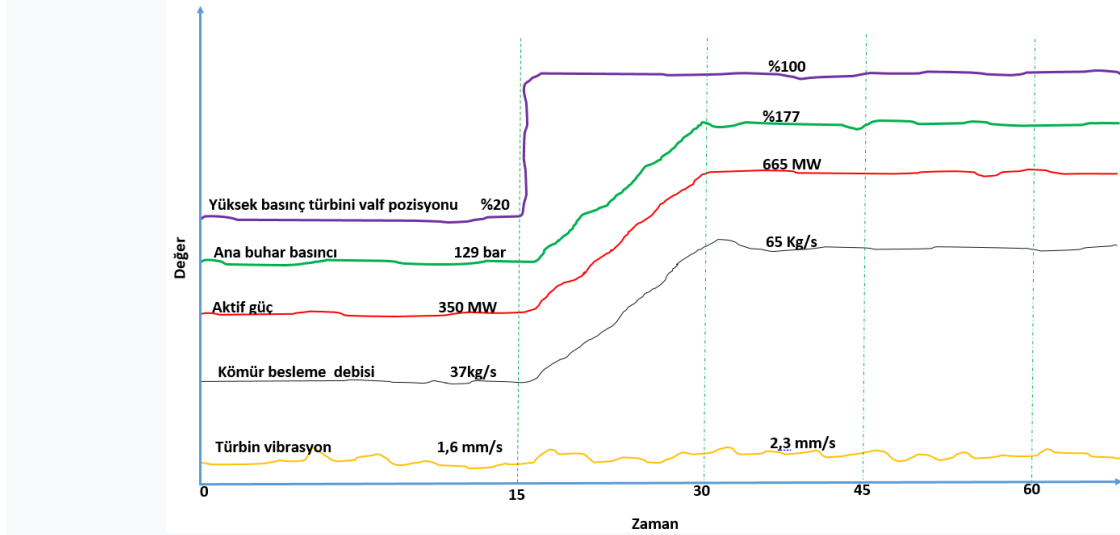
Kritik İşletme Parametreleri	Birim	Değer
Kazan Besi Suyu Pompası Debisi	kg/s	185
Ünite Brüt Yükü	MW	190
Değirmen 10 ve 20 Kömür Debisi	kg/s	10
Kazan Minimum Basınç Set Değeri	bar	123
Baca Gazı Sıcaklığı (Hava ön ısıtıcı giriş)	°C	315
Yüksek Basınç Türbini vibrasyon değeri	mm/s	1.6
Kazan Su Buhar Ayrıştırıcısı Seviyesi (S/U Vessel)	m	0.5

4.2. Yük Rampa Hızı (Load Ramp)

Rampa hızı ünite çıkış gücünün zaman görevi türevidir ancak rampa hızının yüksek olması istenen bir durum olsada ünitelerde kararsızlık ve dengesizlik yaratan bir durumdur. Rampa hızlarını artırmak için tüm ekipmanlara eş zamanlı emir göndererek istenilen yük değeri anlık yük değerini eşleştirmektedir. Ancak hızlı yük alınırken kazan çıkış sıcaklıkları, türbin marjinleri, kazan çıkış emisyonları ve aynı zamanda kazan basıncı yakından takip edilmelidir. Daha önce yapılan çalışmalarda rampa hızı 5-6 MW/dk ile yük alınıp/atılıyordu, Çünkü ilk olarak kömür besleme yapılıyor daha sonra kazanda yanma başlıyor ve basınç artışından sonra türbin valfleri açıklığını artırıyor ve generatör ikaz akımını artırarak yük artışı sağlanıyordu. Şekil 6 hızlı yük almada parametrelerin değişimini

göstermektedir. Yapılan lojistik iyileştirmeler neticesinde %50-%100 yük arasında yapılan teste kazan tepkisi hızlandırılmış, ayrıca türbin kontrol valflerinde kısırtma oranı artırılarak ekstra rezerv yaratılmış ve sonucunda 20 MW/dk rampa hızına ulaşılmıştır bu durum yaklaşık %6 yük değişimini göstermektedir. Test sürecinde kazan basıncı ve sıcaklıklarında dalgalanma gözlemlenmemiş olup emisyonlar limitlerin içerisinde kalmıştır.

içerdiği demir ve silika miktarı ve aynı zamanda buhar basıncı basıncı ve sıcaklığı önem arz etmektedir. Türbin ısıtmada buhar sıcaklığı ile metal sıcaklığını eşleştirip hemen senkron olunmalıdır ve ardından yük artırılarak tam kapasiteye ulaşılır. Şekil 7 optimizasyon sonrası devreye alma çeşitlerine yardımcı yakıt tüketimindeki iyileşmeyi göstermektedir.

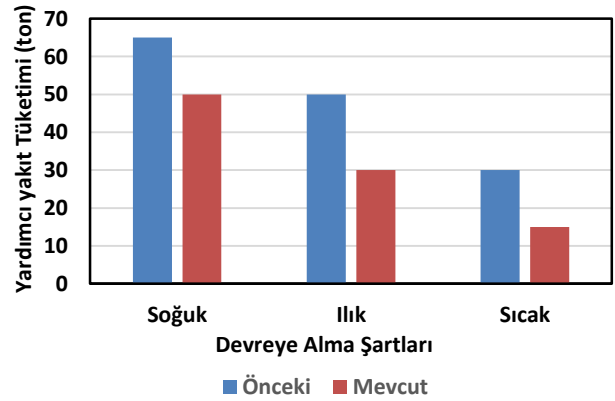


Şekil 6. Hızlı yük almada parametrelerin değişimi (Variation of parameters at fast load ramp-up)

4.3. Devreye Alma Optimizasyonu (Start-up Optimization)

Kömür yakıtlı termik santrallerin devreye alınma süreleri devreye alma tipine göre değiştiğinden bahsedilmiştir. Kömür yakıtlı termik santrallerin devreye alınmaları zor, uzun ve maliyet gerektiren bir durumdur. Termik santrallerin devreye alma optimizasyonundaki amaç ise bu zorlukların aşılacak şekilde santrali daha kısa sürede daha az yardımcı yakıtla sistemde ve ekipmanlar üzerinde bir olumsuzluğa neden olmadan şebekeye senkronize etmektir. Santral devreye alınmanın kompleks bir prosedürü olup kalifiye personel ve derin teknik bir bilgi gereklidir. Devreye alınırken dikkat edilecek hususlar açısından kazan boru demetlerinin ısınma grafikleri ve margin aralıkları yakından takip edilmelidir. Termik santraller ilk olarak kazanlar besleme pompası yardımıyla besleme suyu tankındaki suyu kazan transfer ederler bu sayede kazan boruları doldurulmuş ve belirli bir sıcaklığa ısıtılmış olurlar. Daha sonra kazan ateşleme yapılarak kazandaki en kalın malzemenin margin aralığı dikkate alınarak ateşleme miktarı artırılarak kazan yükü belirlenir. Üretici firmanın belirlediği margin veya sıcaklık artış eğrişi kazan yükü artış miktarını belirler ve zaman ve yardımcı yakıt tasarufu sağlanır. Ayrıca kazan belirli yüke ulaştığında hemen kömür yakıcıları devreye alınmalı yardımcı yakıt devreden çıkartılmalıdır. Aynı şekilde türbin ısıtmada yapılır ama türbine buhar açmak için buhar parametrelerinin belirli gereklilikleri sağlaması gerekmektedir, örnek olarak, iletkenlik,

Devreye alma çeşitlerine yakıt tüketiminde sırasıyla %25, %40 ve %50 değerinde düşüş gözlenmiştir. Bu durum santral devreye alma maliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır.



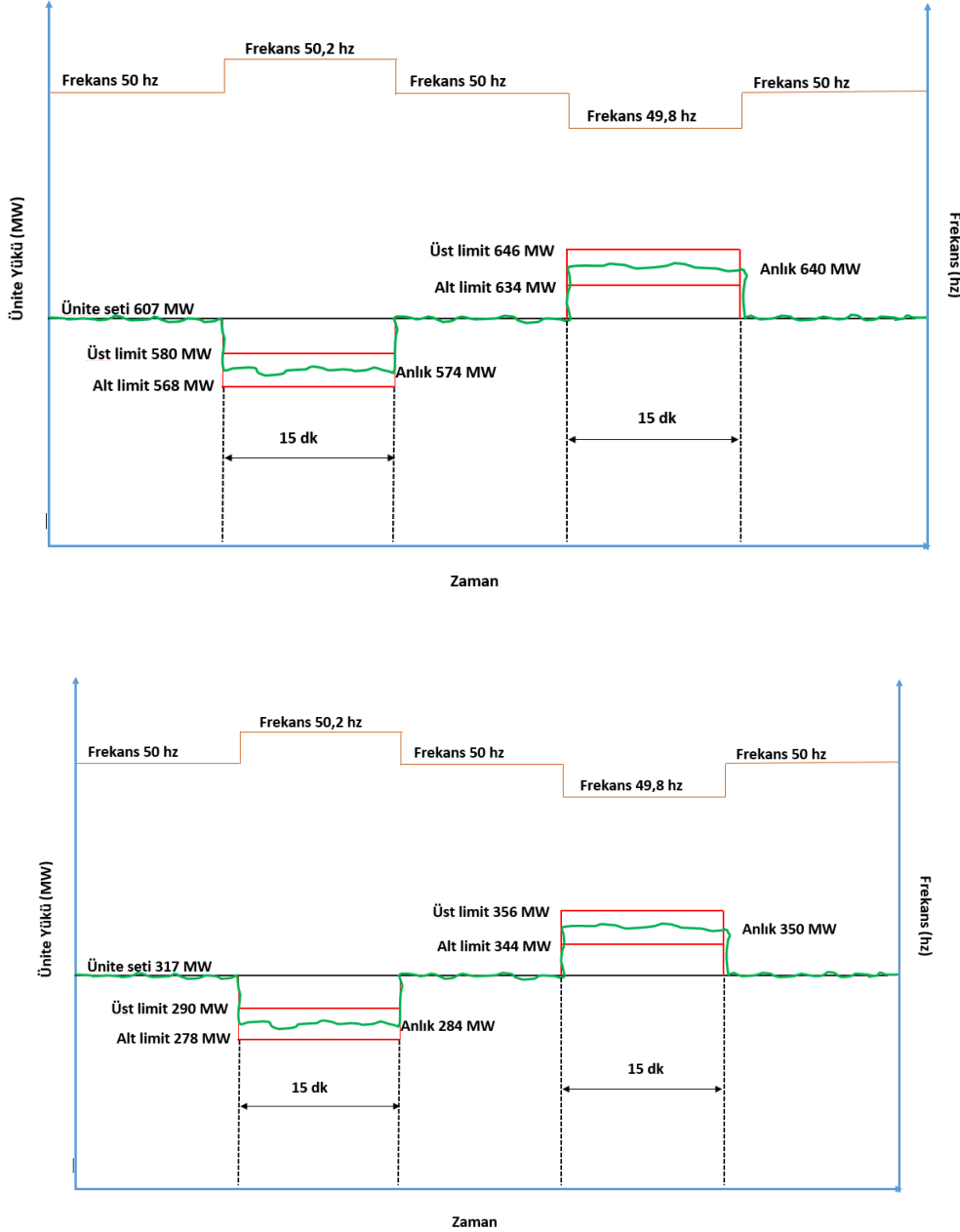
Şekil 7. Devreye alma tiplerine göre yardımcı yakıt tüketimi (Auxiliary fuel consumption by start-up types)

4.3. Frekans Destek Mekanizmaları (Frequency Support Mechanisms)

Dikkate alınan santralde hem primer hemde sekonder testleri uygulanmış başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Primer destek testleri 297-620 MW güç değerleri arasında test koşulları sağlanarak frekansa simülasyon

girilerek ± 33 MW şebekeye istenilen şekilde destek verdiği gözlemlenmiştir. Teste başlamadan önce türbin valfleri kazan mevcut basıncının % 10 üzerinde tutacak şekilde set edilmiştir. Test esnasında kazan ve türbin kritik çalışma parametrelerinde önemli olumsuzluk tespit edilmemiştir.

destek vermiştir ve 574 MW değerine düşmüştür, bu durumun aksine frekansın düşmesi ile beraber 607 MW yükte çalışan tesis +33MW şebekeye destek vererek frekans destek sağlamıştır. Aynı testler düşük yükte de tekrarlanmış ± 33 MW başarıyla destek vermiştir. Ayrıca frekans destek boyunca ünite yükü grafikte gösterilen alt



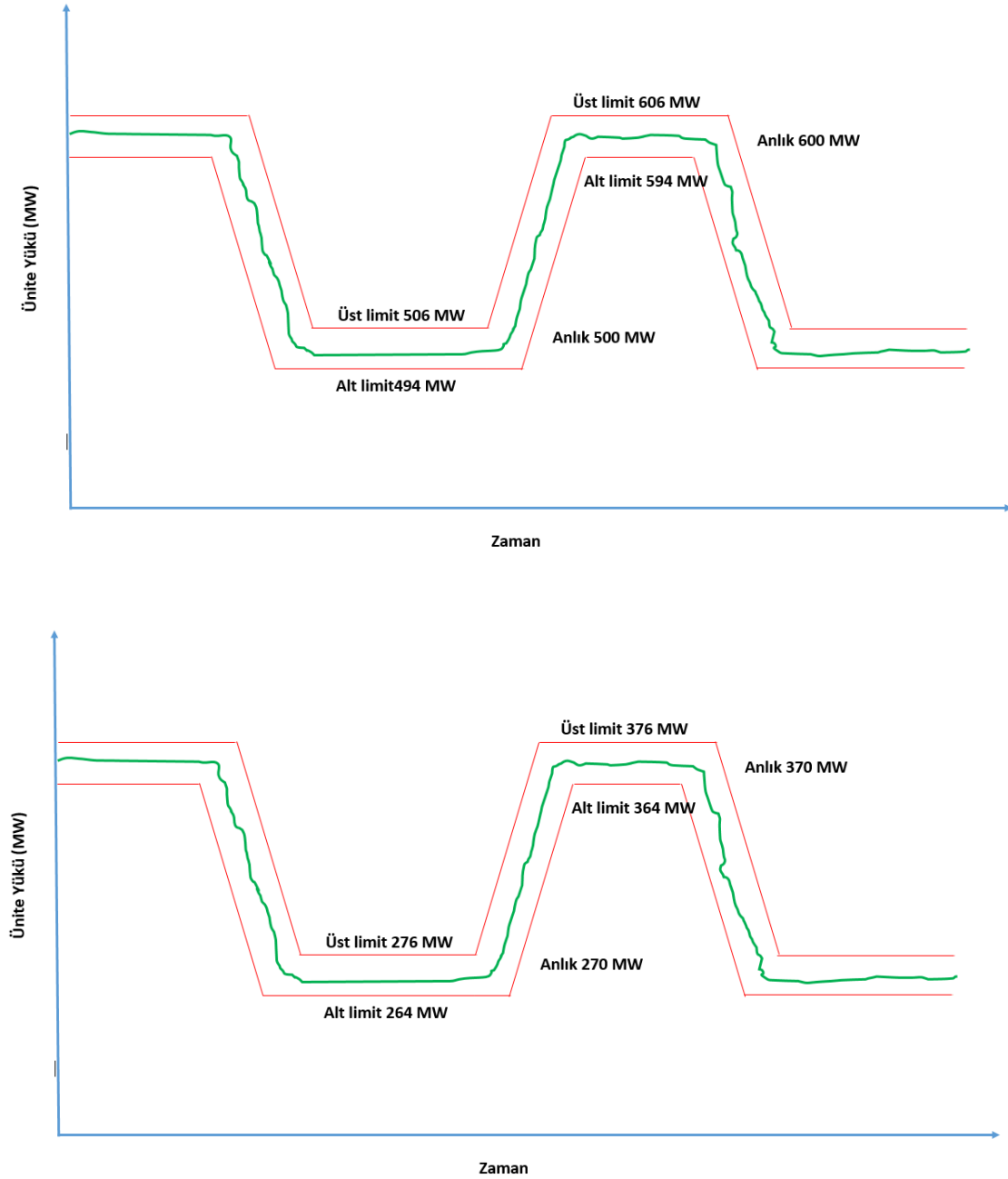
Şekil 8a & 8b. Primer frekans destek mekanizmasının min ve max yükte frekansa göre değişimi (Primary frequency support mechanisms change according to frequency at min and max load)

Primer frekans testleri Şekil 8a & 8b de özetlenmiştir. Sabit 607 MW yükte çalışan ünite frekansın yükselmesiyle tesis 15 dk boyunca -33 MW şebekeye

ve üst limitlerin içinde kalmalıdır aksi takdirde santral primer destek tutulmamış olarak dikkate alınır.

Yük Tevzi Merkezi (YTM) Scadasından otomatik olarak tüm sekonder frekans kontrol (SFK) katılımcılarına o anki şebeke ihtiyacına göre katılımcıların limit değerleri arasında yük set değerleri devamlı olarak gönderilmektedir. SFK testlerinde de SFK ya katılmak isteyen santrallerin, gerek halinde, ihtiyaç duyulacak güç kapasitesini vermek için emre amade olduklarını kanıtlamakla yükümlüdürler. Bu testlerde asıl istenilen SFK yük aralık değerini 5 dakikayı geçmeyecek şekilde yük alma veya yük atma işlemlerini başarı ile

tamamlayabilme kabiliyetinin gözlemlenmesidir. Testler santralin maximum yük aralığı ve minimum yük aralığı için ayrı ayrı uygulanmalıdır. Sekonder frekans destek mekanizmasının min ve max yükte değişimi Şekil 9a & 9b verilmiştir. Testler esnasında santral uzaktan verilen yük değişimlerini hem min hemde max yükte sağlamıştır ve sınırlar içerisinde kalmıştır. Santral yük değişimi ve hedef yüke gelmesi dahil SFK katılım süresi boyunca verilen komut (set) yük değerini %1 nominal tolerans dahilinde kalmak zorundadır



Şekil 9a & 9b. Sekonder frekans destek mekanizmasının min ve max yükte değişimi (Change of secondary frequency support mechanism at min and max load)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Dikkate alınan büyük ölçekli termik santral yaklaşık 15 yıldır devlet ile olan (ESA) anlaşması gereği çoğunluk tam yükte çalışıp, kısa sürelerle en az %50 yükte çalıştırılmıştır. ESA antlaşmasının sona ermesi ve serbest piyasaya dahil olması ile yeni piyasa dinamiklerine adaptasyonu sağlamak amacıyla hem finansal durum hemde ekipman ömrü dikkate alınarak esneklik testleri uygulanmıştır, yapılan testlerin sonuçları ana hatlarıyla aşağıda özetlenmiştir:

- Minimum yük testleri yapılmış ve %30 yükte istikrarlı ve sorunsuz bir şekilde çalışmaktadır,
- Yük rampa hızları tarafından yapılan lojistik iyileştirmeler sayesinde hedeflenen 20 MW/dk noktasına ulaşılmıştır.
- Devreye alma rehberi hem sıcak hemde soğuk devreye alma için revizyon yapılmış yardımcı yakıt kullanımında önemli ölçüde azalma gözlemlenmiştir.
- PFK ve SFK testleri hem düşük hemde tam yükte uygulanmış, sınır değerler içerisinde kalması lojistik ayarlamalar neticisinde sağlanmıştır, sonuç olarak santral ± 33 MW PFK ve ± 40 MW SFK potansiyeline sahiptir.
- Esneklik operasyonlar ekipman ömürlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir, santral bakımları hem planlı hem de kestirimci bakım olarak yapılması gerekmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet TONTU: Data eldesi, çalışmanın analizi ve yazım kısmını gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur..

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Zhao, S., Ge, Z., Sun, J., Ding, Y., Yang, Y., "Comparative study of flexibility enhancement technologies for the coal-fired combined heat and power plant", *Energy Conversion and Management*, 184: 15-23, (2019).
- [2]. Zhao, Y., Liu, M., Wang, C., Li, X., Chong, D., Yan, J., "Increasing operational flexibility of supercritical coal-fired power plants by regulating thermal system configuration during transient processes", *Applied Energy* 225: 2375-2386, (2018).
- [3]. Wang, J., You, S., Zong, Y., Traholt, C., Dong, Zhou, Y., "Flexibility of combined heat and power plants: A review of technologies and operation strategies", *Applied Energy*, 252: 113445 (2019) .
- [4]. Liu, M., Wang, S., Zhao, Y., Tang, H., Yan, J., "Heatpower decoupling technologies for coal-fired CHP plants: Operation flexibility and thermodynamic performance", *Energy*, 188:116074, (2019).
- [5]. <https://www.epias.com.tr/>"Merit order sıralaması", (2020).
- [6]. Dotzauer, M., Pfeiffer, D., Lauer, M., Pohl, M., Mauky, E., Bear, K., Sonnleitner, M., Zeorner, W., Huddle, J., Schwarz, B., Fbauer, B., Dahmen, M. Rieke, C., Herbert, J., Threan, D., "How to measure flexibility e Performance indicators for demand driven power generation from biogas plants", *Renewable Energy*, 134:135-146, (2019).
- [7]. Hentschel, J., Babić, U., Spliethoff, H. "A parametric approach for the valuation of power plant flexibility options", *Energy Reports*, 2:40-47, (2016).
- [8]. Salazar, MAG., Kirsten, T., Prchlik, L., "Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:1497-1513, (2018).
- [9]. Richter, M., Oeljeklaus, G., Görner, K., "Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage", *Applied Energy*, 236:607-621, (2019).
- [10]. Sun, Y., Wang, L., Xu, C., Van herle., J., Marechal, F., Yang, Y., "Enhancing the operational flexibility of thermal power plants by coupling high-temperature power-to-gas ", *Applied Energy*, 263:114608, (2020).
- [11]. Zhao, Y., Wang, C., Liu, M., Chong, D., Yan, J., "Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high pressure heaters on a 660MW supercritical coal-fired power plant: A dynamic simulation", *Applied Energy*, 212:1295-1309, (2018).
- [12]. Tontu, M., Şahin, B., Bilgili, M., "Using energy and exergy analysis to compare different coal-fired power plants", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, in press (2019).
- [13]. Glensk, B., Madlener, R., "Evaluating the enhanced flexibility of lignite-fired power plants: A realoptions analysis", *Energy Conversion and Management*, 177:737-749, (2018).
- [14]. Garbrecht, O., Bieber, M., Kneer, R., "Increasing fossil power plant flexibility by integrating molten-salt thermal storage", *Energy*, 876-883, (2017).
- [15]. Li, D., Wang, J., "Study of supercritical power plant integration with high temperature thermal energy storage for flexible operation", *Journal of Energy Storage*, 20:140-152, (2018).
- [16]. <http://www.epdk.org.tr/>"Elektrik şebeke yönetmeliği", (2020).