

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİKROTÜRBİNLERİN GÜÇ SİSTEMLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ŞEHRİBAN ÇELİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ BEDRİ KEKEZOĞLU**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROTÜRBİNLERİN GÜÇ SİSTEMLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Şehriban ÇELİK tarafından hazırlanan tez çalışması tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Bedri KEKEZOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Bedri KEKEZOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR
İstanbul Gelişim Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın hazırlanma sürecinde tecrübelerini ve zamanını paylaşan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bedri KEKEZOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2018

Şehriban ÇELİK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	4
1.2 Tezin Amacı	13
1.3 Orijinal Katkı.....	13
BÖLÜM 2	
MİKROTÜRBİN ÜRETİM SİSTEMLERİ	15
2.1 Mikrotürbin Üretim Sistemlerinin Gelişimi.....	15
2.2 Mikrotürbinlerde Kullanılan Yakıtlar.....	18
2.3 Mikrotürbinlerin Yapısı ve Çalışma Prensibi	19
2.4 Mikrotürbinlerin Sınıflandırılması	21
2.4.1 Tek Şaftlı Mikrotürbinler.....	22
2.4.2 Ayrık Şaftlı Mikrotürbinler	23
BÖLÜM 3	
MİKROTÜRBİN ÜRETİM SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ.....	24
3.1 Tek Şaftlı Mikrotürbin Modeli	24
3.1.1 Hız Kontrolü	25
3.1.2 İvme Kontrolü	26
3.1.3 Sıcaklık Kontrolü	26

3.1.4	Yakıt Sistemi Kontrolü	27	
3.1.5	Kompresör-Türbin	28	
3.2	Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modeli	29	
BÖLÜM 4			
MİKROTÜRBİN ÜRETİM SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYON ÇALIŞMASI.....			32
4.1	Tek Şaftlı ve Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modellerinde Kullanılan Parametreler	32	
4.2	Ada Çalışma Modu	35	
4.2.1	Tek Şaftlı Mikrotürbin Modelinin Simülasyon Sonuçları	37	
4.2.2	Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modelinin Simülasyon Sonuçları	43	
4.2.3	Tek Şaftlı ve Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modellerinin Yakıt Tüketimi ve Yakıt Maliyeti Açısından Karşılaştırılması	48	
4.3	Şebeke ile Paralel Çalışma Modu	55	
4.3.1	Şebeke ile Paralel Çalışan Tek Şaftlı Mikrotürbin Modelinin Simülasyon Sonuçları.....	55	
4.3.2	Şebeke ile Paralel Çalışan Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modelinin Simülasyon Sonuçları.....	59	
BÖLÜM 5			
SONUÇ VE ÖNERİLER			64
KAYNAKLAR			66
ÖZGEÇMİŞ			72

SİMGE LİSTESİ

i_d	D eksenli stator akımı
$MT_{hız}$	Hız denetleyicisi çıkış sinyali
T_1	Hız denetleyicisi zaman sabiti
T_2	Hız denetleyicisi zaman sabiti
Z	Hız denetleyicisi sabiti
K	Hız denetleyicisi kazancı
K_4	Radyasyon kalkanı sabiti
K_5	Radyasyon kalkanı sabiti
T_3	Radyasyon kalkanı zaman sabiti
T_4	Termokupl zaman sabiti
T_5	Sıcaklık denetleyicisi ile ilişkili sabit
T_t	Sıcaklık denetleyicisi entegrasyon oranı
T_x	Egzoz sıcaklığı
V_{ce}	Kararlı haldeki türbinin mekanik gücünün birim başına değeri
K_6	Yüksüz nominal devirdeki minimum yakıt akış miktarı
K_v	Yakıt kontrol valfi kazancı
T_v	Yakıt kontrol valfi zaman sabiti
c	Yakıt kontrol valfi zaman sabiti
F_d	Yakıt kontrol valfinin girişi
E_1	Yakıt kontrol valfinin çıkışı
K_y	Aktüatör kazancı
T_y	Aktüatör zaman sabiti
W_y	Yakıt talep sinyali (p.u.)
T_{YT}	Yanma tepkimesi ile ilişkili taşıma gecikme süresi
T_{KD}	Kompresör deşarj hacmi ile ilişkili gecikme süresi
T_{TG}	Yanma sisteminden türbine gaz taşınması için taşıma gecikme süresi
$K_{ÜİD}$	Yanma odasındaki gaz akımının entalpisi
N	Rotor hızı (p.u.)
T_R	Referans sıcaklık
T_x	Türbin sıcaklığı
W_{y1}	Türbin-egzoz sistemi gecikmesini ifade eden fonksiyon
P_{talep}	Talep gücü
P_{ref}	Referans güç

K_S	Hız denetleyicisi oransal kazanç değeri
K_k	Hız denetleyicisi integral kazanç değeri
K_F	Güç denetleyicisi oransal kazanç değeri
K_i	Güç denetleyicisi integral kazanç değeri
P_{NomMT}	MT nominal gücü
$D_{türbin}$	Türbinin sönümlenme değeri
L_{max}	Sınır yük
V_{max}	Maksimum gerilim değeri
V_{min}	Minimum gerilim değeri
K_T	Sıcaklık kontrolü döngü kazancı
w_{ref}	Hız referansı
P_{NomSJ}	SJ nominal gücü
V_{rated}	Fazlar arası nominal gerilim
F	Frekans
H	Eylemsizlik sabiti
K_D	Sönümlenme faktörü
R	İç direnç
X	İç reaktans
p.u.	per unit
V	Gerilim
VA	Volt-amper
Hz	Hertz
P_{MT-out}	Mikrotürbin çıkış gücü
FF_{MT}	Mikrotürbin yakıt tüketimi
F_C	Mikrotürbin yakıt maliyeti

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
BTU	British Thermal Unit
CHP	Kombine Isı ve Güç (Combined Heat and Power)
CO	Carbon Monoxide
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DK	Devre Kesici
DÜS	Dağıtık Üretim Sistemleri
HHV	Yüksek Isıtma Değeri (High Heating Value)
LHV	Düşük Isıtma Değeri (Low Heating Value)
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquified Petroleum Gas)
MTÜS	Mikrotürbin Üretim Sistemleri
MT	Mikrotürbin
NO	Nitric Oxide
PID	Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative)
RRC	Remover Ripple Circuit
SJ	Senkron Jeneratör
YH	Yakıt Hücresi
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Mikrotürbin üretim sistemini oluşturan temel bileşenler	20
Şekil 2. 2 Mikrotürbin iç yapısı	21
Şekil 2. 3 Tek şaftlı mikrotürbinin şematik diyagramı	23
Şekil 2. 4 Ayrık şaftlı mikrotürbinin şematik diyagramı	23
Şekil 3. 1 Tek şaftlı mikrotürbin modeli blok diyagramı	25
Şekil 3. 2 Hız denetleyicisine ait blok diyagramı	25
Şekil 3. 3 İvme denetleyicisine ait blok diyagramı	26
Şekil 3. 4 Sıcaklık denetleyicisine ait blok diyagramı	26
Şekil 3. 5 Yakıt sistemine ait blok diyagramı	27
Şekil 3. 6 Kompresör-türbin sistemine ait blok diyagramı	29
Şekil 3. 7 Ayrık şaftlı mikrotürbin modeli temel yapısı	29
Şekil 3. 8 Hız kontrol sistemi modeli	30
Şekil 3. 9 Güç kontrol sistemi modeli	30
Şekil 3. 10 Matlab/Simulink'te geliştirilen ayrık şaftlı mikrotürbin modeli	31
Şekil 4. 1 Mikrotürbin üretim sistemi-dağıtım şebekesi blok diyagramı	35
Şekil 4. 2 Temmuz ayına ait yük profili.....	36
Şekil 4. 3 Nisan ayına ait yük profili.....	36
Şekil 4. 4 Ocak ayına ait yük profili.....	37
Şekil 4. 5 Matlab/ Simulink'te gerçekleştirilen tek şaftlı mikrotürbin modeli	38
Şekil 4. 6 Temmuz ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	38
Şekil 4. 7 Nisan ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	39
Şekil 4. 8 Ocak ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	39
Şekil 4. 9 Temmuz ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç.....	40
Şekil 4. 10 Nisan ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç.....	40
Şekil 4. 11 Ocak ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç.....	41
Şekil 4. 12 Temmuz ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı ..	41
Şekil 4. 13 Nisan ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı.....	42
Şekil 4. 14 Ocak ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı.....	42
Şekil 4. 15 Matlab/ Simulink'te gerçekleştirilen tek şaftlı mikrotürbin modeli	43
Şekil 4. 16 Temmuz ayı yük profiline göre ayrık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü ..	43

Şekil 4. 17	Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	44
Şekil 4. 18	Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	44
Şekil 4. 19	Temmuz ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç.....	45
Şekil 4. 20	Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç.....	45
Şekil 4. 21	Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç.....	46
Şekil 4. 22	Temmuz ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı	46
Şekil 4. 23	Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı	47
Şekil 4. 24	Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı	47
Şekil 4. 25	Temmuz ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması	48
Şekil 4. 26	Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması	49
Şekil 4. 27	Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması	49
Şekil 4. 28	Temmuz ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması.....	50
Şekil 4. 29	Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması.....	50
Şekil 4. 30	Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 4. 31	Matlab/ Simulink'te gerçekleştirilen şebeke ile paralel çalışan tek şaftlı mikrotürbin modeli	55
Şekil 4. 32	Temmuz ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	56
Şekil 4. 33	Temmuz ayı yük profiline göre MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi.....	56
Şekil 4. 34	Nisan ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	57
Şekil 4. 35	Nisan ayı yük profiline göre MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi.....	57
Şekil 4. 36	Ocak ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	58
Şekil 4. 37	Ocak ayı yük profiline göre MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi.....	58
Şekil 4. 38	Temmuz ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan ayırık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü.....	59
Şekil 4. 39	Temmuz ayı yük profiline göre MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi	60
Şekil 4. 40	Nisan ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan ayırık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	60
Şekil 4. 41	Nisan ayı yük profiline göre MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi.....	61
Şekil 4. 42	Ocak ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan ayırık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü	61

Şekil 4. 43 Ocak ayı yük profiline göre MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi..... 62



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1 Bazı dağıtık üretim teknolojilerinin özellikleri ve karşılaştırılması	3
Çizelge 2. 1 Mikrotürbinlerin gelişim aşamaları	16
Çizelge 2. 2 Mikrotürbinlerde ısı kaynağı olarak kullanılan bazı yakıtların özellikleri	19
Çizelge 2. 3 Tek şaftlı ve ayırık şaftlı mikrotürbin tiplerinin karşılaştırılması.....	22
Çizelge 4. 1 Tek şaftlı mikrotürbin modeli parametreleri	32
Çizelge 4. 2 Ayırık şaftlı mikrotürbin modeli parametreleri	33
Çizelge 4. 3 Senkron makine parametreleri	34
Çizelge 4. 4 Dağıtım şebekesi parametreleri	34
Çizelge 4. 5 Ayırık şaftlı ve tek şaftlı MT yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması (Temmuz)	52
Çizelge 4. 6 Ayırık şaftlı ve tek şaftlı MT yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması (Nisan) ...	53
Çizelge 4. 7 Ayırık şaftlı ve tek şaftlı MT yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması (Ocak)	54
Çizelge 4. 8 MTÜS ile dağıtım şebekesi arasında elektriksel açıdan maliyet karşılaştırılması	63

MİKROTÜRBİNLERİN GÜÇ SİSTEMLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Şehriban ÇELİK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Bedri KEKEZOĞLU

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ekonomik ve kesintisiz elektrik enerjisine olan talep artmıştır. Enerji talebinin artması buna bağlı olarak yakıt maliyetlerinin artması, fosil yakıt rezervlerinin azalması ile sera gazı emisyonu artışı vb. etkilerden dolayı yeni enerji alternatiflerine verilen önem de artmaya başlamıştır. Dağıtık üretim sistemleri; bahsi geçen endişelere bir çözüm olarak düşük maliyetli enerji sağlama, yenilenebilir enerjinin kullanılmasına olanak verme, elektrik güç sistemlerinin verimliliğini ve performansını artırma gibi avantajlar sağladığından dolayı giderek dikkat çeken bir konu haline gelmiştir.

Dağıtık üretim sistemleri (DÜS), şebeke bağlantısının bulunmadığı kırsal alanlardaki enerji ihtiyacını karşılama veya şebeke bağlantısının mevcut olduğu bölgelerde şebeke ile paralel çalışarak şebekeden sağlanan elektrik enerjisinin kullanım oranını azaltma amacıyla kullanılabilir. DÜS'ler küçük modüler dağıtık üretim teknolojileri, enerji depolama teknolojileri ve enerji yönetim sistemlerinden oluşmaktadır. DÜS'ler rüzgâr türbini ve fotovoltaik paneller gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinden oluşabileceği gibi mikro türbin ve yakıt hücreleri gibi yenilenebilir olmayan ancak gelecek vadede teknolojilerden de oluşabilmektedir.

Dağıtık üretim teknolojilerinden biri olan mikrotürbinler nispeten yeni bir teknoloji olup, kullanıcılara birçok avantaj sunmaktadır. Mikrotürbinler küçük ölçeklerde hem elektrik hem de ısı üretebildiklerinden dolayı DÜS'lerde ve CHP uygulamalarında büyük oranda

tercih edilen teknolojilerden biridir. Mikrotürbinlerin yapısı ve çalışma prensibi geleneksel gaz türbinleri ile büyük benzerlik göstermektedir. Geleneksel gaz türbinleri gibi başta doğalgaz olmak üzere LPG, dizel, propan ve ek olarak biyoyakıt gibi birçok yakıtla çalışabilmektedir. Jeneratör ve türbinin shaft durumuna bağlı olarak tek shaftlı ve ayrık shaftlı olmak üzere iki tipte mikrotürbin üretim sistemi bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında doğalgazla çalıştığı varsayılan ayrık shaftlı ve tek shaftlı mikrotürbin üretim sistemlerinin farklı senaryolarla ada ve şebekeye bağlı çalışma durumlarında yük takip performansları incelenmiştir. Ayrıca, her iki sistemin de çalışırken tükettikleri yakıt miktarları, buna bağlı olarak yakıt maliyetleri hesaplanıp karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikrotürbin üretim sistemleri, dağıtık üretim sistemleri, yakıt tüketimi, yakıt maliyeti.



INVESTIGATION OF EFFECTS OF MICROTURBINES ON POWER SYSTEMS

Şehriban ÇELİK

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Bedri KEKEZOĞLU

The demand for economical and uninterruptible energy has increased with the advancement in technology. The importance of novel alternative electrical power systems has increased due to the increase in electric power demand and the increase in fuel costs, the decrease in fossil fuel reserves and the increase in greenhouse gas emissions etc. Distributed generation systems (DGS) are currently attracting a lot of attention as a solution to these concerns to provide low-cost energy, enable to use the renewable energy and to increase the efficiency and performance of electrical power systems.

DGS can be used to meet the energy requirement in rural areas where there is no grid connection or to reduce the use of electricity from the grid by working in parallel with the grid in regions where the grid connection is available. DGSs consist of small modular distributed generation technologies, energy storage technologies, and energy management systems. DGSs can be composed of renewable energy technologies such as wind turbines and photovoltaics, as well as non-renewable but promising technologies such as microturbines and fuel cells.

One of the distributed generation technologies, microturbines are a relatively new technology and offer many advantages to the user. Because microturbines can produce both electricity and heat on a small scale, they are one of the technologies that are widely preferred in DGS and CHP applications. The structure and working principle of

microturbines are very similar to traditional gas turbines. It can work with different fuels such as natural gas, LPG, diesel, propane, biofuels and industrial gases. Depending on the shaft state of the generator and turbine, there are basically two types of microturbine generation system (MTGS) as single shaft and split shaft turbines.

In this thesis study, models of single shaft and split shaft MTGSs have been presented which uses natural gas as fuel. Load tracking performance of developed models was analyzed for stand-alone and grid-connected mode under different scenarios. In addition, using the developed models, microturbine output power, fuel consumption and fuel cost could be observed depending on power system dynamics. These values were compared with between two models.

Keywords: Microturbine generation system, distributed generation system, fuel consumption, fuel cost.



GİRİŞ

Enerji üretiminde kullanılan hammadde rezervlerinin azalması, sera gazı salınımının artışından kaynaklanan atmosfer ısısının yükselmesi gibi iklim değişimleri, yüksek yakıt fiyatları ile birlikte “Dağıtık Üretim Sistemleri” kavramı ticari ve teknik avantaj bakımından ön plana çıkmaya başlamıştır. Günümüzde dağıtık üretim sistemleri (DÜS), düşük maliyetli enerji sağlama, elektriksel güç sistemlerinin performansını ve toplam enerji verimliliğini artırma vb. etkileri sebepleriyle giderek dikkat çekmektedir [1]. Dağıtık üretim teknolojileri emisyon değerlerini düşürerek yenilenebilir enerjinin ve CHP uygulamalarında atık ısı enerjilerinin verimli kullanılmasını sağlamaktadır [2].

Dağıtık üretim sistemlerinin gelecekte elektrik üretiminde önemli bir rol oynayacağı tahmin edilmektedir. Şehir merkezine uzak kırsal alanların önemli bir bölümünde şebeke bağlantısı bulunmaması ve dağıtım şebekelerinden uzak bu kırsal alanlara elektrik vermek için kullanılan ekonomik olmayan enerji hatları, elektrik piyasalarının serbestleştirilmesi ve doğal çevrenin korunması ile ilgili hususların sonucu olarak dağıtık üretim yavaş yavaş konvansiyonel üretimin yerini almaya başlamıştır [3]. Dağıtık üretim sistemleri şebeke bağlantısının olmadığı kırsal alanlardaki enerji ihtiyacını karşılamada ve şebeke bağlantısının mevcut olduğu bölgelerde şebeke ile paralel çalışarak şebekeden sağlanan elektrik enerjisinin kullanım oranını azaltma amacıyla kullanılabilir.

Dağıtık üretim sistemleri kullanıcıya yakın bölgelerde bulduklarından dolayı geleneksel dağıtım sistemleri ile kıyaslandığında genel olarak daha verimlidir ve sistemde iletim kayıpları oldukça azdır [4-6]. Dağıtık üretim sistemleri enerji yönetimi ve enerji depolama teknolojileri ile kombine edilebilen modüler dağıtık üretim teknolojilerinden oluşmaktadır. Son kullanıcıya yakın yerlerde bulunan DÜS’ler rüzgâr

türbini ve fotovoltaik paneller gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinden oluşabildiği gibi mikrotürbin ve yakıt hücreleri gibi yenilenebilir olmayan ancak gelecek vaat eden teknolojilerden oluşabilmektedir. Günümüzde sıklıkla faydalanılan dağıtık üretim teknolojileri şu şekilde özetlenebilir:

- Rüzgâr Türbini: Rüzgâr türbini rüzgârdaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Mekanik enerji de rüzgâr jeneratörü aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbin boyutları kW seviyelerinden birkaç MW'a kadar değişebilmektedir. Rüzgâr türbinleri temel olarak kule, kulenin en üst noktasında bulunan ve içerisinde jeneratör, vites kutusu, denetleyici, frenleme donanımları ve tahrik mili bulunduran türbin yatağı ve kanatlardan oluşmaktadır. Rüzgâr türbinleri genel olarak yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [7].
- Fotovoltaik Paneller: Fotovoltaik hücreler, yarıiletken malzemelerden yapılmış, güneş ışığını direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren ve PV panelleri oluşturan yapılardır [8]. Güneş hücreleri olarak adlandırılan fotovoltaik hücreler yansıyan ışığın enerjisini alarak elektrik enerjisine dönüştürürler. Bir fotovoltaik hücre yaklaşık olarak 1 W'lık güç üretmektedir. Fotovoltaik hücreler seri veya paralel bağlanarak büyük çaplarda modüller elde edilebilmektedir.
- Yakıt Hücreleri: Yakıt hücreleri geleneksel enerji santrallerine göre daha yüksek verimliliğe sahip olmanın yanında çevre açısından temiz ve çok düşük gürültüye sahip olan bir dağıtık üretim teknolojisidir. Yakıt hücresi sistemi genel olarak yakıt işleme birimi veya yakıt dönüştürücüsü, yakıt hücresi yığını ve güç düzenleme ünitesinden oluşmaktadır [9, 10]. Yakıt dönüştürücüsünde propan ve metan gibi hidrokarbon yakıtlar işlenerek hidrojen üretilmektedir. Yakıt hücresi yığını, yakıt dönüştürücüsünde elde edilen hidrojen ve havadaki oksijeni kullanarak elektrokimyasal süreçler sonucunda elektrik ve su üretmektedir. Yakıt hücresinin çıkışı DC güç olduğundan, yükleri beslemek üzere AC güce dönüştürülürken güç düzenleme üniteleri kullanılmaktadır. Yakıt hücresi çeşitleri temel olarak Alkalın YH, fosforik asit YH, erimiş karbonlu YH, katı oksit YH, proton değişim membranlı YH şeklinde sıralanmaktadır. Düşük çalışma sıcaklığı (80-100 °C), hızlı cevap verebilmesi, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek ömür gibi özelliklerinden dolayı

konut ve ticari uygulamalar için en uygun yakıt hücresi proton membranlı yakıt hücresidir.

- Mikrotürbin Üretim Sistemleri (MTÜS): Mikrotürbinler, nispeten küçük boyutları, yüksek verimlilikleri, hızlı cevap verebilmeleri ve düşük işletme bakım maliyetine sahip olmaları gibi avantajları ile dağıtık üretim teknolojileri arasında ön plana çıkmaktadır. Mikrotürbinler; küçük, kompakt ve basit çevrimli gaz türbinleridir. Mikrotürbinler, küçük güçlerde hem ısı hem de elektrik ürettiklerinden dolayı DÜS'lerin içerisinde ve CHP uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Mikrotürbinler, dağıtık üretim sistemlerinde temel yük talebini karşılamak üzere bağımsız kaynak, hibrit bir sistemde ana kaynak, yardımcı kaynak veya pik shaving sağlayıcı kaynak olarak çalışabilmektedir. Yakıt olarak doğal gaz, LPG, dizel, propan, biyoyakıt ve endüstriyel gazlar gibi yakıtlar ile çalışabilmektedir. Temel olarak tek şaftlı ve ayrı şaftlı olmak üzere iki tip mikrotürbin üretim sistemi bulunmaktadır.

Çizelge 1.1'de bahsi geçen bazı teknolojilerin boyut, yakıt çeşidi ve elektriksel verimliliği açısından karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 1. 1 Bazı dağıtık üretim teknolojilerinin özellikleri ve karşılaştırılması

TEKNOLOJİ	BOYUT	YAKIT ÇEŞİDİ	ELEKTRİKSEL VERİMLİLİK
Mikrotürbin	25 – 500 kW	Doğal gaz, propan, biyogaz, dizel vb.	%25-30
Yakıt Hücreleri	1 W – 10 MW	Doğal gaz, Hidrojen	%37-60
Rüzgâr Türbini	0.2 kW – 5 MW	Yenilenebilir	%35-45
Fotovoltaik	1 W – 10 MW	Yenilenebilir	%5-15

Bu çalışmada doğalgazla çalışan hem tek şaft tipi ve hem de ayrı şaft tipi mikrotürbin modeli sunulmuştur. Her iki model de Matlab/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup modellere yakıt tüketim bloğu ve yakıt maliyeti bloğu ilave edilmiştir. Böylelikle güç sistemi üzerinde meydana gelen değişikliklere bağlı olarak çıkış gücü, yakıt tüketimi ve yakıt maliyetindeki değişimler gözlemlenebilmiştir. Yapılan

çalışma kapsamında geliştirilen modellerin yük takip performansı ada ve şebeke bağlantı modunda farklı yük koşullarında test edilmiş ve doğrulanmıştır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde mikrotürbin üretim teknolojisinin farklı çalışma modlarında modellenmesi, farklı dağıtık üretim teknolojileri ile hibrit bir sistem oluşturularak modellenmesi ve bu teknolojinin yakıt tüketimine dayalı çalışmaları ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. Ayrıca tez çalışmasının amacı ve tezin orijinal katkısından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde modeli ve simülasyonu gerçekleştirilen mikrotürbin üretim teknolojisi tanıtılmıştır. Bu teknolojinin uygulama alanlarından, çalışma prensibinden, çeşitlerinden ve bu üretim teknolojisinde kullanılan yakıtlardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde ayırık şaft ve tek şaft tipi mikrotürbin üretim sistemlerinin matematiksel modelleri açıklanmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde iki modelde kullanılan parametreler verildikten sonra şebekeden bağımsız ve şebeke ile paralel olarak çalışan ayırık şaft ve tek şaft tipi mikrotürbin üretim sistemlerinin farklı senaryolarla ve farklı yük koşullarında elektriksel güç çıkışları, yakıt tüketimleri, yakıt maliyetleri incelenip karşılaştırılmıştır.

Tezin son bölümünde ise yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş olup üzerinde çalışılan teknoloji ile ilgili geleceğe yönelik yapılabilecek çalışmalara dair önerilere yer verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Farklı çalışma modlarında mikrotürbin üretim sistemlerinin modellenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genel olarak teknik olarak modelleme ve ekonomik açıdan modelleme şeklinde sınıflandırılabilir. Çalışmaların büyük bir bölümünde, mikrotürbin üretim sistemlerinin tek başına veya diğer dağıtık üretim teknolojileriyle hibrit bir sistem oluşturularak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikrotürbinler yakıtla çalıştıklarından dolayı bazı çalışmalarda da mikrotürbinin yakıt tüketiminin minimum olmasına yönelik optimizasyon çalışmaları yapıp, mikrotürbinlerin yakıt problemi çözülmeye çalışılmıştır. Mikrotürbin üretim teknolojisi ile ilgili başlıca çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Gaonkar ve Patel, izole edilmiş dağıtık üretim uygulamaları için normal çalışma koşulları altında tüm kontrol sistemlerini içeren tek şaftlı bir mikrotürbin modeli geliştirmişlerdir. Oluşturdukları modelde kalkış, kapanma, güç kaybı ve dahili arızaları içeren hızlı dinamikler ihmal edilmiştir ve ayrıca hız denetleyicisi olarak bir faz ilerletici-gecikmeli kontrolör kullanılmıştır. Modele, mikrotürbinin verimliliğini arttırmak için kullanılan geri kazanım ünitesi dahil edilmemiştir. Modelin simülasyon sonuçları ile birlikte modelin yük değişimlerine göre güç ihtiyacını karşılayabildiği gözlemlenmiş olup ve izole edilmiş dağıtık üretim uygulamaları için uygun olduğu görülmüştür [11].

Gaonkar, Patel ve Pillai benzer bir çalışmada tek şaftlı bir mikrotürbin modelinin ada çalışma ve şebekeye bağlı moda performanslarını incelemişlerdir. Sıcaklık ve ivme kontrolü, normal çalışma durumlarına herhangi bir etkileri olmadığından dolayı modele dahil edilmemiştir. Bir önceki modele benzer olarak sistemde geri kazanım ünitesi bulunmamaktadır. Simülasyon sonuçları kurulan modelin her iki çalışma modunda da güç taleplerini karşılamak için kullanılabileceğini göstermektedir [12].

D.N. Gaonkar, 2010 yılında yayımladığı “Dağıtık Üretim” adlı kitabının bir bölümünde N. Dattatraya ile bir çalışma yürütmüştür. Bu bölümde mikrotürbin üretim sistemleri teknolojisi, uygulamaları ve performans çalışmaları analiz edilmiştir. Ayrıca bu bölümde şebekeye bağlı tek şaftlı bir mikrotürbin üretim sisteminin Matlab/Simulink’te geliştirilen detaylı modeline yer verilmiştir. Şebekeye bağlı çalışma ve ada modu çalışma arasında mikrotürbin üretim sisteminin kesintisiz aktarımı için algoritma geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre oluşturulan modelin her iki çalışma modu için performans açısından uygun olduğu tespit edilmiştir [13].

K nayak ve Gaonkar, mikrotürbin üretim sisteminin şebekeye bağlı ve ada modunda modellenmesi ve performans analizi üzerinde çalışmışlardır. Mikrotürbin üretim sistemi modeli sırasıyla mikrotürbin, sabit mıknatıslı senkron jeneratör, AC/DC/AC dönüştürücüler ve güç elektroniği arayüz devrelerinden oluşmaktadır. Farklı yükler uygulanması durumunda mikrotürbin çıkış gücünü kontrol etmek için bir DC-link gerilim denetleyicisi kullanılmaktadır. Mikrotürbin üretim sistemi modeli Matlab/Simulink kullanılarak oluşturulmuştur ve simülasyon sonuçları çeşitli yükler için mikrotürbin üretim sisteminin yük takip performansını göstermektedir [14].

K Nayak ve Gaonkar, Shivarudraswamy ile birlikte bir başka çalışmada bir mikrotürbin üretim sistemi için bulanık mantık tabanlı denetleyiciyi, PI denetleyici ve geleneksel ileri-geri denetleyiciye alternatif olarak araştırmaktadır. Mikrotürbin üretim sistemindeki yük değişimi Matlab/Simulink'te bulanık mantık denetleyici ve ileri-geri denetleyici kullanılarak incelenmiştir. İki denetleyicinin performansı mikrotürbin üretim sisteminde karşılaştırılmış olup bulanık mantık denetleyicinin yük değişimlerinde daha az geçici dalgalara oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bulanık mantık kontrollü mikrotürbinlerin arzu edilen dinamik tepkiyi sağlayabileceği ve güç kalitesini olumlu yönde etkileyeceği sonucuna varılmıştır [15].

Kandil ve arkadaşları, güç sistemi dinamik çalışmaları için uygun olan bir mikrotürbin üretim sisteminin dinamik modellemesi ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında bir gerilim-frekans (V-f) kontrol stratejisi ile bir mikrotürbin üretim sisteminin ada modu çalışması incelenmiştir. Üzerinde çalışılan mikrotürbin üretim sistemi modelinin test ve doğrulama sonuçları ile modelin gereksinim duyulan mod ve çalışma karakteristikleri açısından uyumlu bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca modelin farklı mikrotürbin modellerinin test işlemlerinde kullanılabilme ve çeşitli dağıtık üretim kontrol stratejileri tasarımları sağlayabilme gibi avantajlarının bulunduğu sonucuna varılmıştır [16].

Ofualagba, çalışmasında tek şaftlı bir mikrotürbin üretim sisteminin hem ada modu hem de şebekeye bağlı modda modellemesi ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Tek şaftlı mikrotürbin üretim sistemi modelinin simülasyon sonuçları; modelin farklı yüklerin güç gereksinimlerini karşılayabildiğini, dağıtık üretim uygulamalarında güç yönetimi açısından uygun olduğunu ve hem güç hem CHP uygulamaları için kullanılabilir olduğunu göstermektedir [17].

Saha ve arkadaşları, çalışmalarında bir mikrotürbinin dağıtık enerji kaynağı olarak modellenmesini, simülasyonunu ve yük takip performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada jeneratöre akuple edilmiş ayrık şaft tipi bir mikrotürbinin ada modu ve şebeke bağlantı modunda farklı yük koşulları için simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan mikrotürbin modeli, değişken yüklerde sabit hızda çalışmak için bir hız denetleyicisi içermekte olup, hem hız denetleyicisi varken hem de hız denetleyicisi olmaksızın model performansı incelenmiştir. Modelin normal

çalışma koşullarında olduğu düşünülerek sıcaklık kontrolü, ivme kontrolü ve geri kazanım ünitesi modele dâhil edilmemiştir. Yapılan test sonuçları modelin yük taleplerini karşılayabildiğini göstermekte olup bu sonuçlar benzer bir sistemin test edilmesi ile elde edilen gerçek verilerle karşılaştırılmıştır [18].

Saha, bir başka çalışmasında bir dağıtık enerji kaynağı olarak iki farklı mikrotürbin modelinin yük takip performansını analiz etmek için modellemesini ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir. İlk model hız regülatörü, ivme kontrolü ve sıcaklık kontrol bloklarından oluşurken diğer model geleneksel GAST modelidir. Simülasyonlar ada modu ve şebekeye bağlı çalışma modlarında gerçekleştirilmiştir ve yük takip performansı test edilip doğrulanmıştır [19].

Guo ve Guo, çalışmalarında; mikrotürbin, sabit mıknatıslı senkron jeneratör, doğrultucu ve invertörden oluşan bir mikrotürbin üretim sistemi için bir elektro-mekanik simülasyon modelini oluşturarak modüler modelleme yöntemini benimsemişlerdir. Ayrıca mikrotürbin üretim sisteminin şebekeye bağlı ve ada modu çalışması için kontrol stratejisi araştırmışlardır. Şebekeye bağlı çalışma modundaki kontrol stratejisi yükün çıkış gerilimini korumayı benimserken, ada modu çalışma için kontrol stratejisi PQ kontrol algoritmasını benimsemektedir. Çalışmada ayrıca mikrotürbin üretim sisteminin çıkış gücünü regüle etmek için yeni bir kontrol stratejisi tanımlanmıştır. Simülasyon sonuçları yeni stratejinin uygulanabilir olduğunu göstermektedir [20].

Singh ve arkadaşları, çalışmalarında şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı çalışma için bir dağıtık enerji kaynağı olarak mikrotürbinin yük takip performansını analiz etmek için modellemesini ve simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sistem mikrotürbin tarafından tahrik edilen sabit mıknatıslı senkron jeneratörden oluşmaktadır. Genel sistemin kısa bir açıklaması verilmiş olup, mikrotürbin ve sabit mıknatıslı senkron jeneratörün matematiksel modelleri sunulmuştur. Çalışmanın son bölümünde geliştirilen modeller Matlab/Simulink'te simüle edilmiştir. Simüle edilen mikrotürbin modeli, çıkış gücünü ayarlayabilen kontrol sistemleri bulunan tek shaftlı bir mikrotürbin modelidir. Simülasyon sonuçları mikrotürbin üretim sisteminin yükün güç gereksinimlerini karşılayabildiğini göstermektedir [21].

Srikanth ve arkadaşları, çalışmalarında şebekeye bağlı ve ada modu çalışma için dağıtık üretimde mikrotürbin üretim sisteminin kullanılmasına değinmişlerdir. Çalışmada şebeke ve MTÜS arasında güç akışının yanı sıra ada modu ve şebekeye bağlı çalışma için kontrol stratejilerine yer verilmiştir. Simülasyon sonucu olarak sırasıyla; sabit mıknatıslı senkron makinenin elektromanyetik tork değişimi, sabit mıknatıslı senkron makine stator akımı değişimi, DC-link gerilimi, enjekte edilen şebeke akımının i_d bileşeninin değişimi, yük terminalleri üzerindeki gerilim, gerilimin toplam harmonik bozulma oranı gözlemlenmiştir [22].

Asgharian ve Noroozian, çalışmalarında Remove Ripple Circuit(RRC) isimindeki yeni bir filtre topolojisi ile birlikte mikrotürbin üretim sisteminin dinamik modellenmesinden bahsetmişlerdir. Çalışmalarında eş zamanlı olarak ada modu ve şebekeye bağlı çalışma için tek shaftlı bir mikrotürbin üretim sisteminin dinamik modellenmesi incelenmiştir. Mikrotürbin üretim sistemi; sabit mıknatıslı senkron jeneratör, DC/AC invertör ve hem ada modu hem de şebekeye bağlı moda çalışabilen RRC'den oluşmaktadır. Simülasyon çalışmaları Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar RRC'nin bir çıkış filtresi olarak arzu edilen performansı ve dinamikleri sağlayabildiğini göstermektedir [23].

Kumar ve arkadaşları, bir mikrotürbin üretim sistemi modellemiş ve bir mikrotürbin üretim sisteminin dinamik simülasyonu için makine tarafında yeni bir dönüştürücü geliştirmişlerdir. Dönüştürücü modelleri Matlab/Simulink'te SimPowerSystems kütüphanesi kullanılarak uygulanmıştır. Modelde LCL filtresi kullanılarak yük tarafında yüksek harmonikler azaltılmıştır. Çalışma sonucunda modelin herhangi bir bozulma olmaksızın mikrotürbinin sabit hızını ve dönüştürücü çıkışındaki DC gerilimini koruyabildiği gözlemlenmiştir [24].

El-Sharkh ve arkadaşları ile Uzunoglu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda General Electric şirketi tarafından geliştirilen GAST modelini kullanmışlardır. Bu iki çalışmada bir mikrotürbin ve bir yakıt hücresinin yük kademesi değişimine tepki süresi karşılaştırılmaktadır. Simülasyon sonuçları Matlab, Simulink ve SimPowerSystems kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları ile mikrotürbinin yakıt hücresine nazaran daha hızlı cevap verebildiği dolayısıyla mikrotürbinlerin dağıtık üretim uygulamaları için yük değişimlerini takip performansının daha yüksek olduğu tespit

edilmiştir. Ayrıca simülasyon sonuçlarından mikrotürbinlerin çalışmasını incelemek için GAST modelinin uygulanabilirliği gözlemlenmiştir [25, 26].

GAST modeli ayrıca Kalantar ve Mousavi tarafından kullanılmış ve test edilmiştir. Kalantar ve Mousavi, elektrik şebekesinden uzakta izole edilmiş bir yükü beslemek için rüzgâr türbini, mikrotürbin, güneş dizisi ve akü depolama sisteminden oluşan bir hibrit güç üretim sisteminin dinamik davranışlarını ve simülasyon sonuçlarını incelemişlerdir. Bu hibrit sistemi oluşturan kaynakların dinamik modellenmesinin yanı sıra verimli ve ekonomik kullanımı için kaynakların optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Farklı kaynaklar arasındaki enerji yönetimini sağlamak amacıyla merkezi bir denetleyici tasarlanmıştır. Bu çalışmada ana kaynak olarak güneş dizisi ve rüzgâr türbini, yedek kaynak olarak mikrotürbin ve akü depolama sistemi kullanılmıştır. Kalantar ve Mousavi, çalışmalarında ayrıca mikrotürbinlerin yakıt maliyet fonksiyonunu modellemek için ikinci dereceden bir denklem önermişlerdir. Oluşturdukları model, üretici tarafından bilinen çıkış gücü ile yakıt tüketimine ilişkin verilere bağlıdır [27].

Mousavi, benzer bir çalışmada rüzgâr türbini, gelgit türbini, mikrotürbin ve akü depolama sisteminden oluşan hibrit bir güç üretim sistemi tasarlamıştır. Bu çalışmada da aynı yöntem kullanılmış olup, her iki çalışmada da bu tür hibrit güç üretim sistemlerinin izole edilmiş yükleri etkili bir şekilde besleyebilme kapasitesi belirlenmiştir [28].

Mohamed ve arkadaşları, mikrotürbin ve yakıt hücresinden oluşan hibrit bir sistemi ada çalışma ve şebeke bağlantı modunda modellemişlerdir. Modelin simülasyon sonuçları, ada çalışma ve şebeke bağlantı modunda yükün her iki kaynak arasındaki dağılımını göstermektedir. Mikrotürbin ve yakıt hücresi yük değişimini karşılamak üzere çıkışlarını hızlı bir şekilde düzenleyebildiklerinden bir mikroşebekede dağıtık üretim kaynakları olarak her iki kaynağın uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir [29].

Martín ve arkadaşları, çalışmalarında mikrotürbin ve katı oksit yakıt hücresinden oluşan hibrit bir model sunmuşlardır. Katı oksit yakıt hücresinin elektriksel verimliliği mikrotürbinle hibridizasyondan dolayı artmıştır, mikrotürbinin elektriksel verimliliği ise katı oksit yakıt hücresinden çıkan egzoz gazının yanma odasında yakılmasından dolayı artmıştır. Çalışma sonucunda oluşturulan bu hibrit sistemin emisyonları azaltacağı ve arz

güvenliğini sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada ayrıca diğer enerji kaynakları ve depolama sistemleri ile mikrotürbinin entegrasyonunun farklı olasılıkları incelenmiştir [30].

Komatsu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada katı oksit yakıt hücresi ve mikro gaz türbininden oluşan hibrit bir güç sisteminin kısmi yük çalışmada performans değerlendirmesini nümerik olarak incelenmiştir. Çalışma sonunda bu hibrit sistemin performans karakteristiklerinin büyük ölçüde katı oksit yakıt hücresine bağlı olduğu ve kısmi yük çalışma için yeterince uygun olduğu sonucuna varmışlardır [31].

Caisheng ve arkadaşları tarafından şebekeden bağımsız uygulamalar için rüzgâr türbini ve mikrotürbinden oluşan hibrit bir sistem oluşturularak gerçek yük değerlerine ve gerçek rüzgâr verilerine dayalı durum çalışması analiz edilmiştir. Bu çalışmada rüzgâr türbini ve mikrotürbin ile gerekli tüm kontroller ve güç elektroniği arayüzleri modellenmiştir. Simülasyon sonuçları, dağıtık üretim uygulamaları için bu tür hibrit bir sistemin uygun olduğunu göstermiştir. Bu hibrit sistem rüzgâr enerjisinin avantajlarından faydalanırken, mikrotürbin yakıt tüketimini en aza indirmekte ve büyük oranda güvenilirlik sağlamaktadır [32].

Jain ve arkadaşları, rüzgâr türbini ve mikrotürbin üretim sisteminin birleşiminden oluşan bir hibrit güç üretim sistemi üzerinde çalışmışlardır. Hibrit güç üretim sisteminin simülasyon modeli Matlab/Simulink'te tasarlanmış olup çeşitli rüzgâr hızlarında hibrit güç üretim sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Sistemin simülasyon sonuçları, rüzgâr hızı ne olursa olsun sistemin yüke sabit bir güç sağlayabileceğini göstermektedir. Hibrit sistem ayrıca yakıt tüketimini yüke göre değiştirerek yakıt tüketimini azaltmaktadır. Üretim sistemleri birbirleriyle çok iyi koordine olduğundan dolayı hibrit rüzgâr-mikrotürbin üretim sisteminin bağımsız mod için uygun olduğu sonucuna varılmıştır [33].

Abdel-Geliel ve arkadaşları, 230 kW rüzgâr türbini, 30 kW mikrotürbin ve çift-paralel akışlı güneş enerjili ısıtıcı hücrelerden oluşan şebekeden bağımsız hibrit bir güç üretim sistemini incelemişlerdir. Çalışmalarında, oluşturulan hibrit model birçok rüzgâr hızı koşulları altında simüle edilmiştir. Yük taleplerini ve rüzgâr hız değişiminden kaynaklanan rüzgâr gücü dalgalanmalarını karşılamak için rüzgâr türbini tarafından

tutulan maksimum enerji ve mikrotürbin tarafından üretilen gücü yönetebilmek için merkezi bir denetleyici tasarlanmıştır. Matlab/Simulink'te SimPowerSystems kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilen modelin simülasyon sonuçları, modelin iyi performans gösterdiğini ve hibrit güneş-mikrotürbin modelinin yıllık yakıt tasarruf miktarlarını göstermektedir [34].

Nascimento ve arkadaşları, çalışmalarında yakıt olarak dizel, biyodizel ve bu yakıtların harmanlarıyla beslenen bir dizel mikrotürbinin tam ve kısmi yüklerde termal performansını ve emisyonları değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Termal performansı değerlendirmek için Gate Cycle GE Enter yazılımı kullanılarak bir çevrim simülasyonu ve Itajuba Üniversitesi Federal Nest laboratuvarlarında 30 kW'lık bir mikrotürbinin performans ve emisyon testleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar ile deney sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonuçları, dizel yerine biyodizel yakıt kullanımının mikrotürbinin ısı oranında belirgin azalma sağladığını, emisyon seviyesi olarak CO'nun arttığı ve NO'nun azaldığını göstermektedir [35].

Alkhalil ve arkadaşları, doğalgazla çalışan ve farklı yükleri besleyen bir C30 Capstone mikrotürbininin yakıt akışı değerlerini ölçmüşlerdir. Yük güç değerleri 2 ila 30 kW arasında değişmektedir. Ölçüm sonuçları yakıt akışı ile güç arasındaki ilişkinin hemen hemen lineer olduğunu göstermektedir. MS-Excel kullanılarak yakıt tüketim maliyetinin yük gücüne göre değişim eğrisini elde etmişlerdir. Eğri kullanılarak oluşturulan matematiksel modelin sadece 0,0597 €/kWh değerindeki doğalgaz fiyatına sahip C30 modeli için geçerli olduğunu ve bilinmeyen doğalgaz fiyatları göz önüne alınarak genişletebileceği belirtilmiştir. Çalışmalarının asıl amacı kojenerasyon ünitelerinden oluşan bir güç istasyonunun yakıt tüketimini optimize etmek ve oluşturduğu kirliliği (CO ve NOx) minimize etmektir [36].

Rahman ve arkadaşlarının çalışmaları, Matlab/Simulink'te akıllı ve şebekeden bağımsız bir dağıtık güç sisteminin fiziksel bileşenlerinin modellerinin geliştirilmesini ve daha birçok konuyu içermektedir. Bahsi geçen modeller fotovoltaik güneş panelleri, rüzgâr türbini jeneratörleri, yakıt hücreleri ve batarya depolama teknolojileridir. Mikrotürbin modeli bölümünde 30 kW gücündeki bir mikrotürbinin kısmi yük durumlarında verimliliğini ve performansını bir eğri üzerinden incelemişlerdir. Eğriyi üç doğrusal bölüme ayırıp, her bölüm için çıkış gücü ile verimlilik arasındaki ilişki için bir eşitlik

oluşturmuşlardır. Herhangi bir çıkış gücünde ilgili verimlilik ve ilgili giriş gücü kWh/h cinsinden değerinin ve bu giriş gücünden de Btu/h miktarı ve doğal gazın alt ısı değerine bağlı olarak saatte yakıt miktarı kg veya m³ cinsinden bulunabileceği belirtilmiştir [37].

Alimardani ve arkadaşları, çalışmalarında örnek bir yük değişimi için mikrotürbinlerin yakıt tüketimi problemini sunmaktadır. Çalışmalarında, yakıt tüketimi için en uygun özelliklere sahip olmak ve en iyi denetleyici parametrelerini bulmak için sisteme diferansiyel evrime dayalı bir optimizasyon uygulanmıştır. Bunun yanında mikrotürbin üretim sisteminin kararlılık konusuna da değinilmiştir. En uygun hız regülatörü tasarlanmıştır ve günlük yük değişimine karşılık en az toplam yakıt tüketimi de elde edilmiştir. Sonuçlar, yakıt tüketimine göre ayrılan farklı ağırlık faktörlerinde hız değişiminin uygun durumda olduğunu göstermektedir [38].

Keshtkar ve arkadaşları, benzer bir çalışma olarak mikrotürbin, sabit mıknatıslı senkron jeneratör, güç düzenleme ve gerilim kontrol sistemlerini incelemiştir. Akıllı şebekelerin temel gereksinimlerinden biri olan hızlı ve uygun kontrol sistemi tasarımı ve hız regülatörü sistemi için en iyi parametrelerin hesaplanması amacıyla çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu amaçla bir mikrotürbin sisteminin regülatörüne diferansiyel evrime dayalı bir optimizasyon uygulanmıştır. Sonuç olarak en uygun hız regülatör sistemi tasarlanmış ve günlük yük değişimine karşılık hız ve toplam yakıt tüketiminin en az değişimi elde edilmiştir. Model bir mikroşebekeye entegre edilmiş olup, sonuçlara göre mikroşebekenin cevap süresinin iyileştiği ve yakıt tüketiminin minimum olmasından dolayı en ekonomik tasarım olduğu gözlemlenmiştir [39].

Gomatom ve Jewell, çalışmalarında mikrotürbin dağıtık üretim sistemlerinin performans analizini incelemiş olup ekonomik ve en uygun performans için yakıt özelliklerine bağımlılıklarını analiz etmişlerdir. Yakıt parametreleri ve sırasıyla yakıt giriş basıncı, yakıt debisi, yakıt entalpisi, yakıtın kimyasal bileşimi, ortam sıcaklığı, yükseklik ve elektriksel yük gibi performans ölçütleri özetlenmiştir [40].

Singh ve Srinivasan, çalışmalarında bir doğalgaz mikrotürbinini tarafından üretilen enerjinin maliyeti ile mevcut elektrik şebekesinden alınan elektrik enerjisinin maliyetini kıyaslamışlardır. Ayrıca Atlantik Kanada'da bulunan küçük bir kimyasal üretim şirketinde bir kojenerasyon sistemi olarak bir doğalgaz mikrotürbininin maliyet açısından etkinliğini

incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, bir C60 tipi doğalgaz mikrotürbinin mevcut şebekeden alınan enerji ile ekonomik açıdan rekabet edebilmesi için mikrotürbinin net elektrik verimliliğinin iyileştirilmesi ve mikrotürbin maliyetinin önemli ölçüde azaltılması gerektiği tespit edilerek kimyasal üretim şirketi için bir kojenerasyon sistemi olarak bir mikrotürbinin kullanılmasının düşünüldüğü gibi avantajlı olmadığı ispatlanmıştır [41].

Sisworahardjo ve El-Sharkh, çalışmalarında bir mikrotürbin enerji üretim santrali için yapay sinir ağları tabanlı bir modeli tanıtmışlardır. Çalışmada, GAST mikrotürbin modeli ile YSA tabanlı bir modelin performans karşılaştırılması sunulmuştur. YSA'ya dayanan modelinin güç, hız ve sıcaklık kontrol sinyalleri olmak üzere üç girdisi ve mikrotürbin mekanik güç olmak üzere bir çıktısı bulunmaktadır. Sonuç olarak GAST modeli ile YSA tabanlı mikrotürbin modelinin dinamik cevaplarının ve performanslarının benzer olduğu gözlemlenmiştir [42].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada gelecek vadeden dağıtık üretim teknolojilerinden biri olan mikrotürbinlerin iki ayrı modeli tanıtılmıştır. Bu modeller sırasıyla doğalgazla çalışan ayırık şaft ve tek şaft tipi mikrotürbin modelleridir. Ayırık şaft modeli olarak sadece hız ve güç kontrol denetleyicilerinin bulunduğu ve mikrotürbinlerin modellenmesinde yaygın olarak tercih edilen GAST modeli kullanılırken; tek şaftlı model olarak yakıt, ivme, sıcaklık ve hız denetleyicilerinden oluşan bir model kullanılmıştır. Geliştirilen modellere yakıt tüketimi ve yakıt maliyeti blokları ilave edilmiştir. Böylece güç sistemi üzerinde meydana gelen değişikliklere bağlı olarak çıkış gücü, yakıt tüketimi ve yakıt maliyetindeki değişimler gözlemlenebilecektir. Tez çalışması kapsamındaki amaç, bahsi geçen iki modelin şebekeden bağımsız ve şebeke ile paralel çalışması durumunda farklı yük koşulları için performanslarını ortaya koymak ve iki modeli elektriksel güç, yakıt tüketimi ve yakıt maliyeti açısından karşılaştırmaktır. Bu şekilde mikrotürbin üretim sistemlerinin bir dağıtık üretim teknolojisi olarak kullanılmasına yönelik yapılması planlanan çalışmalara yol göstermektir.

1.3 Orijinal Katkı

Dağıtık üretim sistemleri; kullanıcıya yakın yerlerde bulunduğundan merkezi üretimde elektrik iletimi ve dağıtım esnasında oluşan hat kayıplarını önlemek, yenilenebilir enerjinin kullanımına olanak sağlayarak fosil yakıtlara olan ihtiyacı ve emisyon salınımını azaltmak gibi birçok önemli avantajı beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, bu durum farklı dağıtık üretim teknolojilerinin çalışma performansını ve sağladığı avantajları incelemeye yöneltilmektedir.

Mikrotürbin üretim sistemleri nispeten yeni bir dağıtık üretim teknolojisi olup, farklı çalışma şartlarında modellenmesine ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında farklı denetleyiciler ile kontrol edilen iki ayrı tip mikrotürbin üretim sisteminin ada modu çalışma ve şebeke ile paralel çalışma durumlarında farklı yük koşullarındaki çalışma performansları test edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca, modellere ilave edilen yakıt tüketimi ve yakıt maliyeti blokları sayesinde her iki modelin yakıt tüketimleri ve yakıt maliyetleri karşılaştırılmıştır.

MİKROTÜRBİN ÜRETİM SİSTEMLERİ

Dağıtık üretim teknolojilerinden biri olan mikrotürbinler, kullanıcıların elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak üzere dağıtık üretim pazarında dikkat çekici hale gelmeye başlamıştır. Mikrotürbinler dağıtık üretim alanında temel kaynaklardan biri olarak düşünülmektedir [11], [43-46].

2.1 Mikrotürbin Üretim Sistemlerinin Gelişimi

Mikrotürbinler ilk defa 1950-1970 yılları arasında otomotiv pazarına girmiştir. Birinci nesil mikrotürbinler; uçak, otobüs ve diğer ticari ulaşım araçları için elektrik üreten ticari uygulamalar için tasarlanmış türbinlere dayanmaktadır. Dağıtık üretim teknolojilerine olan talebin artmasıyla, mikrotürbinlerin enerji piyasasında kullanımı 1980 ve 1990 yılları arasında artmıştır [47]. 1978 yılında Allison motor şirketi, askeri uygulamalar için küçük gaz türbinleri tarafından çalıştırılan üretim gruplarının inşası ve geliştirilmesi amacıyla bir proje başlatmıştır. 1981 yılında 200 jeneratörlü bir seri gaz türbini ABD ordusuna teslim edilmiştir ve o günden bu yana Patriot Sistemleri A.Ş.'ye elektrik üretim sistemini entegre etmek için 2.000'den fazla gaz türbini ünitesi sağlanmıştır [48]. 1980 yılında Gaz Araştırma Enstitüsünün desteği ile havalı türbinin tipik özelliklerini taşıyan 50 kW gücünde küçük bir gaz türbini geliştirmek amacıyla, Gelişmiş Enerji Sistemi (GES) adında bir program başlatılmıştır. 1990 yılında bu programa, ürünün nihai maliyeti ile ilgili sorunlar nedeniyle Gaz Araştırma Enstitüsü tarafından son verilmiştir [49]. 1990 yılından itibaren Gaz Araştırma Enstitüsü, Kuzey Araştırma ve Mühendislik Enerji Sistemleri (Northern Research & Engineering Energy Systems) gibi birkaç şirketle birlikte yeni

projelere destek vermeye başlamıştır ve ayrıca Capstone türbin şirketinin de (Capstone Turbine Corporation) ilk çalışmalarını desteklemiştir [50]. 1997 yılında elektrik motoruna bağlı bir mikrotürbin vasıtasıyla hibrit araçların çalışması, araştırma merkezleri ve Ford gibi bazı büyük otomobil üreticileri tarafından ilgi görmüştür [51].

Çizelge 2.1, mikrotürbinlerin geçtiği farklı gelişme aşamalarını ve bu teknolojinin gelecek beklentilerini özetlemektedir [52].

Çizelge 2. 1 Mikrotürbinlerin gelişim aşamaları

YIL	MİKROTÜRBİN GELİŞİMİ
1950'ler	Araştırılmaya başlandı
1988	Capstone türbin şirketi mikrotürbin kavramını geliştirmeye başladı.
1998	Capstone ticari güç malzemeleri öneren ilk üretici oldu.
1999-2000	Ticari pazara girdi.
1990'ların sonları	Yeni bir güç üretim teknolojisi olarak ortaya çıktı.
2000	Elektriksel verimlilik= %23-30, Toplam verimlilik= %65-75, Kurulum maliyeti=1050-1300 Euro/kW, Çalışma ve bakım maliyetleri=0.5-1 C/kWh, NOx emisyonu < 0.217 kg/MWh.
2010	Elektriksel verimlilik= %38-42, Toplam verimlilik= %70-80, Kurulum maliyeti=550-850 Euro/kW, Çalışma ve bakım maliyetleri=0.1-0.2 C/kWh, NOx emisyonu < 0.217 kg/MWh.
2020-Beklenen	100 kW mikrotürbin için; Elektriksel verimlilik= %36, Toplam verimlilik= %82, Kurulum maliyeti=700 Euro/kW, NOx emisyonu < 0.217 kg/MWh.

Mikrotürbin küçük, kompakt, 25 ila 500 kW aralığında değişebilen çıkış güçlerine sahip basit çevrimli gaz türbinleridir [27], [53-55]. Geleneksel yedek jeneratörlerin aksine mikrotürbinler, uzun süre çalışacak ve az bakım gerektirecek şekilde tasarlanmıştır.

Mikrotürbinler, küçük ölçeklerde elektrik ve ısı ürettiklerinden dolayı genellikle sabit enerji üretim uygulamalarında kullanılırlar. Mikrotürbinler küçük ofisler, restoranlar, perakende satış mağazaları, hotel/moteller, hastaneler ve küçük sanayiler gibi küçük ticari yapılar için çok uygundur [54, 59]. Mikrotürbinler, özellikle birleşik ısı ve güç (CHP) yani kojenerasyon uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Mikrotürbinler, dağıtık üretim sistemlerinde temel yük talebini karşılamak üzere bağımsız olarak, hibrit bir sistemde ana kaynak, yedek kaynak veya pik shaving sağlayıcı kaynak olarak çalışabilmektedir.

Mikrotürbinlerin temel özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Boyut – Diğer dağıtık üretim teknolojilerine göre nispeten daha küçüktürler.
- Verim – Elektriksel verimlilikleri %25-30 değerlerine ulaşabilmektedir, CHP sistemlerinde atık ısının geri kazanımı sayesinde bu değer %80'den daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir.
- NOx Emisyonu – Doğalgazla çalışan makinelerinden 7 ppm daha düşüktür.
- Çalışma Süresi – Bakım aralıkları 11.000 saat olup servis ömürleri 45.000 saattir.
- Ekonomi – Sistem maliyetleri <500\$/kW'tır.
- Yakıt Esnekliği – Doğal gaz, dizel, etanol, biyoyakıt vb. gibi birçok yakıt türü ile çalışabilmektedir.
- Gürültü – Gürültü ve titreşimleri düşük düzeydedir.

Mikrotürbinler ayrıca diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında az sayıdaki hareketli parçaya sahip olma, hızlı cevap verebilme, daha fazla verimlilik ve daha düşük emisyon sağlama gibi avantajlar da sunmaktadır. Nispeten düşük yatırım maliyeti, küçük boyutları, beklenen düşük işletme ve bakım maliyetleri sayesinde mikrotürbinlerin dağıtık üretim pazarının önemli bir payını alacağı beklenmektedir. Bunun yanında mikrotürbinler soğutma ve hava kompresörü gibi doğrudan mekanik olarak tahrik edilen sistemler için temiz ve verimli bir çözüm sunmaktadır [60].

2.2 Mikrotürbinlerde Kullanılan Yakıtlar

Mikrotürbinlerin temel yakıt kaynağı doğal gazdır. Yakıt olarak ayrıca LPG, dizel, propan, biyoyakıt ve endüstriyel gazlar gibi yakıtlar ile çalışabilmektedir. Mikrotürbinlerde kullanılan bazı yakıtların özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Doğalgaz: Doğalgaz, yeryüzünün derinliklerinde meydana gelmektedir. Esas olarak metan, bir karbon atomu ve dört hidrojen atomu içeren bir bileşikten oluşur. Doğalgaz yakıt olarak kullanılmanın yanı sıra malzeme ve kimyasal üretiminde de kullanılmaktadır [56]. Bu çalışmada geliştirilen mikrotürbin modellerinde yakıt olarak doğalgaz kullanıldığı varsayılmıştır.
- LPG (Liquified Petroleum Gas): Kokusuz ve renksiz olan sıvılaştırılmış petrol gazı; propan, bütan ve bu gazların karışımını içermektedir. LPG, doğalgazın işlenmesi ve petrolün rafinelerde arıtılması ile elde edilir. LPG, bir damıtma kulesi kullanılarak ham petrolden çıkarılır. LPG; ısıtma, pişirme, sıcak su ve taşıtlarda alternatif yakıt olarak kullanılmanın yanı sıra petrokimya hammaddeleri için sıklıkla kullanılır. LPG, tek başına kullanılabildiği gibi propan, bütan ve izobütan olmak üzere üç ayrı gaza ayrılabilir. LPG, silindir veya tanklarda basınçlı olarak sıvı halde depolanır [52].
- Dizel: Dizel, çoğu yük kamyonu, tren, otobüs, bot, çiftlik ve inşaat araçlarının dizel motorlarında yakıt olarak kullanılır. Ayrıca bu yakıt dizel jeneratörlerde elektrik üretmek amacıyla kullanılır. Birçok endüstriyel tesiste, büyük binalarda, kurumsal tesislerde, hastaneler ve elektrik kurumlarında yedek ve acil durum güç kaynağı olarak dizel jeneratörler bulunmaktadır [57].
- Propan: Propan, bir molekülünde 3 karbon ve 8 hidrojen atomuna sahip yanıcı bir hidrokarbon gazdır. Kimyasal formülüdür C_3H_8 şeklindedir. Propan, doğal olarak diğer hidrokarbonlar ile birlikte bulunur [52]. Bütan gazı ile karıştırılması durumunda sıvılaştırılmış petrol gazı elde edilir.
- Biyoyakıt: Biyoyakıtlar termal veya kimyasal işlemlerle biyokütleden üretilen sıvı veya gaz yakıtlardır. Biyokütle karbon döngüsünün parçaları olan organik malzemeleri içermektedir. Organik maddeler fotosentez süreci yoluyla oluşumları için havadan karbondioksit Emilimi sağlayıp havaya oksijen

vermektedir. Organik maddelerin yakılması ile ortaya çıkan karbondioksit, bu organik maddelerin fotosentez yoluyla oluşumlarında havadan emildiğinden dolayı bir karbondioksit dengesi sağlanmış olur. Dolayısıyla biyokütle ve biyoyakıtların üretilmesi esnasında net olarak CO₂ açığa çıkmaz [58].

- Endüstriyel atık gazlar: Rafinerilerden, kimya tesislerinden ve çelik fabrikalarından gelen alevlenen gazlar ve atık gazlardan oluşmaktadır.

Çizelge 2.2’de mikrotürbinlerde kullanılan yakıtların sırasıyla kimyasal formülleri, Low Heating Value(LHV) – Alt Isıl Değer, High Heating Value(HHV) – Üst Isıl Değer ve yoğunluk değerleri verilmiştir. Bu çizelgeye göre ısıl değeri en yüksek olan yakıt doğalgazdır. Bu özellik, mikrotürbinlerde yakıt olarak en fazla doğalgazın kullanılmasını sağlamıştır.

Çizelge 2. 2 Mikrotürbinlerde ısı kaynağı olarak kullanılan bazı yakıtların özellikleri [68]

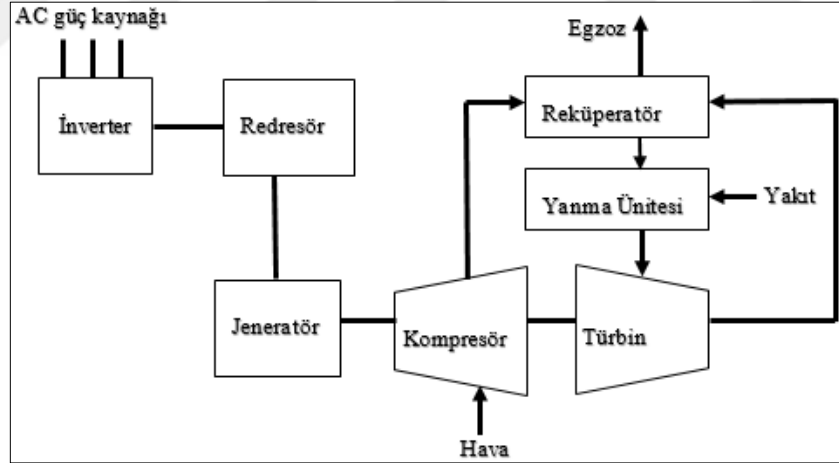
Yakıt	Kimyasal Formül	LHV (MJ/kg)	HHV (MJ/kg)	Yoğunluk
Doğalgaz	CH ₄	47.141 MJ/kg	52.225 MJ/kg	0.712 kg/m ³
LPG / Propan	C ₃ H ₈	46.607 MJ/kg	50.152 MJ/kg	1.898 kg/m ³
Dizel	C ₈ ve C ₂₅	42.791 MJ/kg	45.766 MJ/kg	840 kg/m ³
Biyodizel	C ₁₂ ve C ₂₂	37.528 MJ/kg	40.168 MJ/kg	880 kg/m ³

2.3 Mikrotürbinlerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Mikrotürbinler dizayn bakımından gaz türbinleri ile benzerlik göstermektedir. Şekil 1’de bir mikrotürbin üretim sistemini oluşturan temel bileşenler gösterilmektedir. Bu bileşenler sırasıyla türbin, yanma ünitesi, kompresör, jeneratör, reküperatör ve güç elektroniği donanımlarıdır.

- Türbin: Yüksek hızlı ve düşük hızlı olmak üzere iki tiptir.
- Jeneratör: Tek şaftlı türbinde jeneratör, türbin ile aynı şaft üzerinde akuple edilmiştir. Rotor iki veya dört kutuplu sürekli mıknatıslı tip, stator ise geleneksel bakır sargılıdır. Ayrık şaftlı modelde ise geleneksel indüksiyon makinesi veya senkron makine, türbine bir dişli kutusu üzerinden bağlanmıştır.

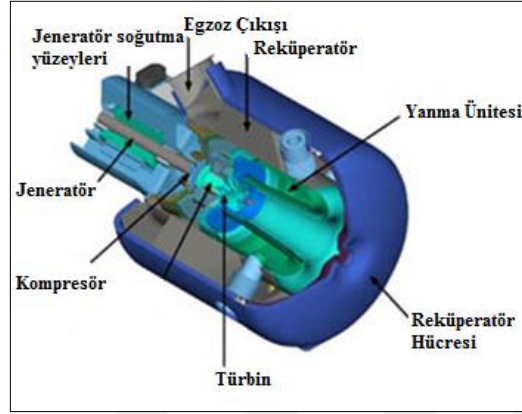
- Güç elektroniği: Tek şaftlı makinede 1500 Hz ile 4000 Hz arasında yüksek frekanslı AC gerilim üretilmektedir ve bu gerilimin standart şebeke frekansındaki gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm için güç elektroniği ara yüzüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrık tip şaft dizaynında ise dişli kutusu sebebiyle böyle bir ara yüze gereksinim yoktur.
- Geri kazanım ünitesi: Geri kazanım ünitesi atık ısıdan enerji sağlayarak mikro türbinin veriminin artırılmasını sağlayan donanımdır. Isıyı egzoz gazından, yanma odasına girmeden önce deşarj havasına transfer etmektedir. Böylece deşarj havasının gereksinim duyulan değere ulaşmasını sağlamak için gereken yakıt miktarı azalmaktadır. Egzoz ısı su ısıtmasında, kurutma süreçlerinde veya absorpsiyonlu chiller üniteleri ile soğutma süreçlerinde kullanılabilir. Böylece bu işlemler için gereken şebeke elektriginde azalma gerçekleşmektedir.
- Kontrol ve iletişim: Kontrol ve iletişim sistemleri tüm türbin kontrol mekanizmaları, güç elektroniği arayüzü, kalkış elektroniği, enstrümantasyon, izleme vb. sistemleri içermektedir.



Şekil 2. 1 Mikrotürbin üretim sistemini oluşturan temel bileşenler [21]

Çalışma prensibi bakımından bir mikrotürbin herhangi bir geleneksel gaz türbini ile benzerlik göstermektedir. Çalışması Brayton döngüsü olarak bilinen termodinamik döngü prensibine dayanmaktadır [54, 61]. Brayton döngüsünde atmosferik hava kompresöre girer ve burada sıkıştırılır. Sıkıştırılan yüksek basınçlı hava reküperatör ünitesinde (geri kazanım ünitesi) egzoz gazı ısıyla ön ısıtmaya tabi tutulur. Yüksek basınçlı hava ile aynı basınçtaki enjekte edilen yakıt yanma odasında karıştırılarak yakılır.

Elde edilen sıcak gazın basıncı ve sıcaklığı artar ve türbin bölümünde genişmesi sağlanır. Gaz genişmesi türbin kanatlarının dönmesine neden olur, daha sonra türbin kanatları hem jeneratör hem de kompresörü tahrik eder. Tahrik edilen jeneratör şaft tipine bağlı olarak normal ya da yüksek frekanslarda güç üretir.



Şekil 2. 2 Mikrotürbin iç yapısı [67]

2.4 Mikrotürbinlerin Sınıflandırılması

Mikrotürbinler, türbin ve jeneratör şaft durumuna göre sınıflandırılırlar. Mikrotürbinler şaft durumuna bağlı olarak tek şaftlı ve ayırık şaftlı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

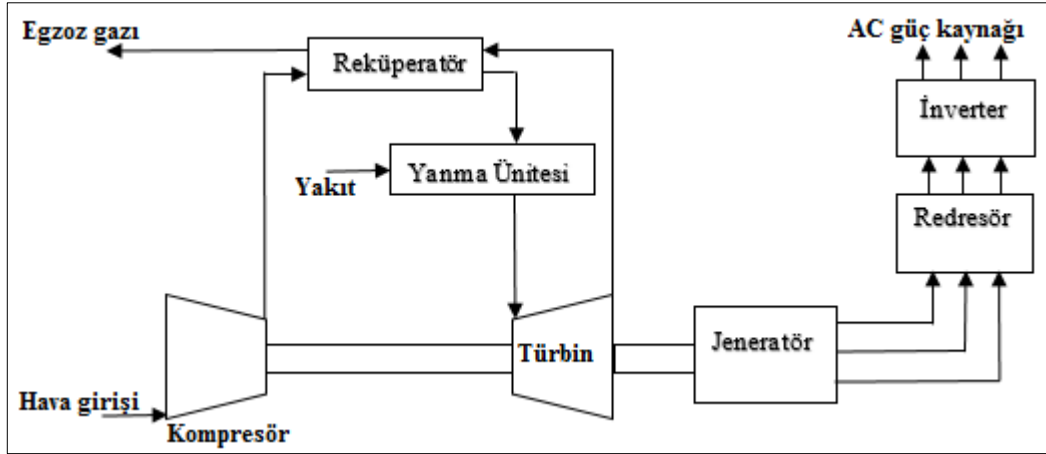
Çizelge 2.3'de mikrotürbin tipleri arasında karşılaştırma yapılmıştır [18, 29, 62].

Çizelge 2. 3 Tek şaftlı ve ayrik şaftlı mikrotürbin tiplerinin karşılaştırılması

ÖZELLİKLER	MİKROTÜRBİN TİPİ	
	TEK ŞAFTLI MT	AYRIK ŞAFTLI MT
Dönüş Hızı (rpm)	50.000-120.000	3000 veya 3600
Jeneratör Frekansı (Hz)	1500-4000	50 veya 60
Bağlantı Durumu	Türbin ve jeneratör direkt olarak bağlanır.	Jeneratör ve türbin şaftını bağlamak için bir dişli kutusu kullanılır.
Jeneratör Tipi	Genellikle sabit mıknatıslı senkron jeneratör	Genellikle indüksiyon jeneratörü
Bakım	Daha az bakım	Ek hareketli parçalardan dolayı daha fazla bakım
Maliyet	Güç elektroniği bölümü ve kullanılan jeneratör tipinden dolayı daha yüksek maliyet	Daha düşük maliyet
Boyut ve Ağırlık	Daha düşük	Dişli kutusu ve yağlama sisteminden dolayı daha yüksek

2.4.1 Tek Şaftlı Mikrotürbinler

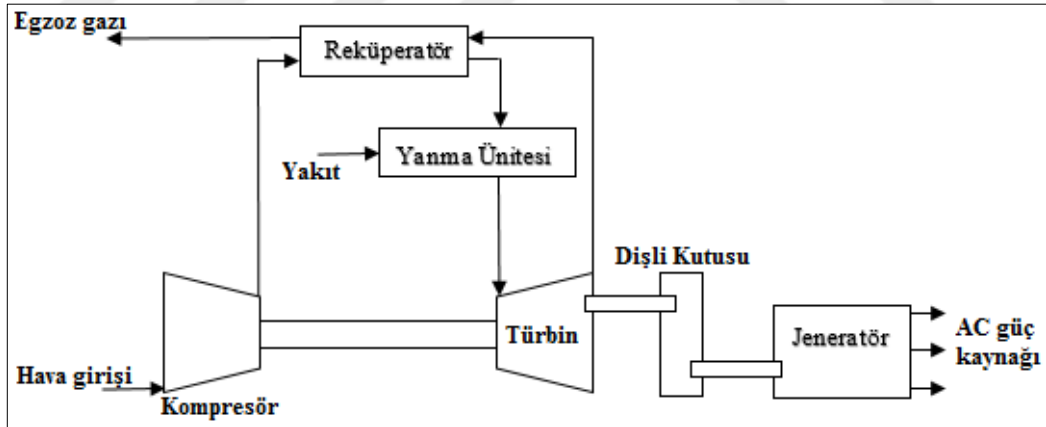
Şekil 2.3’de şematik diyagramı verilen tek şaftlı mikrotürbinlerin, türbin ve jeneratörün aynı şaft üzerinde bulunması sebebiyle hızları yüksektir. Türbin hızı 50.000-120.000 rpm arasında değişmektedir [25]. Elektrik enerjisini elde etmek için sabit mıknatıslı senkron makine kullanılmaktadır. Sabit mıknatıslı senkron jeneratör çıkışında yaklaşık olarak 400 Hz’den birkaç kHz’e kadar çıkabilen yüksek frekanslı AC gerilimi üretilmektedir. Bu frekans güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılarak 60 Hz’e dönüştürülmektedir. Güç elektroniği dönüştürücüleri yüksek frekanslı AC gerilimi, DC gerilime doğrultan redresör ve DC gerilimi de 60 Hz AC gerilime dönüştüren invertörden oluşmaktadır.



Şekil 2. 3 Tek şaftlı mikrotürbinin şematik diyagramı [61]

2.4.2 Ayrık Şaftlı Mikrotürbinler

Ayrık şaftlı mikrotürbin sistemlerinde türbin, jeneratöre bir dişli kutusu aracılığıyla bağlanmaktadır. Türbin hızı 3000 yada 3600 rpm olarak değişmektedir. İndüksiyon jeneratörü veya senkron jeneratör çıkışında 50 veya 60 Hz frekanslı AC gerilim üretildiğinden dolayı güç elektroniği dönüştürücülerine ihtiyaç duyulmamaktadır [63, 64]. Ayrık şaftlı mikrotürbinlere ait şematik diyagram Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 4 Ayrık şaftlı mikrotürbinin şematik diyagramı [65]

MİKROTÜRBİN ÜRETİM SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

Farklı çalışma şekillerinde mikrotürbin sisteminin modellenmesi birçok çalışmada araştırılmıştır [5, 11-26, 39, 43, 63, 66]. Bu çalışmalarda genel olarak mikrotürbinlerin kararlı durumda veya geçici halde, bağımsız veya hibrit bir sistem içerisinde çalışması incelenmektedir.

Mikrotürbin üretim sistemlerinin paket programlar ile analizinin yapılabilmesi için matematiksel modellenmelerinin yapılması gerekmektedir.

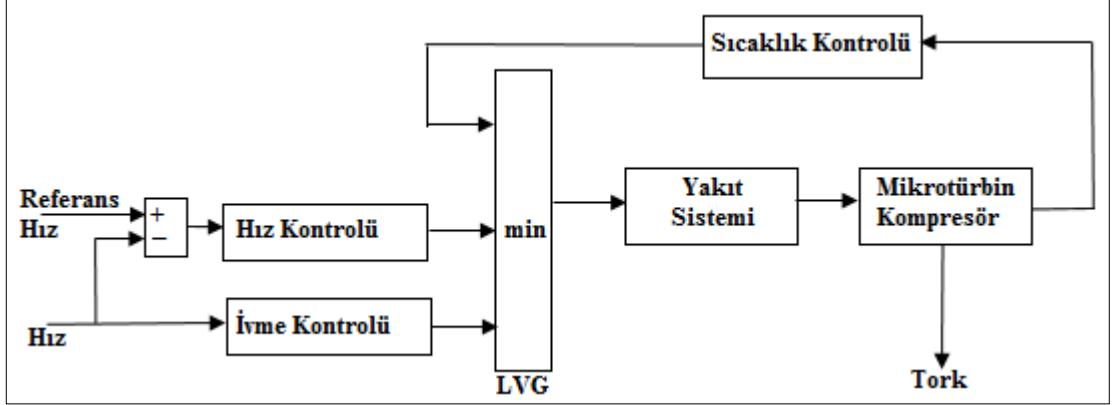
Modellemelerde mikrotürbinin şaft tipine göre donanımlar değişmektedir. Ayrık şaftlı modelde güç elektroniği sistemleri kullanılmaz ve standart senkron jeneratörler vardır. Tek şaftlı modelde ise güç elektroniği ara yüzü ve sabit mıknatıslı senkron makine modelleri vardır. Mikro türbin üretim sistemleri analizinde her bir birimin modellenmesi gerekmektedir.

Bu bölümde sırasıyla mikrotürbin üretim sisteminin iki farklı simülasyon modeli ve bu modellerde bulunan kontrol denetleyicileri açıklanmıştır.

3.1 Tek Şaftlı Mikrotürbin Modeli

Şekil 3.1' de gösterildiği gibi tek şaftlı mikrotürbin modeli hız kontrolü, ivme kontrolü, sıcaklık kontrolü, kompresör-türbin ve yakıt sisteminden oluşmaktadır. Bahsi geçen üç kontrol bloğunun çıkışı "Low Value Gate (LVG) – Düşük Değer Kapısı" olarak adlandırılan bir bloğun girişine bağlanmaktadır. Bu sayede yakıt sisteminde üç denetleyiciden en azının etkin olması sağlanmış olur.

Mikrotürbinin kalkış, kapanma, dâhili arızalar ve güç kaybı gibi hızlı dinamiklerinin ihmal edildiği normal çalışma durumunda çalıştığı varsayılmaktadır.



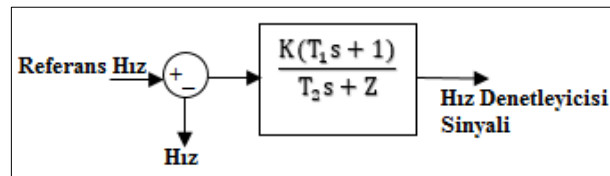
Şekil 3. 1 Tek shaftlı mikrotürbin modeli blok diyagramı [17]

3.1.1 Hız Kontrolü

Hız kontrolü, bir referans hız ile mikrotürbin üretim sisteminin rotor hızı arasındaki hız farkıyla çalışmaktadır ve normal çalışma şartlarında mikrotürbinin ana denetleyicisidir. Hız kontrolü genellikle bir lead-lag transfer fonksiyonu veya bir PID denetleyici kullanılarak modellenmektedir [59, 60]. Bu çalışmada hız denetleyicisinin matematiksel modeli bir lead-lag transfer fonksiyonuna dayanmaktadır.

$$MT_{\text{hız}} = \frac{K(T_1s+1)}{T_2s+Z} \quad (3.1)$$

Burada, T_1 ve T_2 hız denetleyicisinin ileri-geri zaman sabitleridir. T_1 , T_2 , Z sabitleri ile kontrol kazancı K ve Z sabiti parametreleri ayarlanarak hız denetleyicisinin modu hem droop (yükte düşen hız) hem de sabit hız olarak değiştirilebilmektedir. Eşitlik (3.1) ile transfer fonksiyonu verilen hız denetleyicisinin blok diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

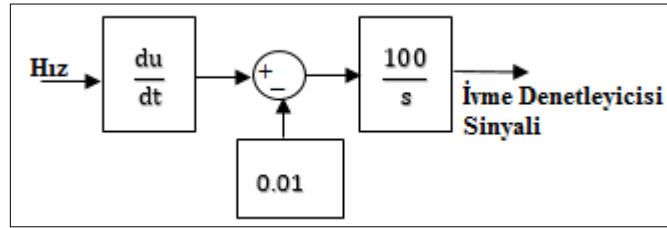


Şekil 3. 2 Hız denetleyicisine ait blok diyagramı [17,21]

3.1.2 İvme Kontrolü

İvme kontrolü türbinin ilk çalışması esnasında çalışma hızına ulaşmadan önce rotor hızını sınırlamak için kullanılmaktadır. İvme kontrolü, mikrotürbinin hız artışı sırasında ve

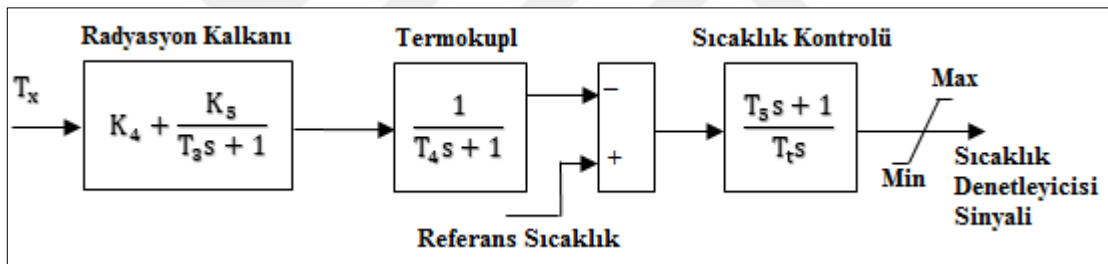
mikrotürbin hız aşımına uğraması durumunda aktiftir. Eğer mikrotürbinin çalışma hızı, nominal hıza yakınsa ivme kontrolü mikrotürbin modellenirken ihmal edilebilir.



Şekil 3. 3 İvme denetleyicisine ait blok diyagramı [17,21]

3.1.3 Sıcaklık Kontrolü

Sıcaklık kontrolü mikrotürbin üretim sisteminin çıkış gücünü önceden belirlenmiş bir ateşleme sıcaklığında sınırlamak amacıyla kullanılmaktadır. Sıcaklık denetleyicisine ait blok diyagramı Şekil 3.4'de gösterildiği gibidir. Sıcaklık denetleyicisinin girişinde egzoz sıcaklığı (T_x), çıkışında ise bir sıcaklık kontrol sinyali bulunmaktadır.



Şekil 3. 4 Sıcaklık denetleyicisine ait blok diyagramı [17,21]

Sıcaklık radyasyon kalkanı aracılığıyla termokupla aktarılır. Radyasyon kalkanına ait transfer fonksiyonu,

$$RK = K_4 + \frac{K_5}{T_3s + 1} \quad (3.2)$$

ile ifade edilir.

Termokupla ait transfer fonksiyonu ise,

$$TK = \frac{1}{T_4s + 1} \quad (3.3)$$

şeklinde gösterilir.

Termokupl çıkışı referans bir sıcaklıkla karşılaştırılır. Türbin sıcaklığı istenilen bir referans değer ile karşılaştırılır ve bir sıcaklık PI denetleyicisi tarafından kontrol edilir.

Denetleyiciye ait transfer fonksiyonu,

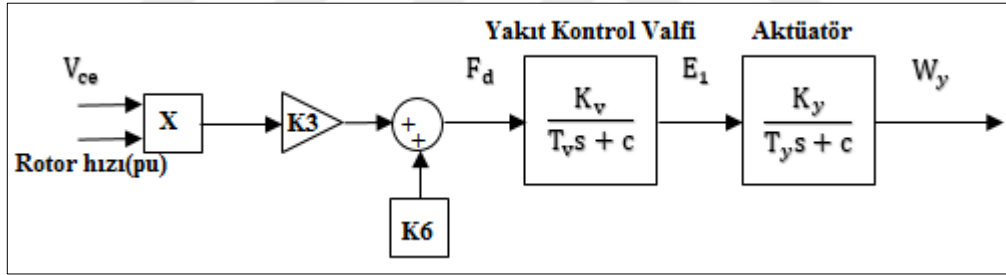
$$T_{\text{kontrol}} = \frac{T_5 s + 1}{T_t s} \quad (3.4)$$

ile gösterilir.

Eşitlik (3.2), (3.3) ve (3.4)' de geçen parametrelerden T_t ; sıcaklık denetleyicisi entegrasyon oranı, T_3 ve T_4 ise sırasıyla radyasyon kalkanı ve termokupl ile ilişkili zaman sabitleridir. K_4 ve K_5 radyasyon kalkanı ile ilişkili sabitlerdir ve T_5 ise sıcaklık denetleyicisi ile ilişkili bir sabittir.

3.1.4 Yakıt Sistemi Kontrolü

Mikrotürbin üretim sistemindeki yakıt sistemi yakıt kontrol valfi ve aktüatörden oluşmaktadır. Yakıt sistemine ait blok diyagramı Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Blok diyagramında görülmekte olan V_{ce} (p.u.) değeri, doğrudan kararlı haldeki türbinin mekanik gücünün birim başına değerine (p.u.) karşılık gelmektedir ve bu değer ilk önce K_3 kazancı ile ölçeklendirilir daha sonra yüksüz nominal devirdeki minimum yakıt akışı miktarı olan K_6 kazancı ile dengelenmektedir.



Şekil 3. 5 Yakıt sistemine ait blok diyagramı [17,21]

Yakıt kontrol valfine ait transfer fonksiyonu,

$$E_1 = \frac{K_v}{T_v s + c} F_d \quad (3.5)$$

şeklindedir.

Aktüatöre ait transfer fonksiyonu ise,

$$W_y = \frac{K_y}{T_y s + c} E_1 \quad (3.6)$$

ile ifade edilir.

Burada, K_v ve K_y sırasıyla yakıt kontrol valfi ve aktüatör kazancı, T_v ve T_y sırasıyla yakıt kontrol valfi ve aktüatör zaman sabiti, c bir sabit, F_d yakıt kontrol valfinin girişi, E_1 ise yakıt kontrol valfinin çıkışıdır, W_y ise p.u. cinsinden yakıt talep sinyalidir.

3.1.5 Kompresör-Türbin

Bu blokta mekanik güç üretilmektedir. Türbin ve kompresör aynı shaft üzerinde bulunmaktadır. Bu alt sistemin girişi yakıt talep sinyali (W_y) ve çıkışları ise türbin torku ve egzoz sıcaklığıdır. Bu alt sistemde yanma tepkimesi süresi ile ilişkili küçük bir taşıma gecikme süresi T_{YT} , kompresör deşarj hacmi ile ilişkili gecikme süresi T_{KD} ve yanma sisteminden türbine gaz taşınması için bir taşıma gecikme süresi T_{TG} gibi zaman sabitleri kullanılmaktadır.

Türbin dinamiği Eşitlik (3.7) ile verilen transfer fonksiyonuyla modellenmiştir.

$$W_{y2} = \frac{1}{T_{KD}s+1} W_y \quad (3.7)$$

Jeneratörü çalıştırmak için üretilen mekanik tork aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\text{Tork} = K_{ÜID} (W_{y2} - 0.23) + 0.5(1 - N) \text{ (Nm)} \quad (3.8)$$

Bu denklemde kullanılan $K_{ÜID}$, yanma odasındaki gaz akımının entalpisi veya üst ısı değerine bağlı bir katsayıdır, N ise p.u. cinsinden türbin rotor hızıdır. Ayrıca türbin hızı ve yakıt akışı, mekanik torkun üretilmesi amacıyla kullanılan giriş sinyalleridir ve tek shaftlı gaz türbininin torku, yakıt akışı ve türbin hızı ile doğrusal olarak değişmektedir.

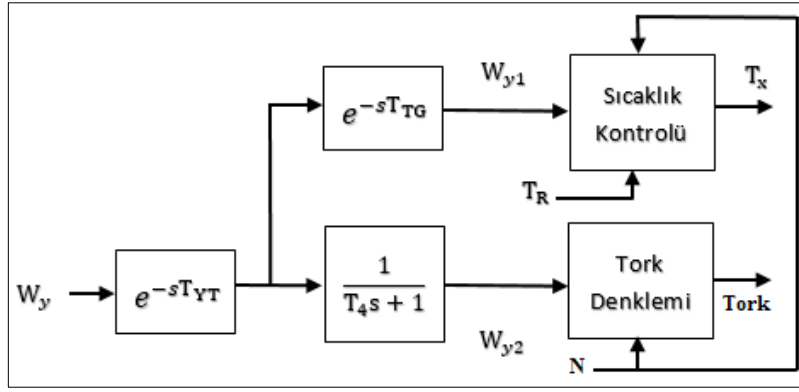
Mikrotürbin sıcaklık kontrolü amacıyla, türbin sıcaklığı Eşitlik (3.9) ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Türbin sıcaklığı} = T_x = T_R - 700(1 - W_{y1}) + 550(1 - N) \text{ (F)} \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte kullanılan T_R referans sıcaklıktır, W_{y1} ise türbin-egzoz sistemi gecikmesini ifade eden bir fonksiyondur ve şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$W_{y1} = e^{-sT_{TG}} \quad (3.10)$$

Bu ünitenin blok diyagramı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 6 Kompresör-türbin sistemine ait blok diyagramı [17,21]

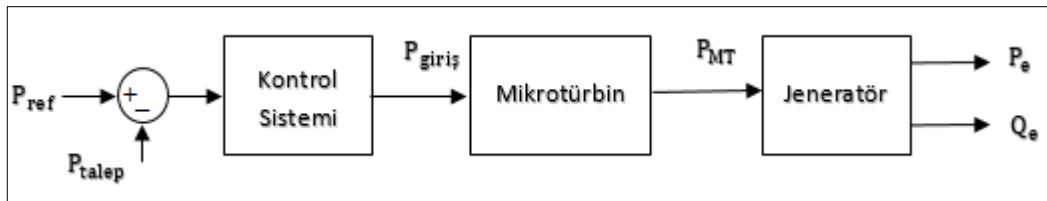
3.2 Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modeli

Bu model, 250 kW nominal gücünde bir ayrık şaftlı mikrotürbin ve 200 kVA nominal gücünde bir senkron makineden oluşmaktadır. Mikrotürbin modeli olarak mikrotürbin üretim sistemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan GAST modeli baz alınmıştır. Mikrotürbin modeli hız ve güç kontrol bloklarından oluşmaktadır.

Bu modelde aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir.

- Sistem normal çalışma durumunda çalışmaktadır. Kalkış, kapanma, dahili arızalar ve güç kaybı gibi hızlı dinamikler modele dahil edilmemiştir.
- Mikrotürbinin elektromekanik davranışı modellenin ana amacıdır. Geri kazanım ünitesinin sadece motor verimliliği üzerine etkisi olmasından dolayı modele dahil edilmemiştir.
- Sıcaklık ve ivme kontrolü normal çalışma durumlarına bir etkileri olmamasından dolayı modele dahil edilmemişlerdir.
- Model herhangi bir regülatör içermemektedir.

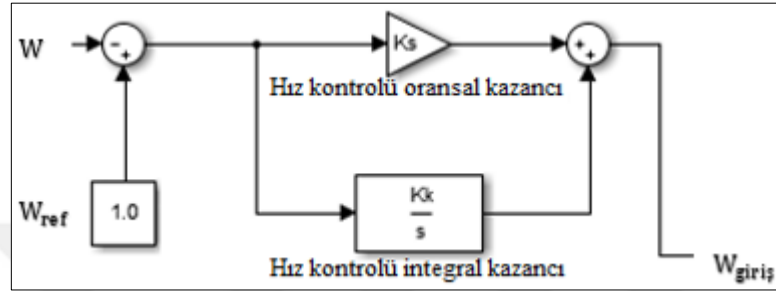
Yük takip analizi için basitleştirilmiş bir blok diyagramı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



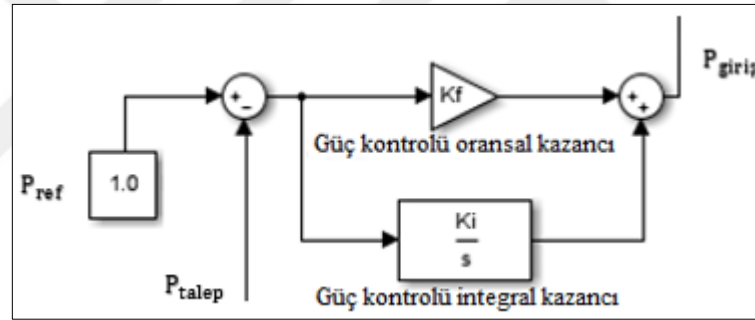
Şekil 3. 7 Ayrık şaftlı mikrotürbin modeli temel yapısı [18]

Şekil 3.7'de bulunan blok diyagramında P_{talep} talep gücü, P_{ref} ise referans gücü ifade etmektedir. Kontrol sistemi tarafından üretilen güç kontrol parametresi mikrotürbine uygulanmaktadır.

Model üzerinde kullanılan hız ve güç kontrol sistemleri PI denetleyici kullanılarak sağlanmaktadır. Hız ve güç kontrol sistem modelleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 8 Hız kontrol sistemi modeli



Şekil 3. 9 Güç kontrol sistemi modeli

Hız ve güç kontrol sistem modellerinde kullanılan parametrelerden K_s ve K_f , PI denetleyicilerin oransal kazanç değerlerini, K_k ve K_i ise PI denetleyicilerin integral kazanç değerlerini belirtmektedir.

Türbin için basit ve yaygın olması sebebiyle Şekil 3.10'da gösterildiği üzere GAST modeli kullanılmıştır.

MİKROTÜRBİN ÜRETİM SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Bu bölümde ilk önce farklı kontrol denetleyicileri ile gerçekleştirilen ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbin üretim sistemlerinde kullanılan parametreler verilmiştir. Gerçekleştirilen ada modu ve şebeke bağlantı modu simülasyon çalışmaları ile daha sonra her iki modelin farklı yük koşullarında elektriksel güç çıkışları, yakıt tüketimleri, yakıt maliyetleri incelenip karşılaştırılmıştır. Simülasyon Matlab/Simulink platformunda gerçekleştirilmiştir.

4.1 Tek Şaftlı ve Ayırık Şaftlı Mikrotürbin Modellerinde Kullanılan Parametreler

Tek şaftlı mikrotürbin modelinin parametreleri Çizelge 4.1’ de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4. 1 Tek şaftlı mikrotürbin modeli parametreleri [20-24]

Hız Denetleyicisi
$K=25; T_1=0.4; T_2=0.05; Z=1.$
Sıcaklık Denetleyicisi
$K_4=0.8; K_5=0.2; T_3=15; T_4=2.5; T_5=3.3; T_t=0.5.$
Yakıt Sistemi
$K_3=0.77; K_6=0.23; K_v=1; T_v=0.05; K_y=1; T_y=0.4.$
Kompresör- Türbin
$T_{KD}=0.2; K_{ÜD}=1.3; T_R=950\text{ °F}; T_{YT}=0.05; T_{TG}=1.$

Ayrık şaftlı mikrotürbin modelinin parametreleri Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Ayrık şaftlı mikrotürbin modeli parametreleri [25,26]

PARAMETRELER	DEĞERLER
Nominal güç (P_{NomMT})	250 kW
Etkin güç referansı (P_{ref})	1.0 p.u.
Türbinin sönümlenmesi ($D_{türbin}$)	0.03
Yakıt sistemi gecikme sabiti (T_1)	10.0 s
Yakıt sistemi gecikme sabiti (T_2)	0.1 s
Sınır yük zaman sabiti (T_3)	3.0 s
Sınır yük (L_{max})	1.2
Maximum değer (V_{max})	1.2
Minimum değer (V_{min})	-0.1
Sıcaklık kontrolü döngü kazancı (K_T)	1.0
Güç kontrolü oransal kazanç (K_F)	0.1
Güç kontrolü integral kazanç (K_i)	1.0
Hız kontrolü oransal kazanç (K_S)	1000
Hız kontrolü integral kazanç (K_k)	12.5
Hız referansı (w_{ref})	1.0 p.u.

Ayrık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbin üretim sistemi modellerinin simülasyonunda senkron jeneratör modeli olarak Matlab/Simulink'te SimPowerSystems kütüphanesinde hazır olarak bulunan basit senkron jeneratör bloğu kullanılmıştır. Her iki model için farklı güçlerde senkron makine kullanılmıştır. Kullanılan senkron makinenin güç dışındaki diğer tüm parametreleri her iki modelde de aynıdır. Senkron makinenin parametreleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Senkron makine parametreleri [25,26]

PARAMETRELER	DEĞERLER
Nominal güç (P_{NomSJ})	500 kVA (Tek Şaftlı MT modeli için) 200 kVA (Ayrık Şaftlı MT modeli için)
Fazlar arası nominal gerilim (V_{rated})	440 V
Frekans (F)	60 Hz
Eylemsizlik sabiti (H)	0.822 s
Sönümlenme faktörü (K_D)	60 p.u.
Kutup sayısı (P)	2
İç direnç (R)	0.02 p.u.
İç reaktans (X)	0.3 p.u.

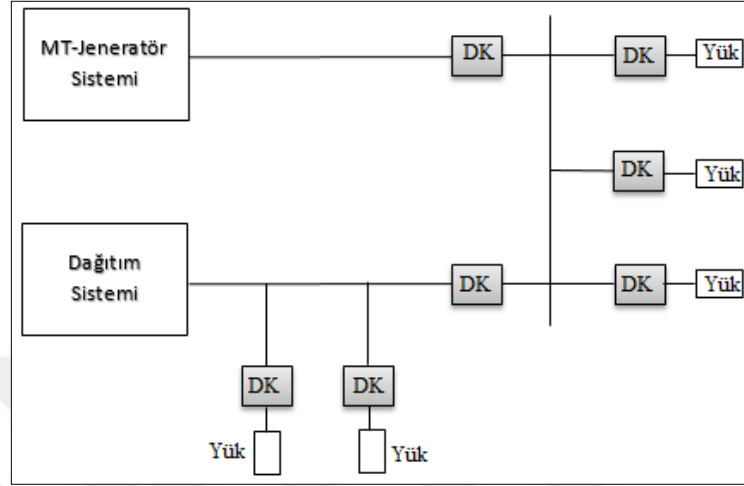
Her iki modelin şebeke ile bağlantısı yapılması durumunda dağıtım şebekesi olarak 11 kV'luk 500 kVA kısa devre gücünde basit bir RL eşdeğer kaynak ve 200 kVA gücünde, üçgen-yıldız sargılı 11 kV/440 V transformatör kullanılmıştır. Dağıtım şebekesi parametreleri Çizelge 4.4'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4. 4 Dağıtım şebekesi parametreleri [25,26]

PARAMETRELER	DEĞERLER
3 fazlı kaynak base gerilimi	11 kV
3 fazlı kaynak kısa devre seviyesi	500 kVA
3 fazlı kaynak X/R oranı	6
Dağıtım trafosu nominal gücü	200 kVA
Frekans	60 Hz
Dağıtım trafosu primer gerilimi	11 kV
Dağıtım trafosu sekonder gerilimi	440 V

Mikrotürbin üretim sistemi simülasyonları Şekil 3.11'de gösterilen sistem konfigürasyonuna göre gerçekleştirilmiştir. Mikrotürbin herhangi bir dağıtım şebekesine

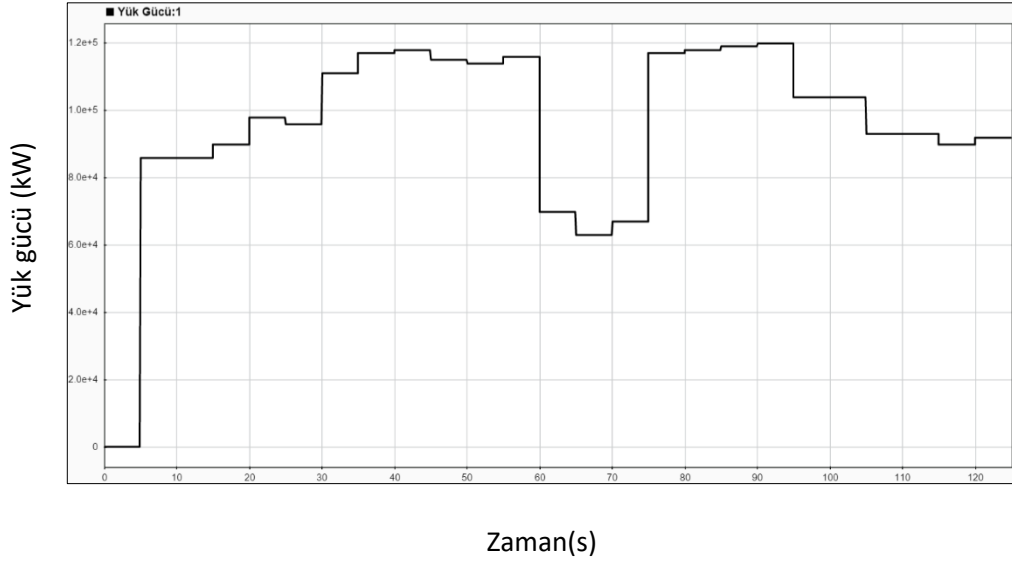
bağlı olmadan kendi yüklerini besleyebilmektedir. Aynı şekilde dağıtım şebekesi de kendi yüklerini ayrı ayrı besleyebilmektedir. Mikrotürbin üretim sistemi ile dağıtım şebekesi arasında bir devre kesici kapatılıp açılarak mikrotürbin üretim sistemi dağıtım şebekesine bağlanabilmekte ya da ayrılabilir.



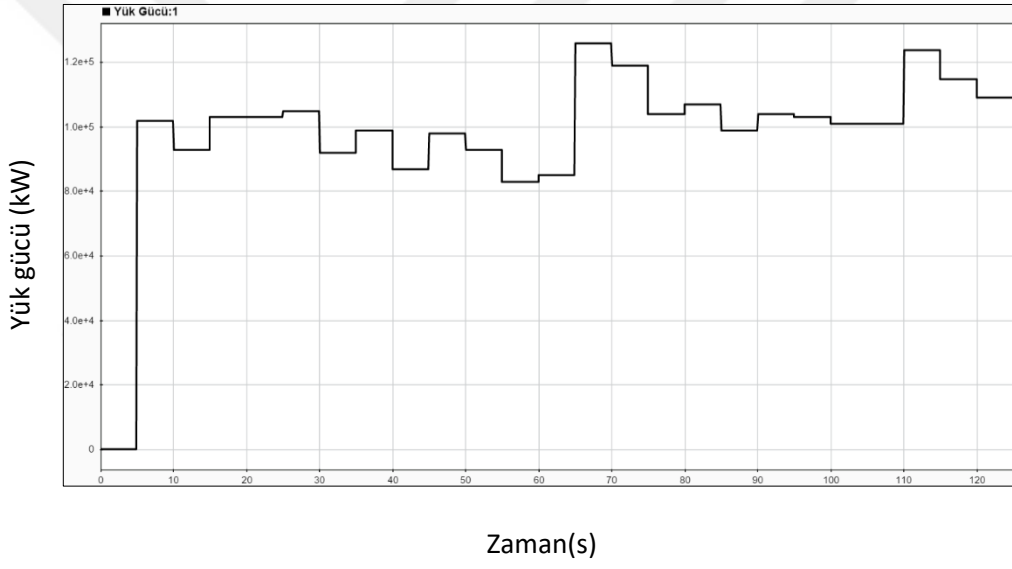
Şekil 4. 1 Mikrotürbin üretim sistemi-dağıtım şebekesi blok diyagramı [18]

4.2 Ada Çalışma Modu

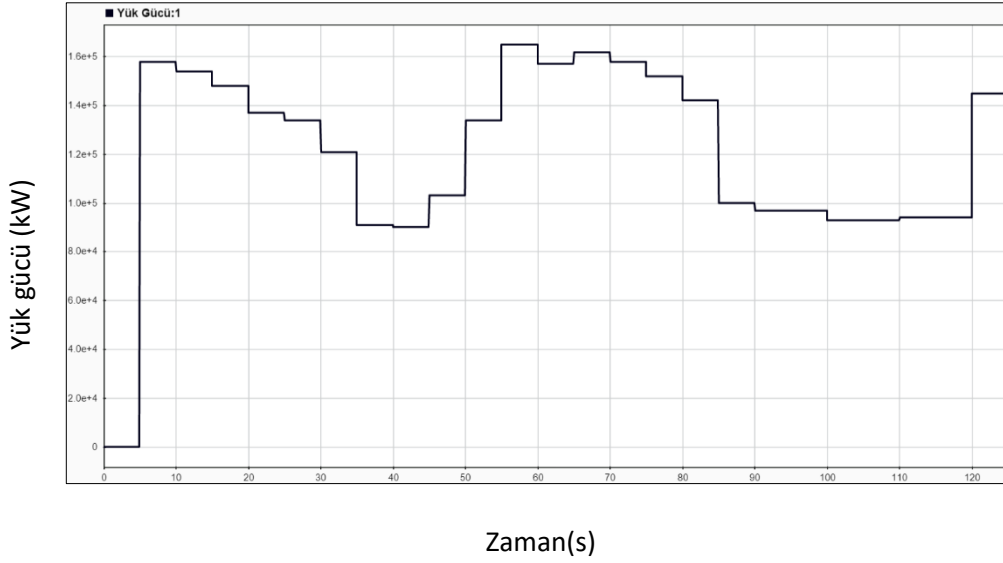
Ada çalışma modunda amaç her iki modelinde herhangi bir şebekeye bağlı olmadan kendi yüklerini besleyebilmesidir. Bu modda yük profili, gerçek bir meskenin saatlik elektrik tüketim değerleri baz alınarak oluşturulmuştur. Çalışmada bu meskene eşdeğer 20 meskenden oluşan bir sitenin elektriksel güç ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Temmuz, Nisan ve Ocak aylarından bir gün belirlenerek belirlenen günlerdeki saatlik elektrik tüketim değerleri ada modundaki modellere yük olarak uygulanmıştır. Sırasıyla Temmuz, Nisan ve Ocak aylarına ait yük profili Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'deki gibidir.



Şekil 4. 2 Temmuz ayına ait yük profili



Şekil 4. 3 Nisan ayına ait yük profili

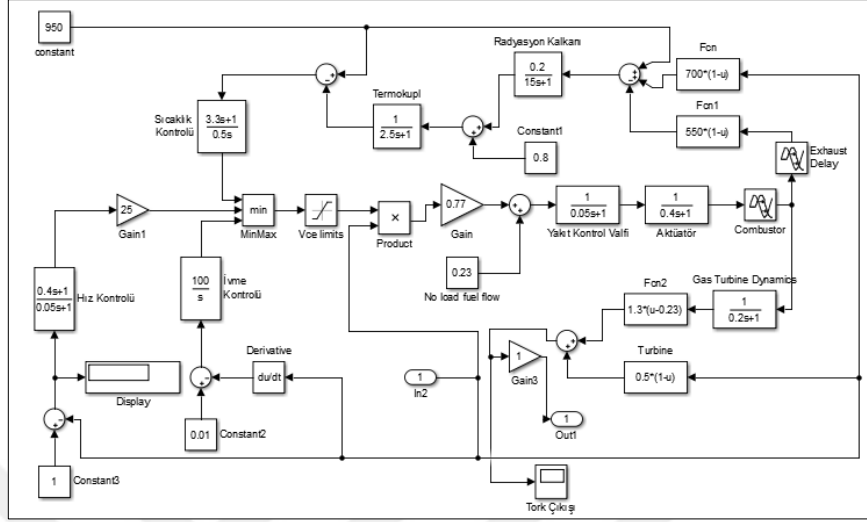


Şekil 4. 4 Ocak ayına ait yük profili

Modellerde mikrotürbin üretim sistemi ilk olarak yüksüz olarak çalıştırılmış, daha sonra 5. saniye itibari ile yük uygulanmaya başlanmış ve 5'er saniye aralıklara 120. saniyeye kadar yükler sistemlere uygulanmıştır. Böylece, üç farklı yük profiline göre ayrıık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbin üretim sistemlerinin ada modunda saatlik yük takip performansları gözlemlenmiştir. Ayrıca, üç farklı yük profiline göre, elektriksel güç çıkışı, mekaniksel güç çıkışı, mikrotürbin-jeneratör rotor hızı, mikrotürbin yakıt tüketimi ve yakıt maliyeti değişimleri karşılaştırılmıştır.

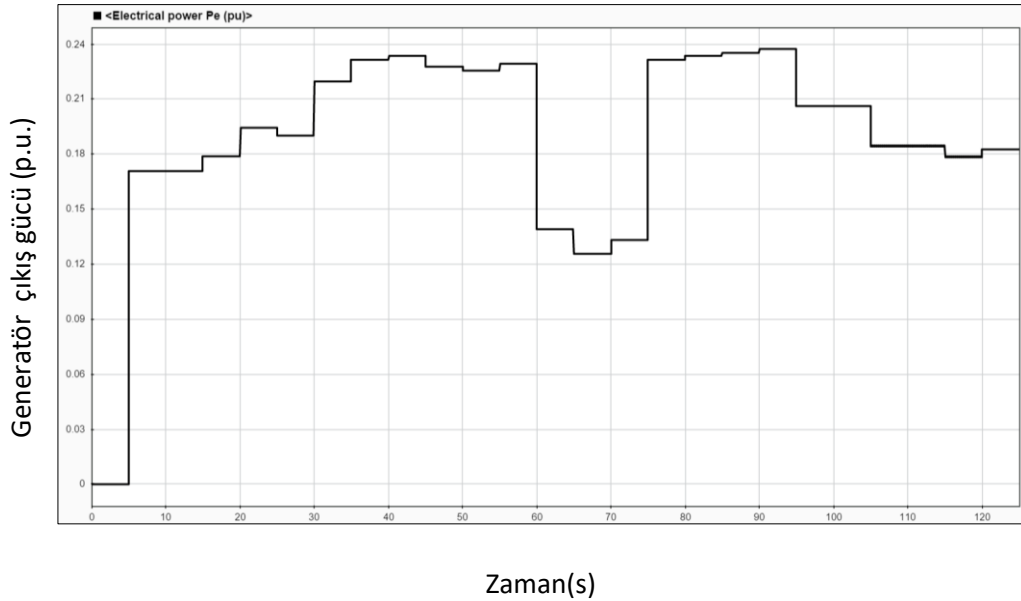
4.2.1 Tek Şaftlı Mikrotürbin Modelinin Simülasyon Sonuçları

Matlab/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen tek şaftlı mikrotürbin modeli Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

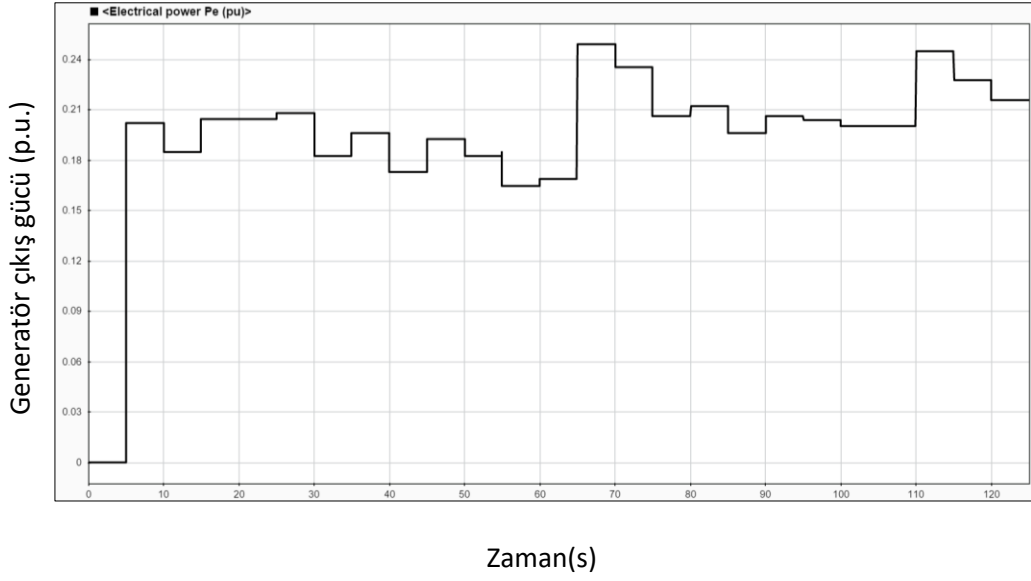


Şekil 4. 5 Matlab/ Simulink’te gerçekleştirilen tek şaftlı mikrotürbin modeli

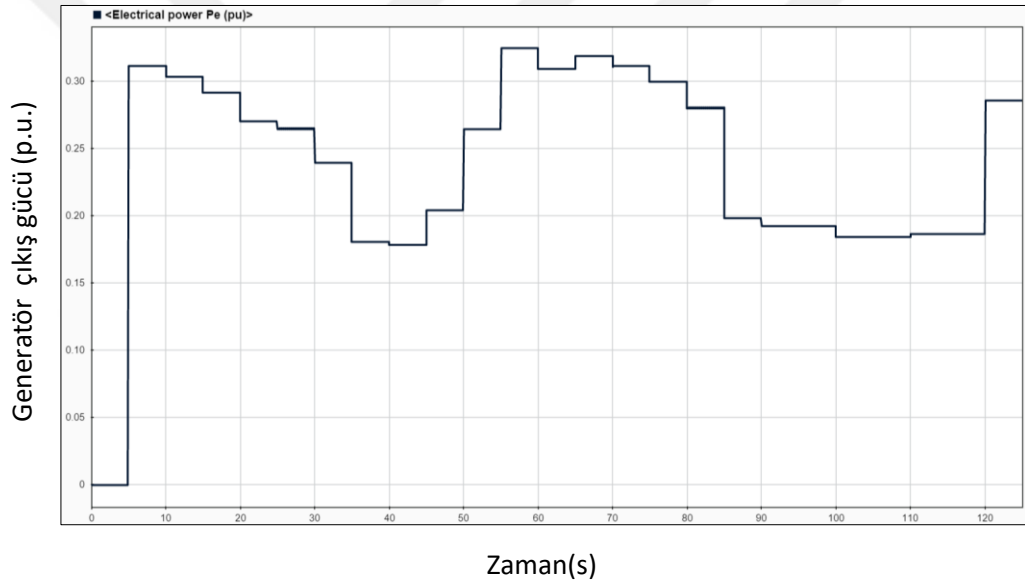
Hız, ivme ve sıcaklık kontrol denetleyicileri ile kompresör-türbin ve yakıt sisteminden oluşan modelin sitenin Temmuz, Nisan ve Ocak aylarındaki yük profiline göre jeneratör çıkış güçleri (p.u. olarak) sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7, ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Elde edilen grafiklere göre yüklerin devreye girdiği ve tek şaftlı mikrotürbinin bu yükleri besleyebildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4. 6 Temmuz ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS’nin jeneratör çıkış gücü

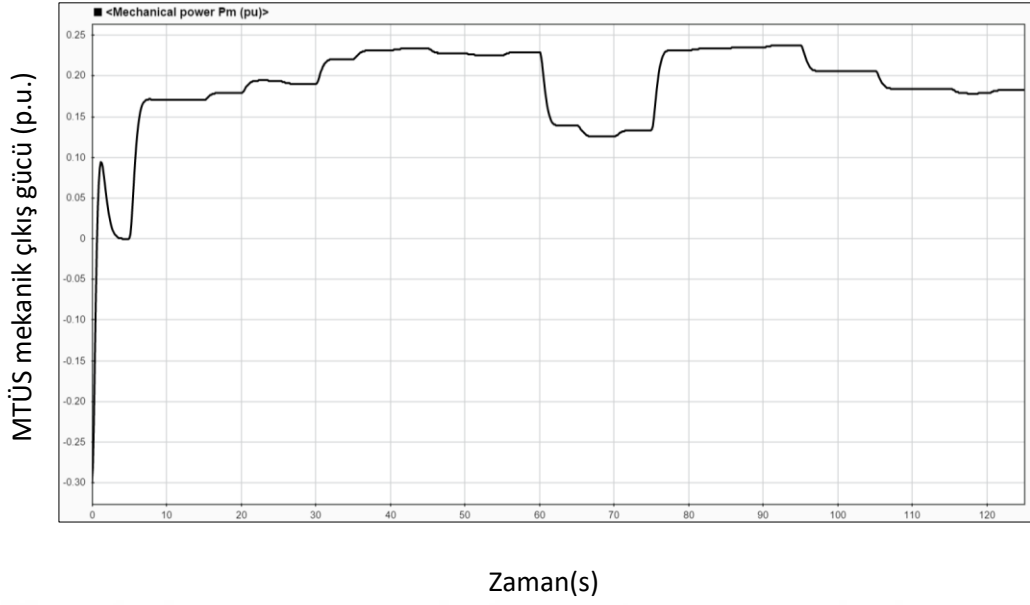


Şekil 4. 7 Nisan ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü

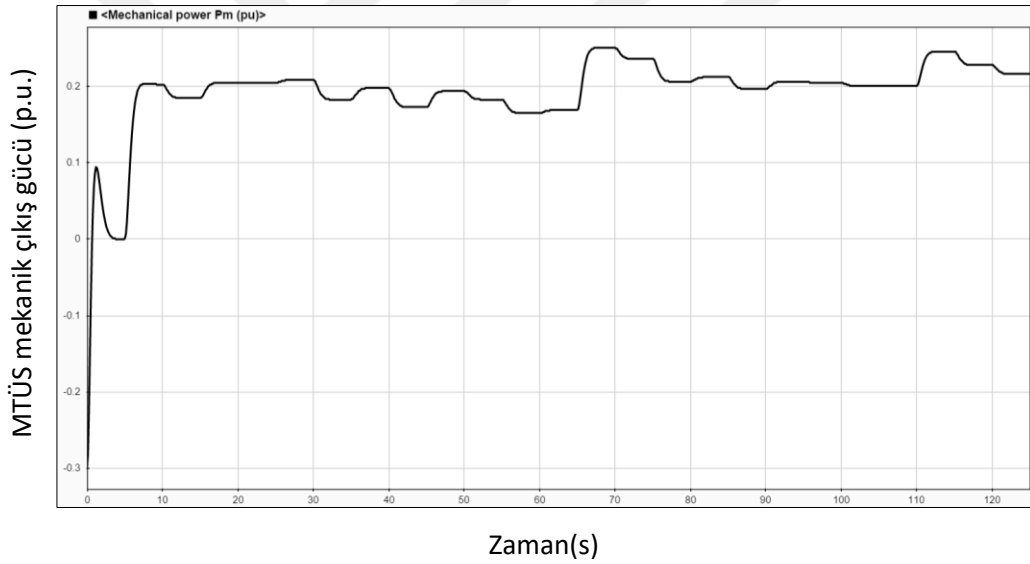


Şekil 4. 8 Ocak ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü

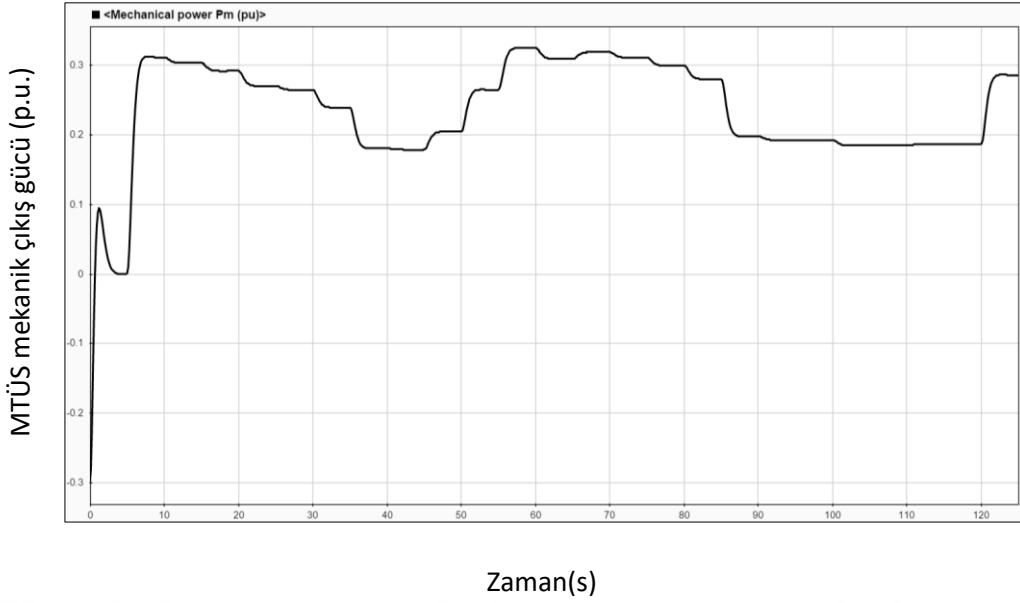
Temmuz, Nisan ve Ocak aylarındaki yük profiline göre mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç çıkışları (p.u. olarak) sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10, ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Jeneratöre aktarılan mekanik güç, jeneratörün karşıladığı yük talep gücünü belirli bir gecikme ile takip etmektedir.



Şekil 4. 9 Temmuz ayı yük profiline göre tek shaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç

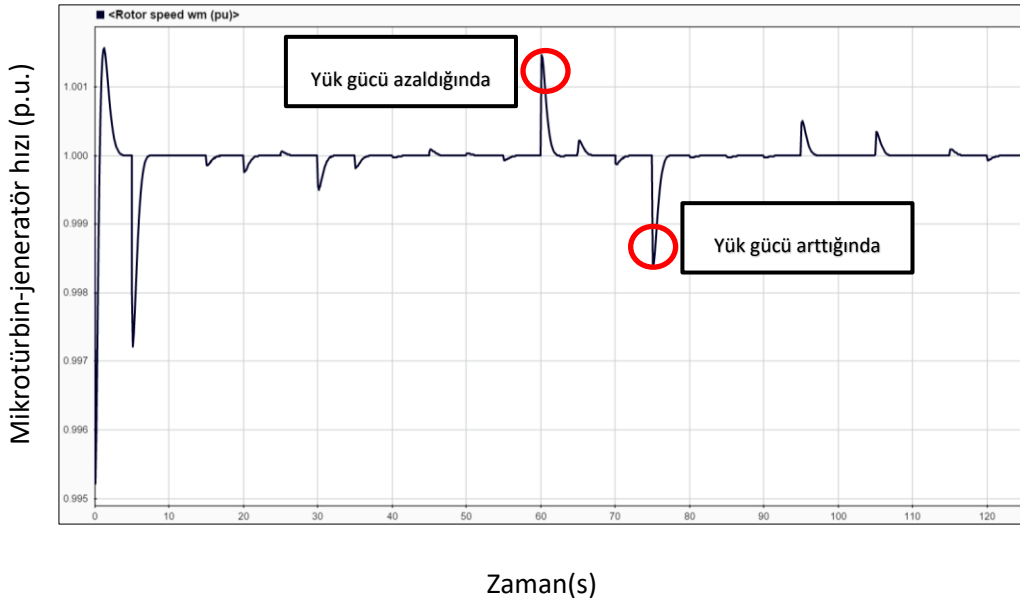


Şekil 4. 10 Nisan ayı yük profiline göre tek shaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç

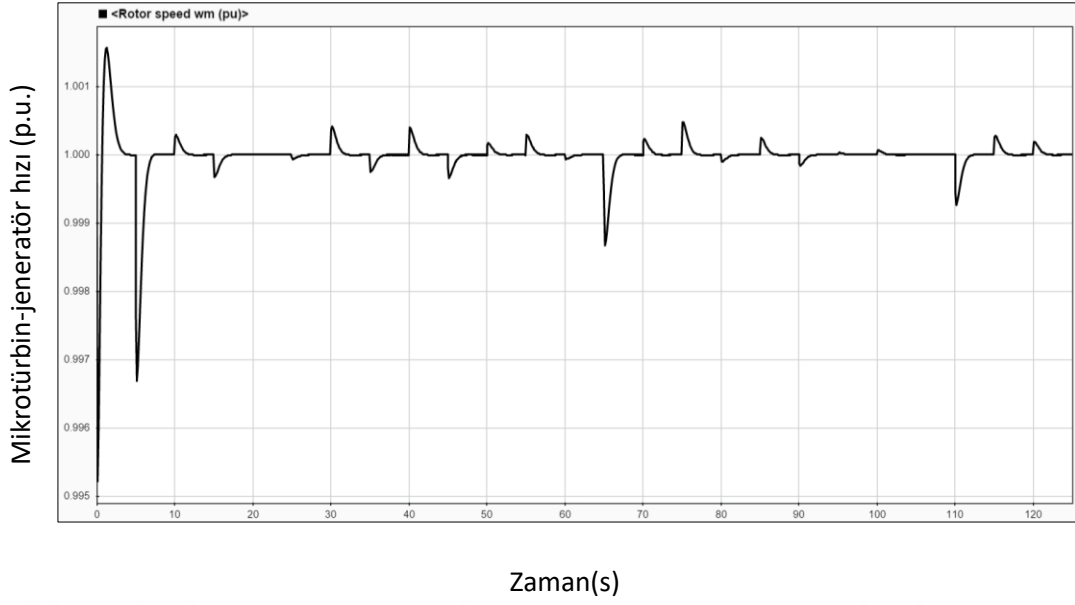


Şekil 4. 11 Ocak ayı yük profiline göre tek shaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç

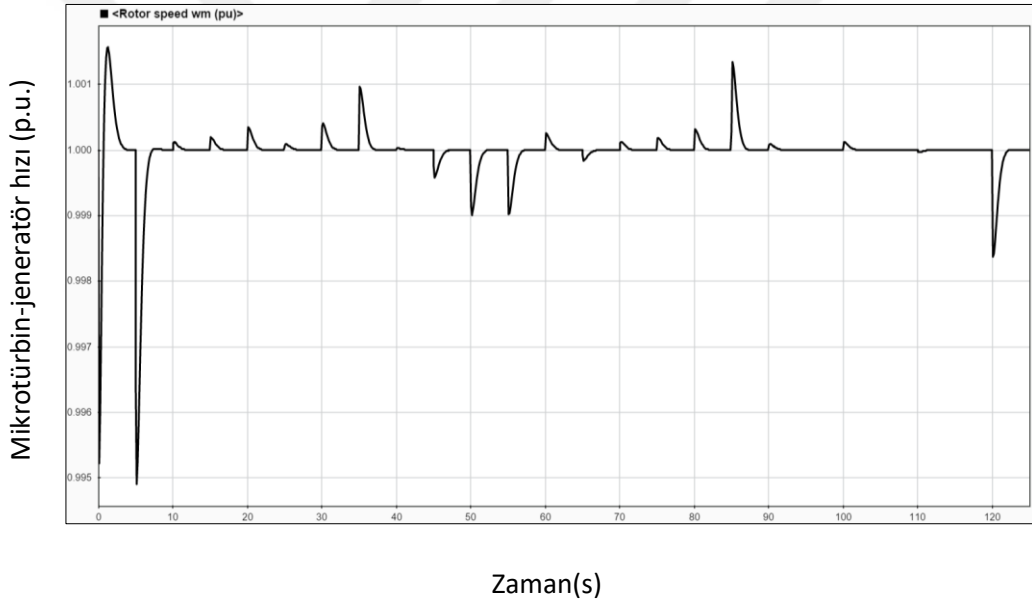
Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de aylara göre mikrotürbin-jeneratör hız değişimleri görülmektedir. Mikrotürbin-jeneratör hızında anlık yük taleplerinde ani olarak değişimler olmuştur ancak kararlı durumlarda istenilen hız değerini sürdürmüştür. Mikrotürbin-jeneratör hızı; yük gücünün artması durumunda ani olarak azalmış, yük gücünün azalması durumunda ise ani olarak artmıştır. Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’ten de görüleceği üzere kararlı durumlarda mikrotürbin-jeneratör hızı 1 p.u. olarak hız değerini korumaktadır.



Şekil 4. 12 Temmuz ayı yük profiline göre tek shaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı



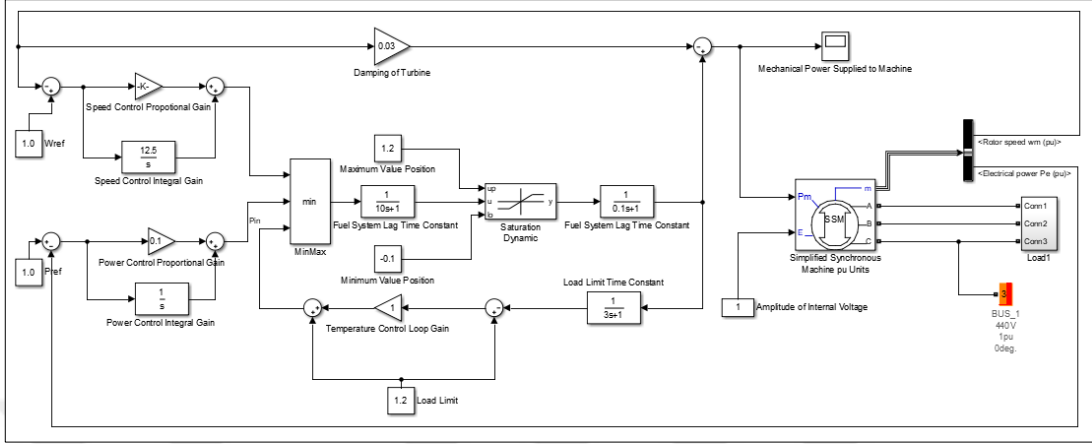
Şekil 4. 13 Nisan ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı



Şekil 4. 14 Ocak ayı yük profiline göre tek şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı

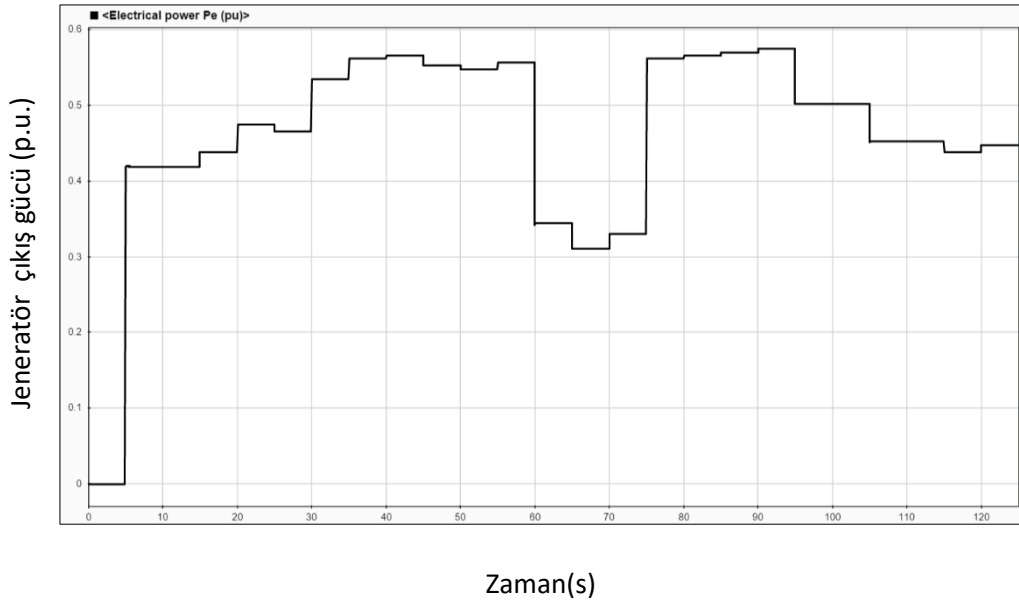
4.2.2 Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modelinin Simülasyon Sonuçları

Matlab/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen ayrıık şaftlı mikrotürbin modeli Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

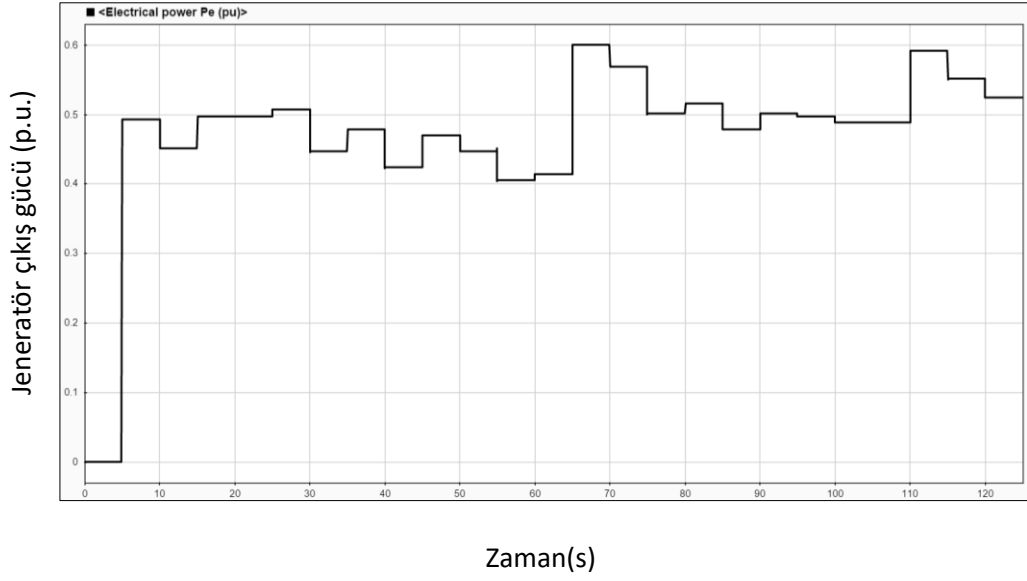


Şekil 4. 15 Matlab/ Simulink'te gerçekleştirilen tek şaftlı mikrotürbin modeli

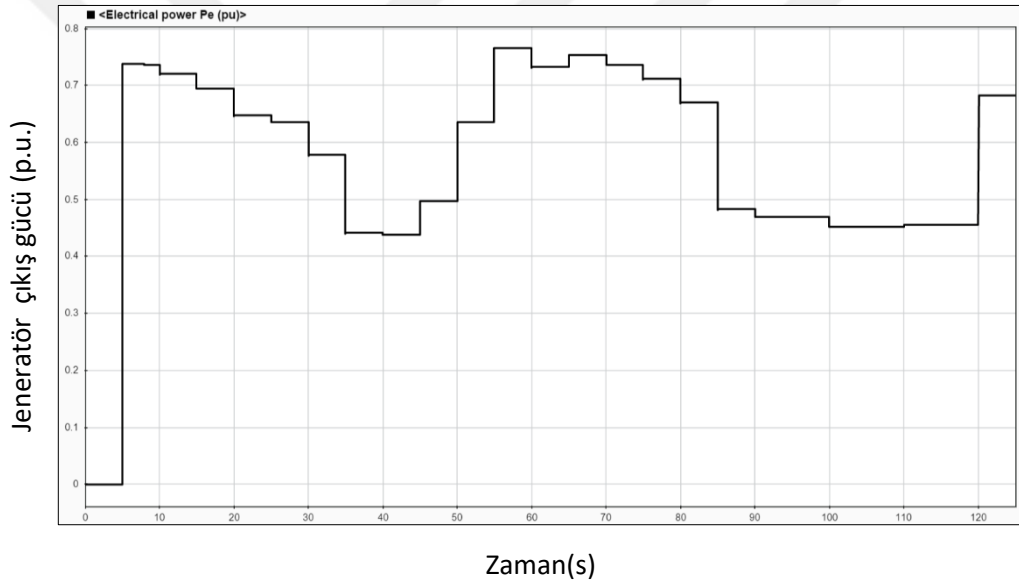
Hız ve güç kontrol denetleyicilerinden oluşan modelin sitenin Temmuz, Nisan ve Ocak aylarındaki yük profiline göre jeneratör çıkış güçleri sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17, ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Elde edilen grafiklere göre yüklerin devreye girdiği tıpkı tek şaftlı mikrotürbin gibi ayrıık şaftlı mikrotürbinin bu yükleri besleyebildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4. 16 Temmuz ayı yük profiline göre ayrıık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü

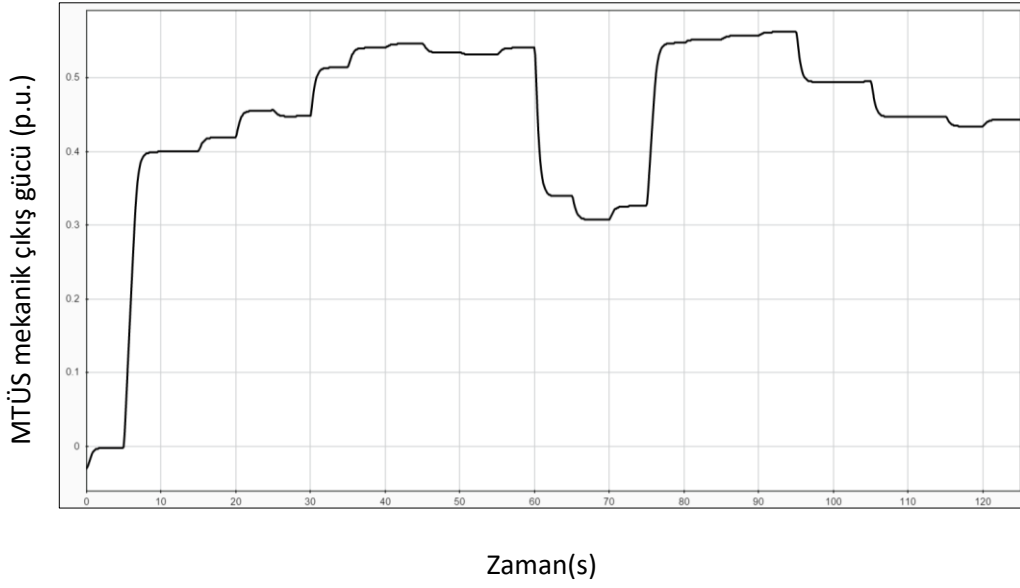


Şekil 4. 17 Nisan ayı yük profiline göre ayrıklı şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü

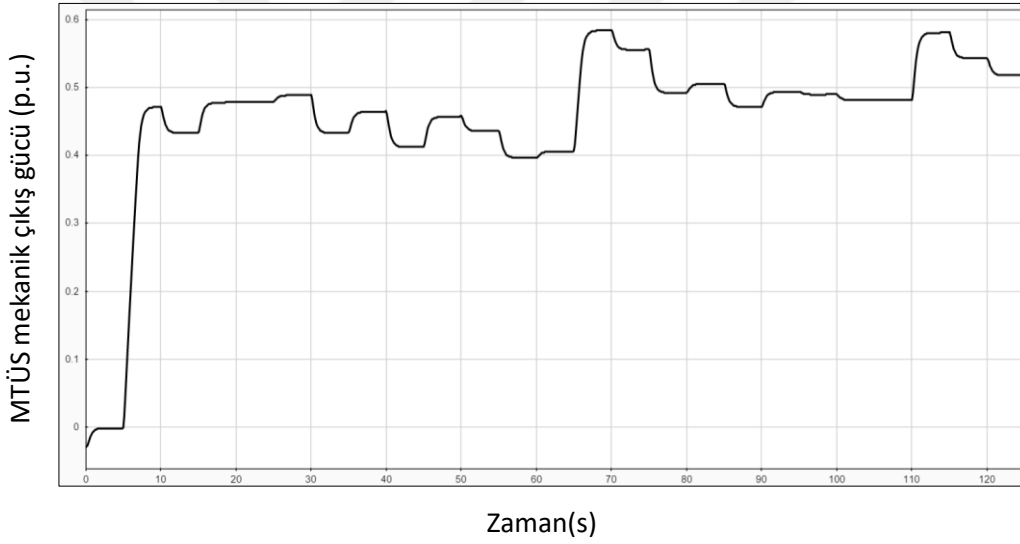


Şekil 4. 18 Ocak ayı yük profiline göre ayrıklı şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü

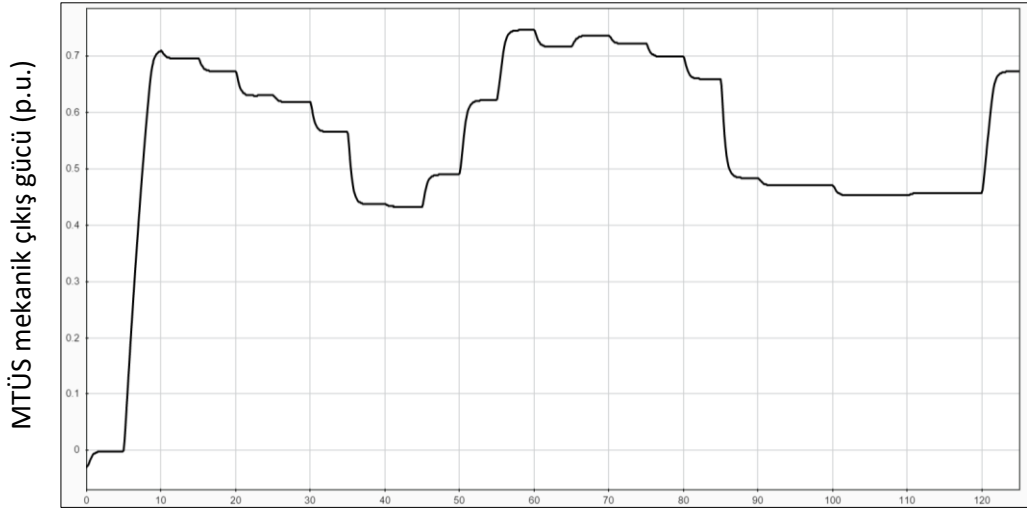
Mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç çıkışları (p.u. olarak) Şekil 4.19, Şekil 4.20, ve Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Tek şaftlı modelde olduğu gibi jeneratöre aktarılan mekanik güç, jeneratörün karşıladığı yük talep gücünü belirli bir gecikme ile takip etmektedir.



Şekil 4. 19 Temmuz ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç



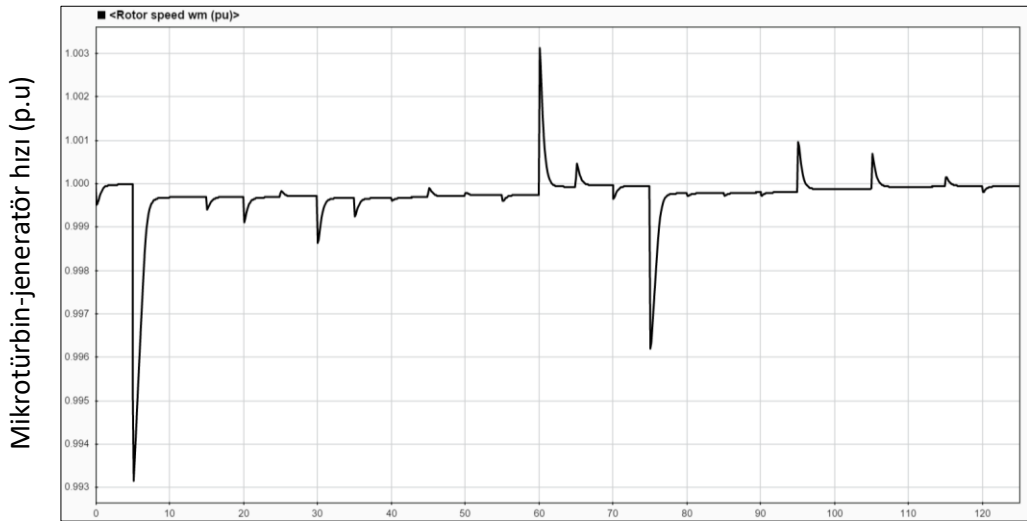
Şekil 4. 20 Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç



Zaman(s)

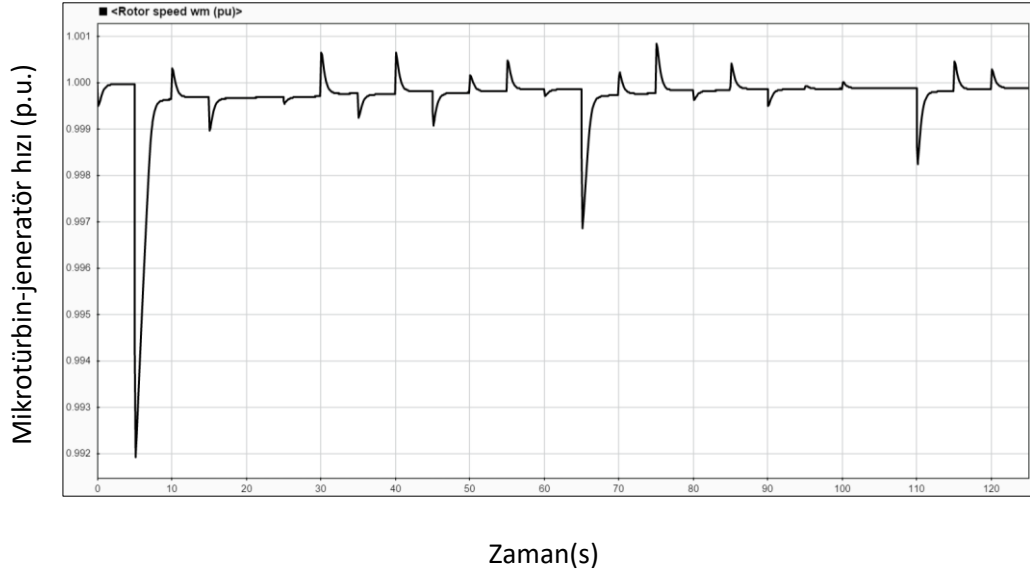
Şekil 4. 21 Ocak ayı yük profiline göre ayrıklı şaftlı mikrotürbinden jeneratöre aktarılan mekanik güç

Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de aylara göre mikrotürbin-jeneratör hız değışimleri görölmektedir. Mikrotürbin-jeneratör hızı; tek şaftlı modelde olduğu gibi yük gücünün artması durumunda ani olarak azalmış, yük gücünün azalması durumunda ise ani olarak artmıştır. Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelendiğinde tek şaftlı modelden farklı olarak kararlı durumlarda mikrotürbin-jeneratör hızı, 1 p.u. değerinden daha düşük bir değerde hız değeri korumaktadır.

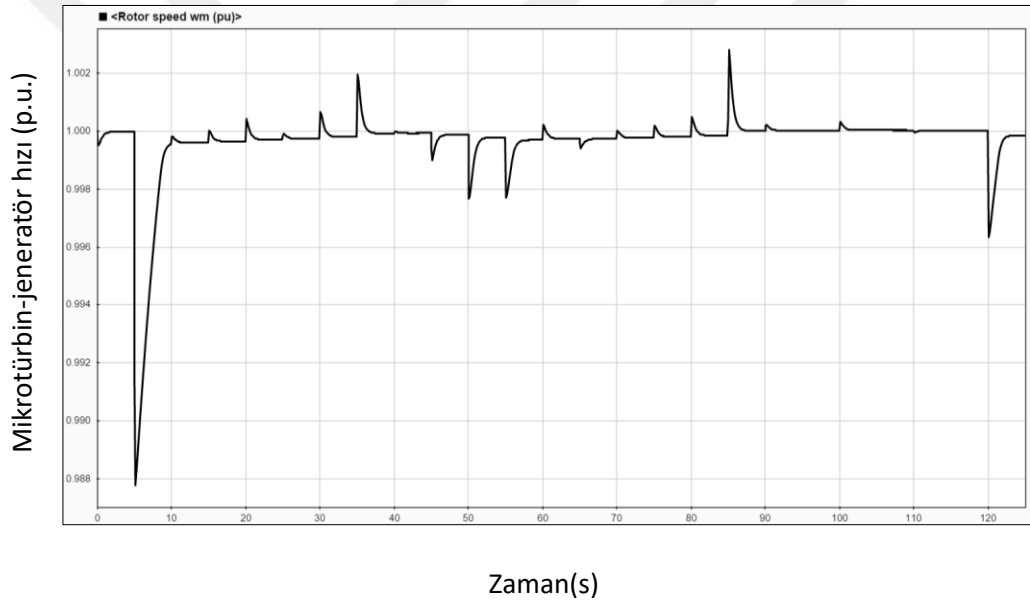


Zaman(s)

Şekil 4. 22 Temmuz ayı yük profiline göre ayrıklı şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı



Şekil 4. 23 Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı



Şekil 4. 24 Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı mikrotürbin-jeneratör rotor hızı

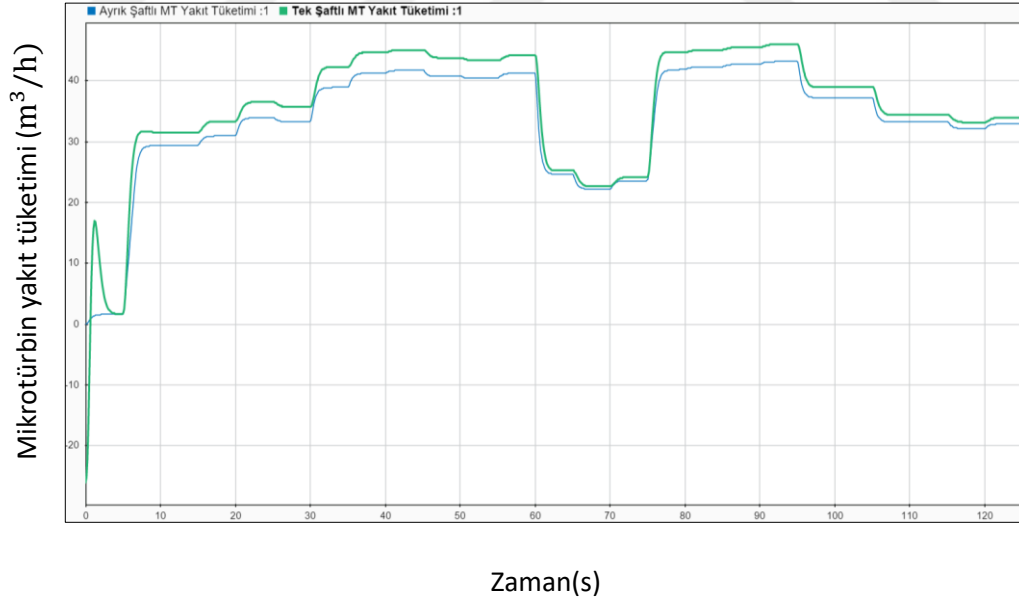
4.2.3 Tek Şaftlı ve Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modellerinin Yakıt Tüketimi ve Yakıt Maliyeti Açısından Karşılaştırılması

MTÜ sistemlerinin ada çalışma ve şebekeye bağlı çalışma durumlarında mikrotürbinin yakıt tüketimi ve yakıt maliyeti, çıkış gücüne bağlı olarak değişmektedir. Mikrotürbinin doğalgaz yakıt akışı tüketimini (m^3/h) ve özgül yakıt maliyetini (TL/h) hesaplamak için sırasıyla Eşitlik (4.1) ve Eşitlik (4.2)'den faydalanılmıştır [36,52].

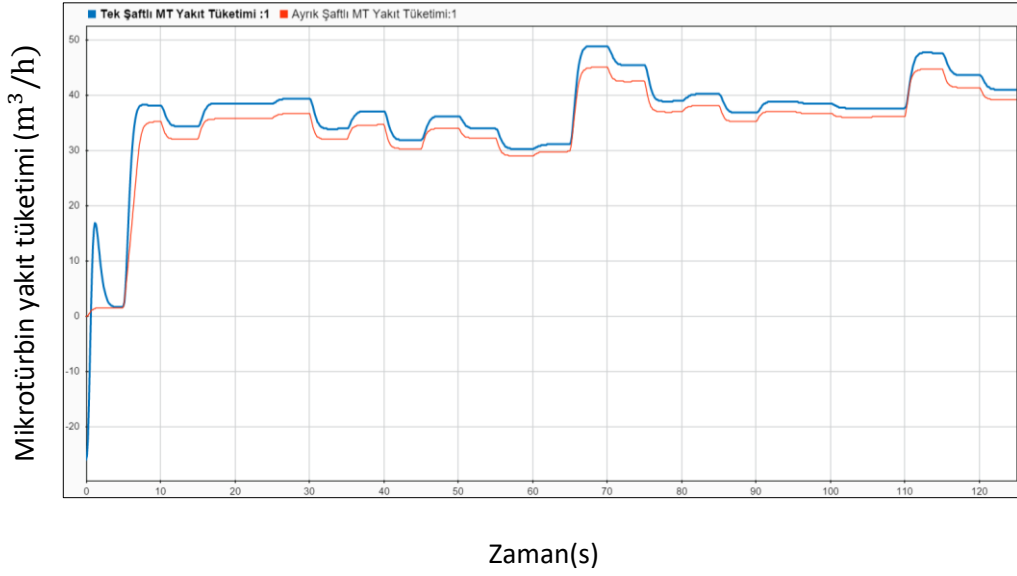
$$FF_{MT} = 0.0007(P_{MT-out})^2 + 0.29(P_{MT-out}) + 1.684 \quad (4.1)$$

$$F_C(P) = 0.0005(P_{MT-out})^2 + 0.2975(P_{MT-out}) + 1.453 \quad (4.2)$$

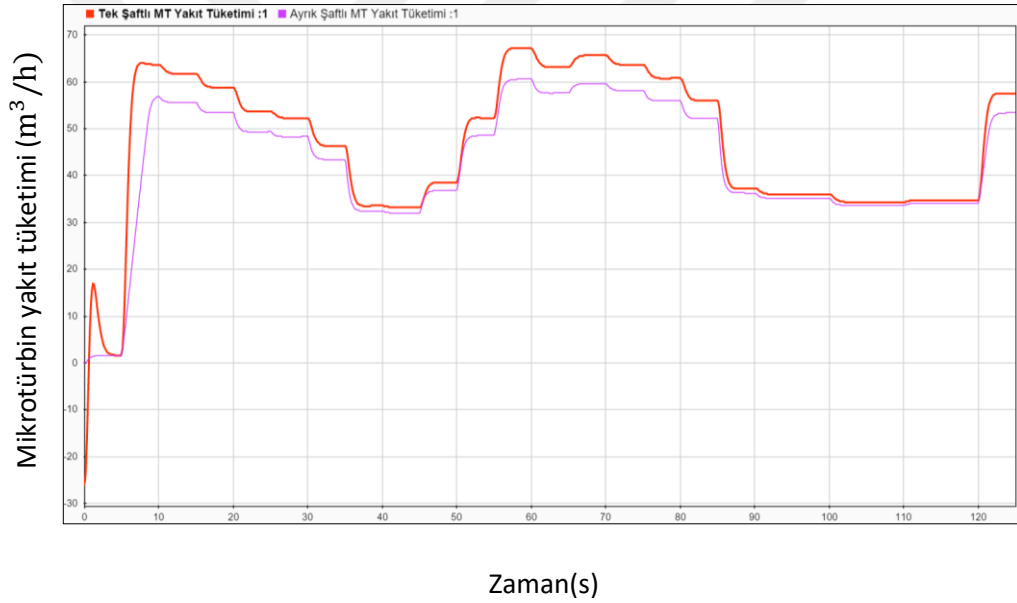
Eşitlik (4.1) ve Eşitlik (4.2), Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan bloklar ile geliştirilen modellere entegre edilmiştir. Böylece, ada modunda çalışan her iki model arasında çıkış gücüne bağlı olarak değişen doğalgaz yakıt akışı tüketimi (m^3/h) ve özgül yakıt maliyeti (TL/h) değerleri gözlemlenmiş ve kıyaslanmıştır. Temmuz, Nisan ve Ocak aylarındaki yük profiline göre yakıt akışı tüketimi değişimleri sırasıyla Şekil 4.25, Şekil 4.26, ve Şekil 4.27'de, özgül yakıt maliyeti değişimleri ise sırasıyla Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



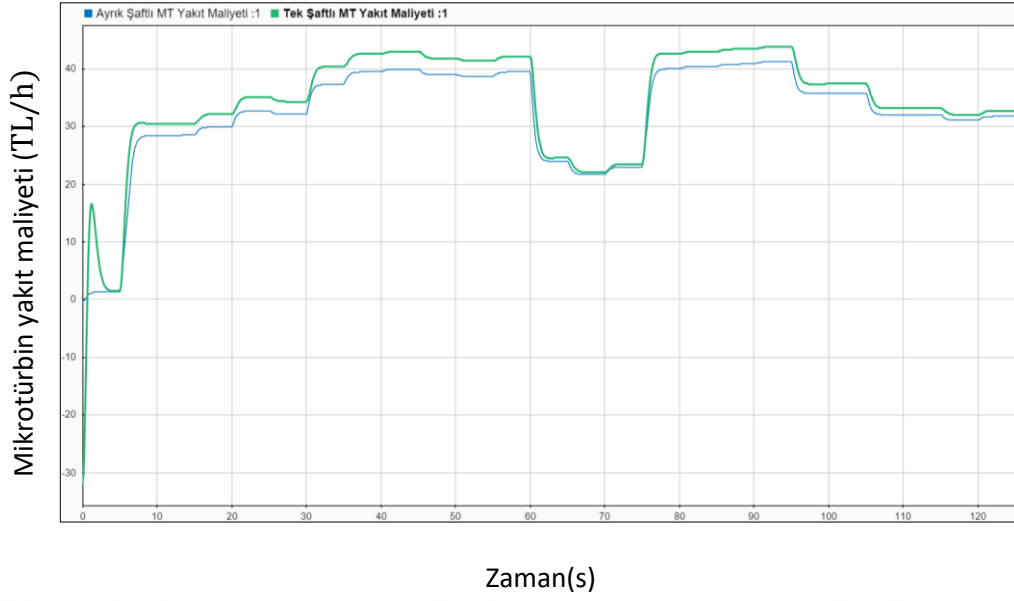
Şekil 4. 25 Temmuz ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması



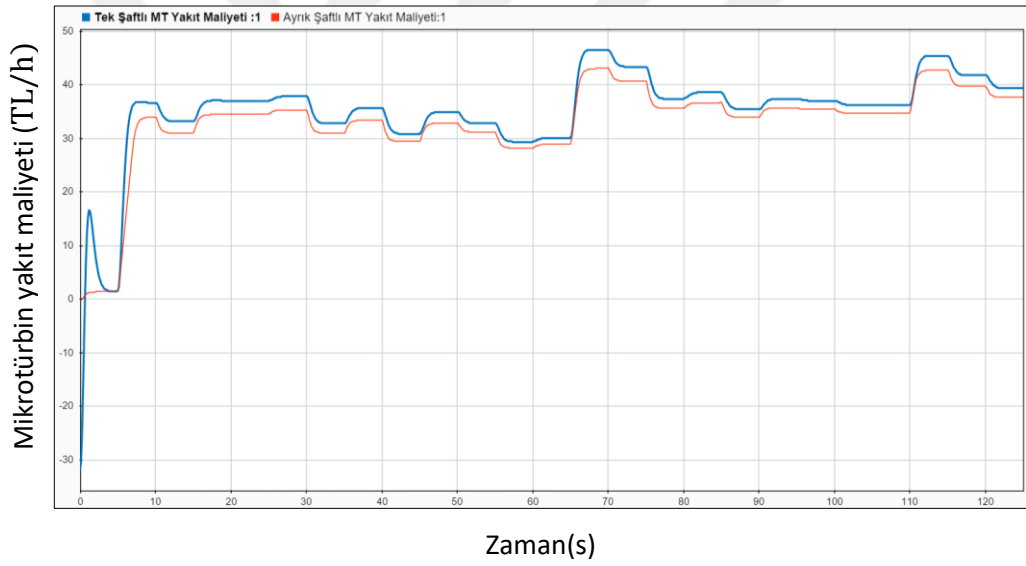
Şekil 4. 26 Nisan ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması



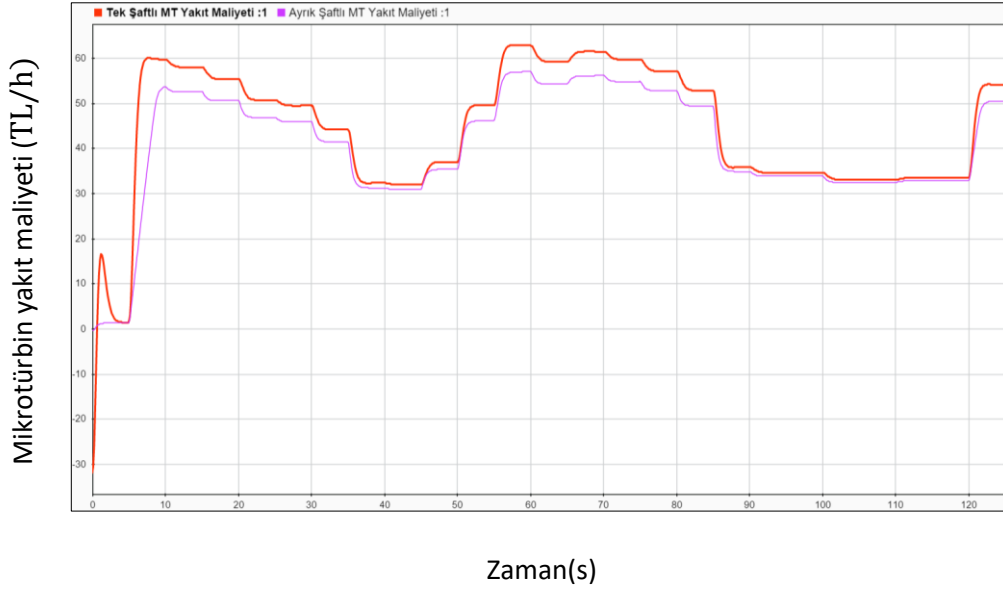
Şekil 4. 27 Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. 28 Temmuz ayı yük profiline göre ayrıık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. 29 Nisan ayı yük profiline göre ayrıık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. 30 Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı ve tek şaftlı mikrotürbinin yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması

Simülasyon sonuçlarına göre; hız, ivme ve sıcaklık kontrol denetleyicileri ile kompresör-türbin ve yakıt sisteminden oluşan tek şaftlı model ile sadece güç ve hız kontrol denetleyicilerinden oluşan ayırık şaftlı modelin yük takibini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’den de görüleceği üzere mikrotürbinin çıkış gücüne bağlı olarak değişen doğalgaz yakıt akışı tüketimi (m^3/h) ve özgül yakıt maliyetinin (TL/h) tek şaftlı modelde daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4. 5 Ayrık şaftlı ve tek şaftlı MT yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması (Temmuz)

Yük Gücü (Temmuz) (kW)	Tek Şaftlı MT Yakıt Tüketimi (m ³ /h)	Tek Şaftlı MT Yakıt Maliyeti (TL/h)	Ayrık Şaftlı MT Yakıt Tüketimi (m ³ /h)	Ayrık Şaftlı MT Yakıt Maliyeti (TL/h)
86 kW	31.5 m ³ /h	30.5 TL/h	29.4 m ³ /h	28.5 TL/h
86 kW	31.5 m ³ /h	30.5 TL/h	29.4 m ³ /h	28.5 TL/h
90 kW	33.3 m ³ /h	32.2 TL/h	30.9 m ³ /h	29.9 TL/h
98 kW	36.5 m ³ /h	35.1 TL/h	33.9 m ³ /h	32.7 TL/h
96 kW	35.6 m ³ /h	34.3 TL/h	33.3 m ³ /h	32.1 TL/h
111 kW	42.2 m ³ /h	40.4 TL/h	38.9 m ³ /h	37.3 TL/h
117 kW	44.6 m ³ /h	42.6 TL/h	41.2 m ³ /h	39.5 TL/h
118 kW	45.1 m ³ /h	43.2 TL/h	41.7 m ³ /h	39.9 TL/h
115 kW	43.8 m ³ /h	41.8 TL/h	40.7 m ³ /h	38.9 TL/h
114 kW	43.3 m ³ /h	41.4 TL/h	40.4 m ³ /h	38.7 TL/h
116 kW	44.2 m ³ /h	42.2 TL/h	41.3 m ³ /h	39.5 TL/h
70 kW	25.3 m ³ /h	24.6 TL/h	24.6 m ³ /h	23.9 TL/h
63 kW	22.6 m ³ /h	22.1 TL/h	22.2 m ³ /h	21.7 TL/h
67 kW	24.1 m ³ /h	23.5 TL/h	23.6 m ³ /h	22.9 TL/h
117 kW	44.7 m ³ /h	42.7 TL/h	41.8 m ³ /h	39.9 TL/h
118 kW	45.1 m ³ /h	43.2 TL/h	42.3 m ³ /h	40.4 TL/h
119 kW	45.5 m ³ /h	43.4 TL/h	42.7 m ³ /h	40.8 TL/h
120 kW	45.9 m ³ /h	43.8 TL/h	43.1 m ³ /h	41.2 TL/h
104 kW	38.9 m ³ /h	37.4 TL/h	37.2 m ³ /h	35.8 TL/h
104 kW	38.9 m ³ /h	37.4 TL/h	37.2 m ³ /h	35.8 TL/h
93 kW	34.4 m ³ /h	33.1 TL/h	33.2 m ³ /h	32.1 TL/h
93 kW	34.4 m ³ /h	33.1 TL/h	33.2 m ³ /h	32.1 TL/h
90 kW	33.2 m ³ /h	32.2 TL/h	32.2 m ³ /h	31.1 TL/h
92 kW	33.9 m ³ /h	32.8 TL/h	32.9 m ³ /h	31.8 TL/h

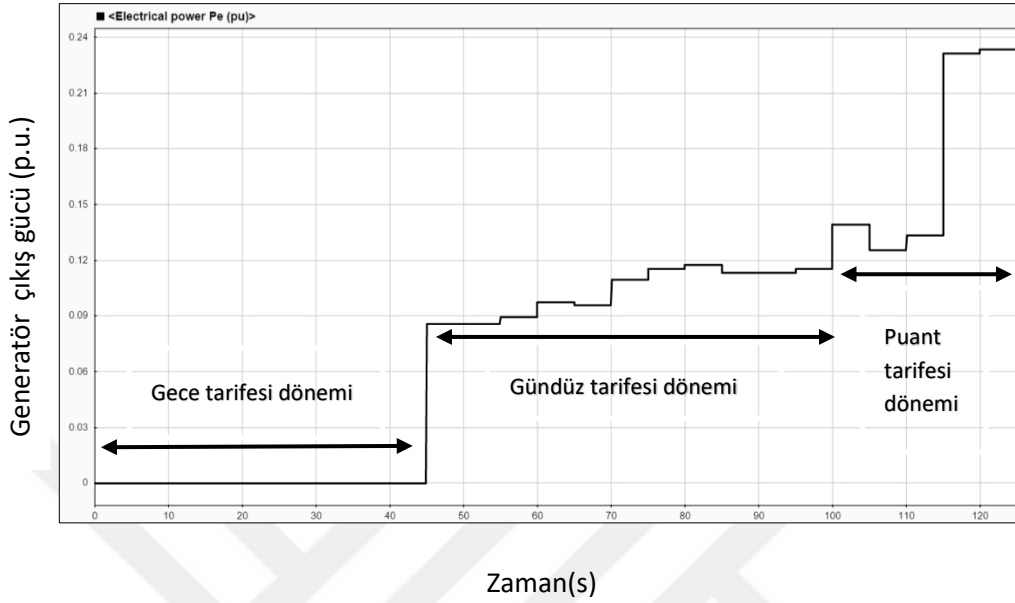
Çizelge 4. 6 Ayrık şaftlı ve tek şaftlı MT yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması (Nisan)

Yük Gücü (Nisan) (kW)	Tek Şaftlı MT Yakıt Tüketimi (m ³ /h)	Tek Şaftlı MT Yakıt Maliyeti (TL/h)	Ayrık Şaftlı MT Yakıt Tüketimi (m ³ /h)	Ayrık Şaftlı MT Yakıt Maliyeti (TL/h)
102 kW	38.2 m ³ /h	36.6 TL/h	35.1 m ³ /h	33.8 TL/h
93 kW	34.4 m ³ /h	33.1 TL/h	31.9 m ³ /h	30.9 TL/h
103 kW	38.6 m ³ /h	37.1 TL/h	35.8 m ³ /h	34.4 TL/h
103 kW	38.6 m ³ /h	37.1 TL/h	35.8 m ³ /h	34.4 TL/h
105 kW	39.4 m ³ /h	37.8 TL/h	36.6 m ³ /h	35.2 TL/h
92 kW	33.9 m ³ /h	32.7 TL/h	32.1 m ³ /h	30.9 TL/h
99 kW	37.1 m ³ /h	35.6 TL/h	34.7 m ³ /h	33.3 TL/h
87 kW	31.9 m ³ /h	30.8 TL/h	30.2 m ³ /h	29.3 TL/h
98 kW	36.3 m ³ /h	34.9 TL/h	33.9 m ³ /h	32.8 TL/h
93 kW	33.9 m ³ /h	32.8 TL/h	32.2 m ³ /h	31.1 TL/h
83 kW	30.3 m ³ /h	29.4 TL/h	28.9 m ³ /h	28.1 TL/h
85 kW	31.1 m ³ /h	30.1 TL/h	29.8 m ³ /h	28.9 TL/h
126 kW	48.8 m ³ /h	46.4 TL/h	45.1 m ³ /h	42.9 TL/h
119 kW	45.5 m ³ /h	43.4 TL/h	42.4 m ³ /h	40.6 TL/h
104 kW	38.9 m ³ /h	37.4 TL/h	36.9 m ³ /h	35.5 TL/h
107 kW	40.3 m ³ /h	38.6 TL/h	38.1 m ³ /h	36.6 TL/h
99 kW	36.9 m ³ /h	35.4 TL/h	35.2 m ³ /h	33.9 TL/h
104 kW	38.9 m ³ /h	37.4 TL/h	37.1 m ³ /h	35.7 TL/h
103 kW	38.6 m ³ /h	37.1 TL/h	36.8 m ³ /h	35.3 TL/h
101 kW	37.7 m ³ /h	36.2 TL/h	36.1 m ³ /h	34.7 TL/h
101 kW	37.7 m ³ /h	36.2 TL/h	36.1 m ³ /h	34.7 TL/h
124 kW	47.7 m ³ /h	45.4 TL/h	44.7 m ³ /h	42.7 TL/h
115 kW	43.7 m ³ /h	41.8 TL/h	41.4 m ³ /h	39.6 TL/h
109 kW	41.1	39.3 TL/h	39.2	37.6 TL/h

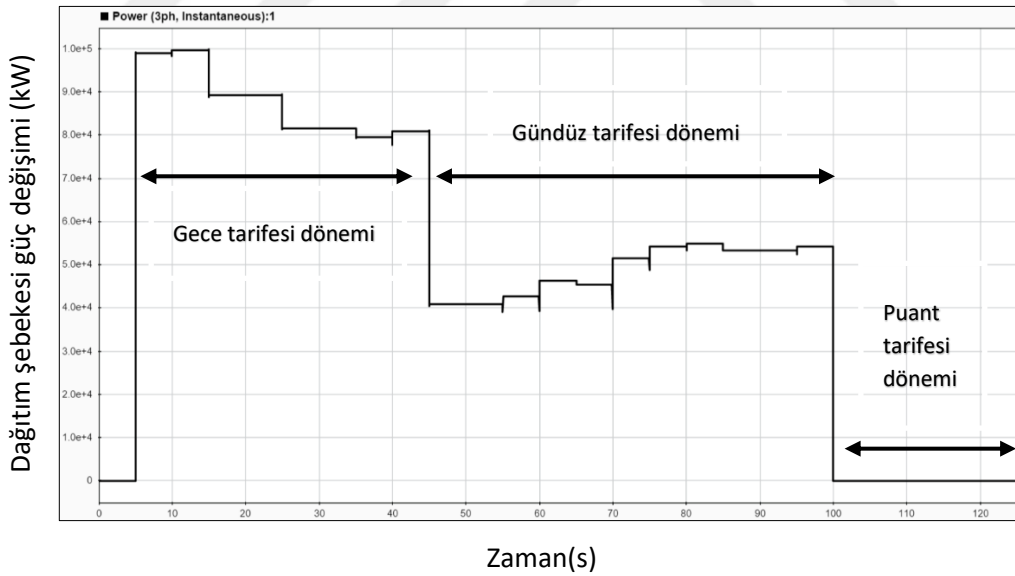
Çizelge 4. 7 Ayrık şaftlı ve tek şaftlı MT yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması (Ocak)

Yük Gücü (Ocak) (kW)	Tek Şaftlı MT Yakıt Tüketimi (m ³ /h)	Tek Şaftlı MT Yakıt Maliyeti (TL/h)	Ayrık Şaftlı MT Yakıt Tüketimi (m ³ /h)	Ayrık Şaftlı MT Yakıt Maliyeti (TL/h)
158 kW	63.7 m ³ /h	59.9 TL/h	47.5 m ³ /h	45.2 TL/h
154 kW	61.7 m ³ /h	58.1 TL/h	55.7 m ³ /h	52.6 TL/h
148 kW	58.8 m ³ /h	55.4 TL/h	53.5 m ³ /h	50.6 TL/h
137 kW	53.7 m ³ /h	50.7 TL/h	49.4 m ³ /h	46.9 TL/h
134 kW	52.3 m ³ /h	49.5 TL/h	48.3 m ³ /h	45.9 TL/h
121 kW	46.4 m ³ /h	44.2 TL/h	43.5 m ³ /h	41.5 TL/h
91 kW	33.6 m ³ /h	32.4 TL/h	32.4 m ³ /h	31.3 TL/h
90 kW	33.2 m ³ /h	32.1 TL/h	32.1 m ³ /h	30.9 TL/h
103 kW	38.6 m ³ /h	37.1 TL/h	36.8 m ³ /h	35.4 TL/h
134 kW	52.3 m ³ /h	49.6 TL/h	48.6 m ³ /h	46.2 TL/h
165 kW	67.2 m ³ /h	62.9 TL/h	60.6 m ³ /h	57.1 TL/h
157 kW	63.2 m ³ /h	59.3 TL/h	57.6 m ³ /h	54.3 TL/h
162 kW	65.6 m ³ /h	61.5 TL/h	59.6 m ³ /h	56.2 TL/h
158 kW	63.7 m ³ /h	59.8 TL/h	58.2 m ³ /h	54.9 TL/h
152 kW	60.8 m ³ /h	57.2 TL/h	55.9 m ³ /h	52.8 TL/h
142 kW	56.1 m ³ /h	52.9 TL/h	52.1 m ³ /h	49.4 TL/h
100 kW	37.3 m ³ /h	35.8 TL/h	36.3 m ³ /h	34.9 TL/h
97 kW	36.1 m ³ /h	34.7 TL/h	35.2 m ³ /h	33.9 TL/h
97 kW	36.1 m ³ /h	34.7 TL/h	35.2 m ³ /h	33.9 TL/h
93 kW	34.4 m ³ /h	33.1 TL/h	33.7 m ³ /h	32.5 TL/h
93 kW	34.4 m ³ /h	33.1 TL/h	33.7 m ³ /h	32.5 TL/h
94 kW	34.8 m ³ /h	33.5 TL/h	34.1 m ³ /h	32.8 TL/h
94 kW	34.8 m ³ /h	33.5 TL/h	34.1 m ³ /h	32.8 TL/h
145 kW	57.4	54.2	53.4	50.6

Üç zamanlı elektrik tarifesine göre yük uygulanan modelin Temmuz ayındaki yük profiline göre jeneratör çıkış güç değişimi Şekil 4.32’de, dağıtım şebekesinin güç değişimi ise Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 32 Temmuz ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan tek shaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü

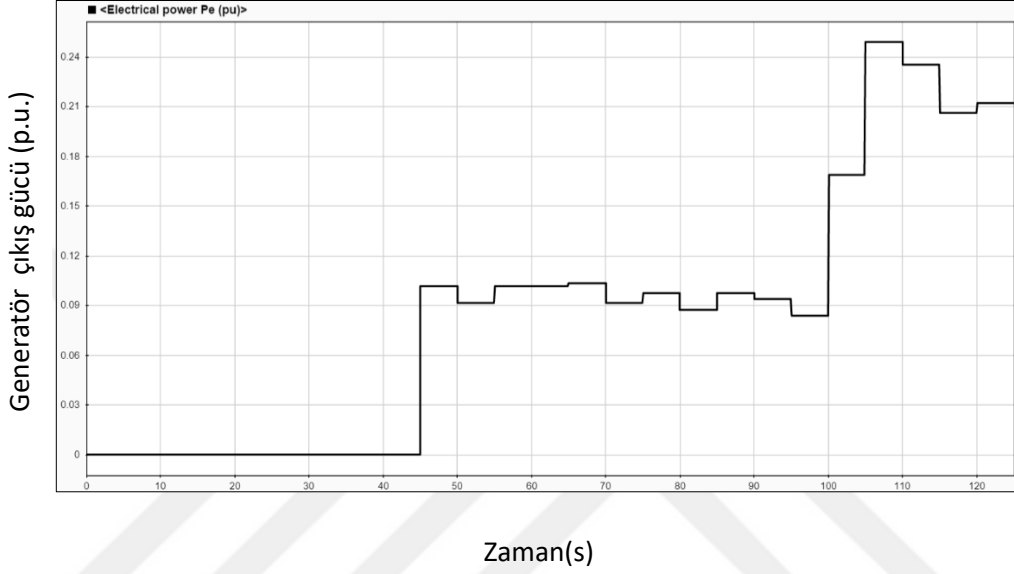


Şekil 4. 33 Temmuz ayı yük profiline göre tek shaftlı MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi

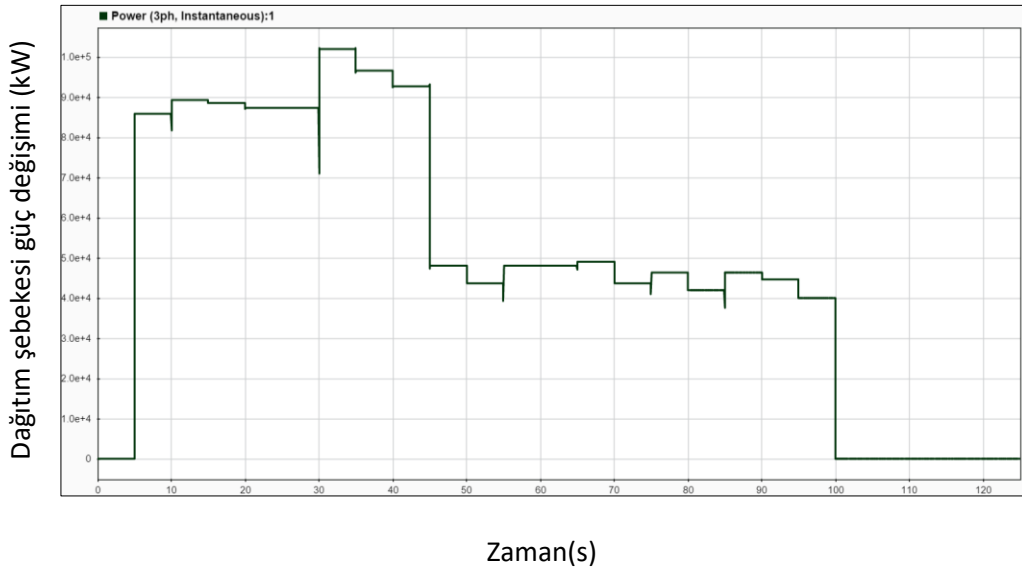
Şekil 4.33'den de görüldüğü üzere 5. saniyeye kadar şebekeden güç çekilmemiştir. 5. saniye itibari ile 20 meskenlik sitenin gece tarifesi dönemindeki güç ihtiyacı sadece şebeke tarafından karşılanmıştır. 45. saniyede gündüz tarifesi dönemine geçilmiştir. Bu dönemde, mikrotürbin üretim sistemi ile dağıtım şebekesi paralel çalışmaya başlamıştır

ve iki sistem de yük paylaşımı yaparak güç ihtiyacını karşılamıştır. 100. saniyede puant tarifesi dönemine geçilmiş ve Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'ten de görüleceği üzere güç ihtiyacı sadece mikrotürbin tarafından tarafından karşılanmıştır.

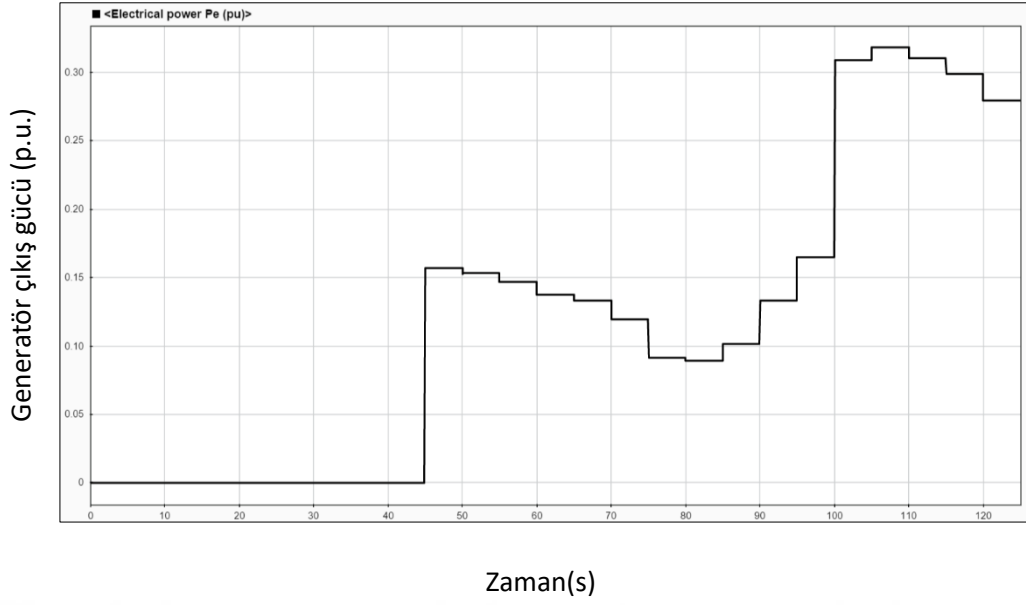
Üç zamanlı elektrik tarifesine göre yük uygulanan modelin Nisan ve Ocak aylarındaki yük profillerine göre jeneratör çıkış güç değişimleri sırasıyla Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de, dağıtım şebekesinin güç değişimleri ise sırasıyla Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de gösterilmiştir.



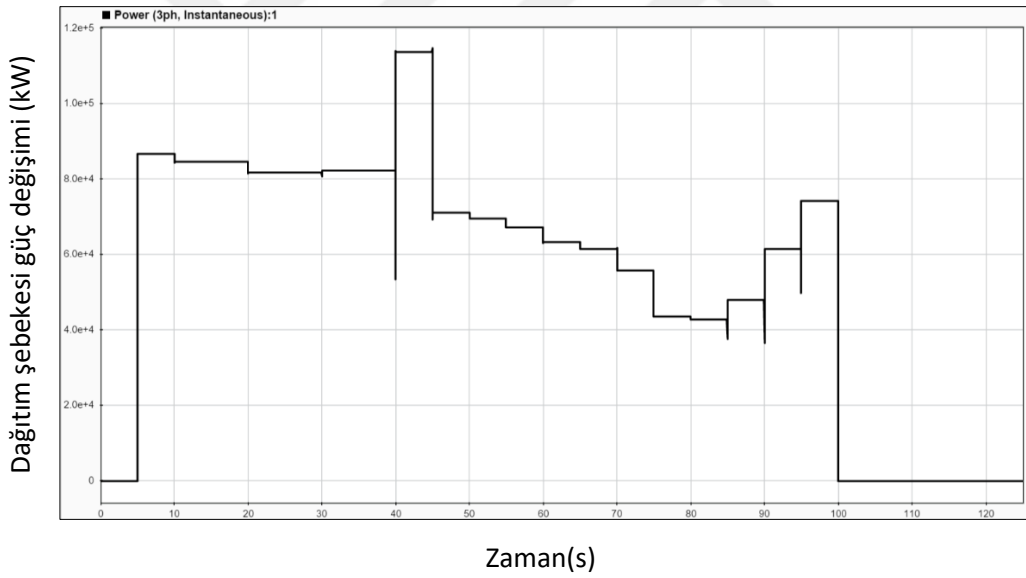
Şekil 4. 34 Nisan ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü



Şekil 4. 35 Nisan ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi



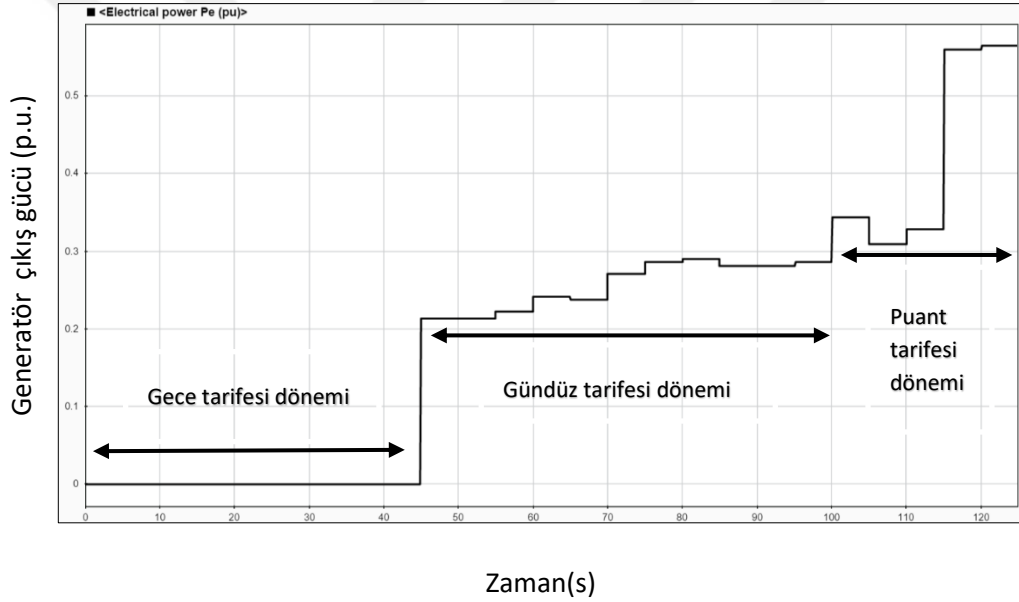
Şekil 4. 36 Ocak ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan tek şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü



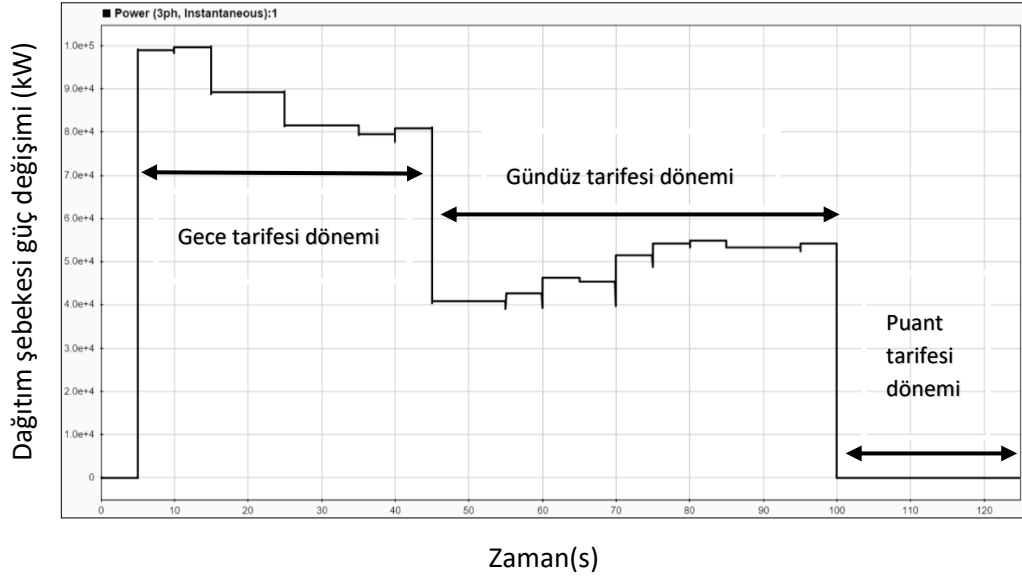
Şekil 4. 37 Ocak ayı yük profiline göre tek şaftlı MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi

4.3.2 Şebeke ile Paralel Çalışan Ayrık Şaftlı Mikrotürbin Modelinin Simülasyon Sonuçları

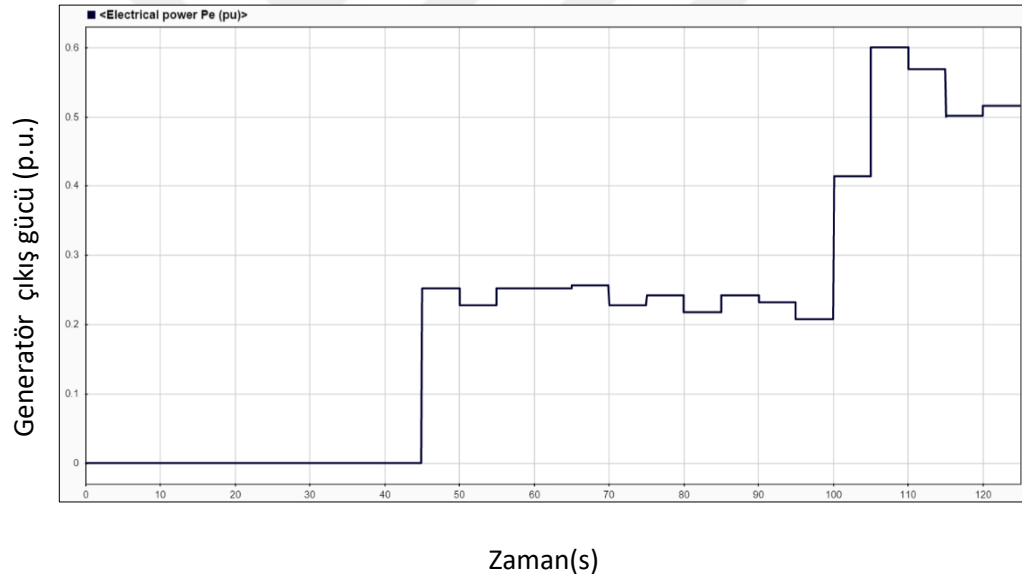
Üç zamanlı elektrik tarifesinin uygulandığı modelin Temmuz, Nisan ve Ocak aylarındaki yük profillerine göre jeneratör çıkış gücü değişimleri sırasıyla Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da, dağıtım şebekesinin güç değişimleri ise sırasıyla Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'de gösterilmiştir. Şekil 4.38'den de görüldüğü üzere aynı şebeke ile paralel çalışan tek şaftlı modelde olduğu gibi 5. saniyeye kadar şebekeden güç çekilmemiştir. 5. saniye güç ihtiyacı sadece şebeke tarafından karşılanmıştır. 45. saniyede mikrotürbin üretim sistemi ile dağıtım şebekesi paralel çalışmaya başlamıştır ve iki sistem de yük paylaşımı yaparak güç ihtiyacını karşılamıştır. 100. Saniye itibari ile güç ihtiyacı sadece mikrotürbin tarafından karşılanmıştır.



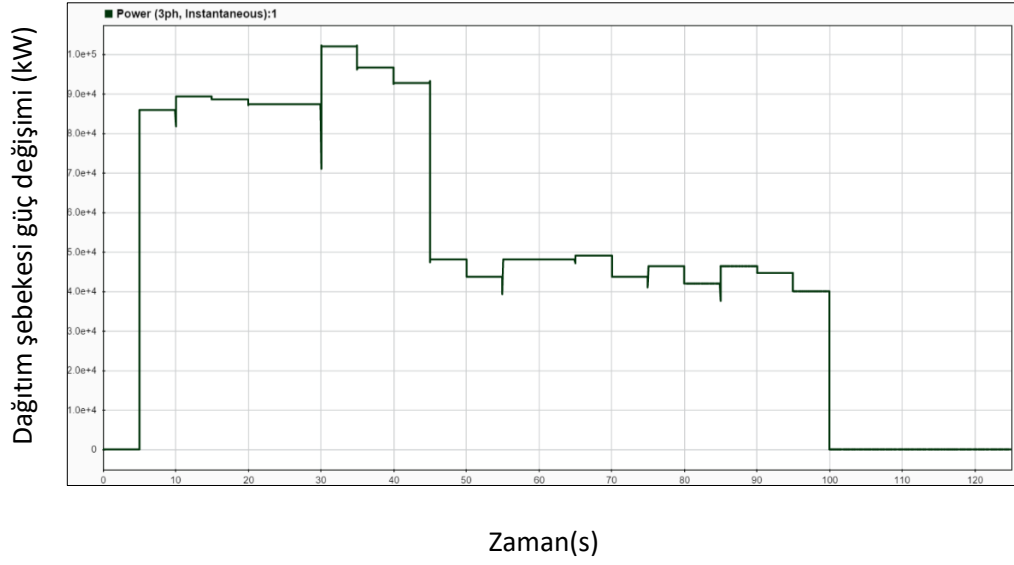
Şekil 4. 38 Temmuz ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan ayrık şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü



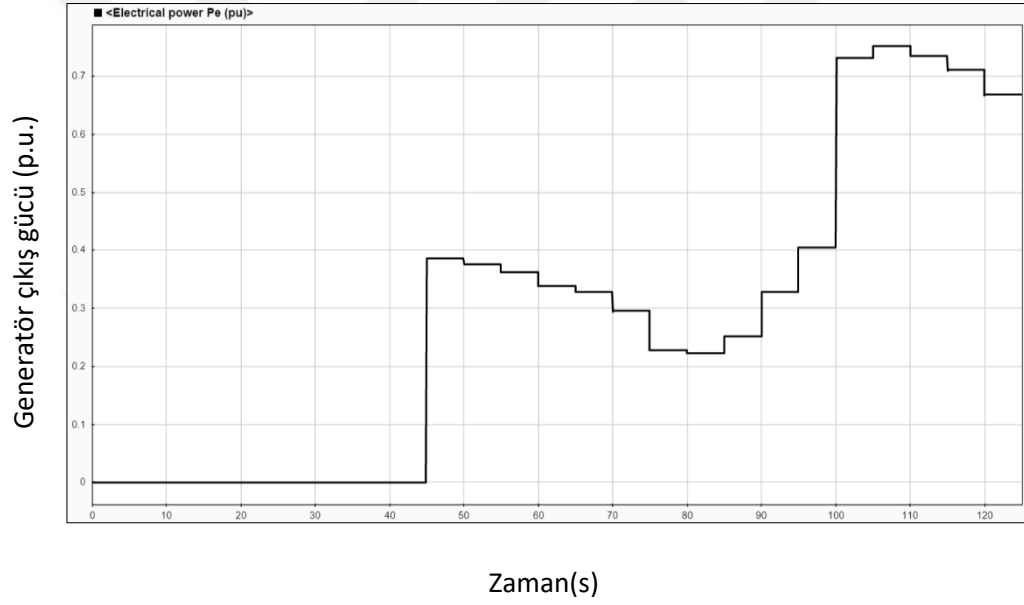
Şekil 4. 39 Temmuz ayı yük profiline göre ayrıklı şaftlı MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi



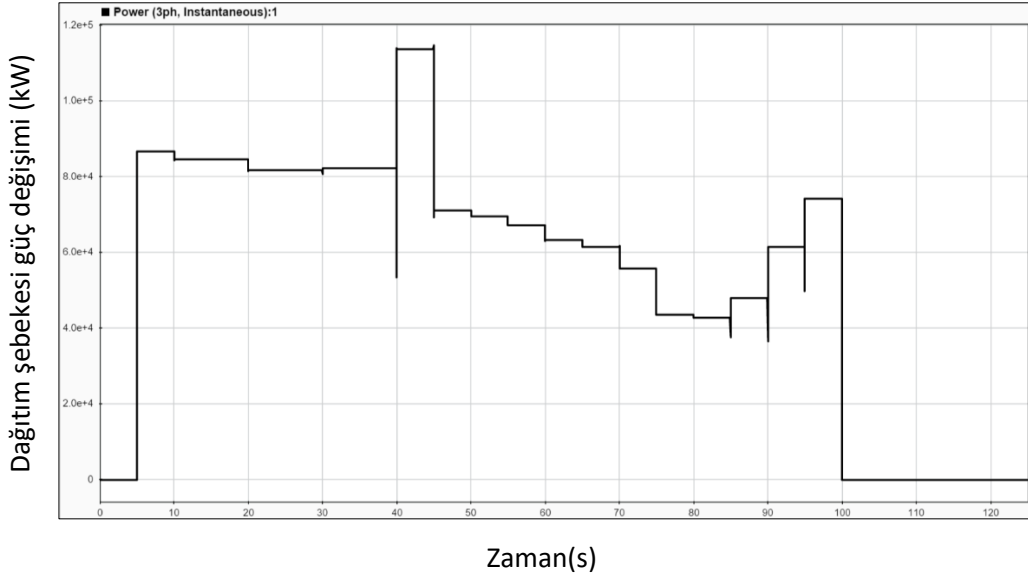
Şekil 4. 40 Nisan ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışan ayrıklı şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü



Şekil 4. 41 Nisan ayı yük profiline göre ayrıklı şaftlı MTÜS ile paralel çalışın dağıtım şebekesi güç değışimi



Şekil 4. 42 Ocak ayı yük profiline göre şebeke ile paralel çalışın ayrıklı şaftlı MTÜS'nin jeneratör çıkış gücü



Şekil 4. 43 Ocak ayı yük profiline göre ayırık şaftlı MTÜS ile paralel çalışan dağıtım şebekesi güç değişimi

Mikrotürbin üretim sisteminin sadece yakıt maliyeti göz önünde bulundurularak ve üç zamanlı elektrik tarifesi (gündüz-puant-gece) dikkate alınarak şebeke ve mikrotürbin üretim sistemi arasında bir maliyet hesabı yapılmıştır. Mikrotürbinin özgül yakıt maliyeti hesaplanırken Eşitlik (4.2) dikkate alınmıştır ve mikrotürbin çıkış gücünün yük gücüne eşit olduğu varsayılmıştır. Yüklerin şebeke tarafından karşılanması durumunda maliyet hesabı yapılırken, bir mesken için elektrik birim fiyatları gündüz tarifesinde (06:00-17:00) 0,4622 TL, puant tarifesinde (17:00-22:00) 0,7065 TL, gece tarifesinde (22:00-06:00) 0,2883 TL olarak kabul edilmiştir [69]. Üç zamanlı tarifeye göre yüklerin sadece mikrotürbin üretim sisteminden karşılanması, sadece dağıtım şebekesinden karşılanması ve dağıtım şebekesi ile mikrotürbin üretim sisteminin paralel çalışarak karşılanması durumlarında elektrik tüketim maliyetleri Çizelge 4.8’de sunulmuştur.

Çizelge 4. 8 MTÜS ile dağıtım şebekesi arasında elektriksel açıdan maliyet karşılaştırılması

Ay	Sadece MTÜS	Sadece Dağıtım Şebekesi	MTÜS + Dağıtım Şebekesi
Temmuz	870.30 ₺	1,064.32 ₺	861.15 ₺
Nisan	937.41 ₺	1,162.53 ₺	918.50 ₺
Ocak	1,131.89 ₺	1,433.11 ₺	1,127.49 ₺

Çizelge 4.8 incelendiğinde 20 meskenden oluşan sitenin Temmuz, Nisan ve Ocak aylarının bir gününde elektrik tüketim maliyeti, üç senaryoda da yüklerin MTÜS ve dağıtım şebekesinin paralel çalışarak karşılanması durumunda en düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla güç ihtiyacının, puant tarifesi döneminde sadece mikrotürbin üretim sistemi tarafından, gece tarifesi döneminde sadece dağıtım şebekesi tarafından, gündüz tarifesi döneminde ise dağıtım şebekesi ve mikrotürbin üretim sisteminin paralel çalışarak karşılanması uygun görülmüştür.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikrotürbin üretim sistemleri çevresel kirliliği azaltma, enerji verimliliğini artırma ve sistem güvenilirliğini artırma gibi avantajlarından dolayı güç sistemlerinde gelecek vadeden bir teknoloji haline gelmeye başlamıştır.

Bu çalışmada dağıtık üretim teknolojilerinden biri olan mikrotürbin üretim sistemlerinin yapısı, çalışma prensibi, çeşitleri ve özelliklerinden kısaca bahsedildikten sonra iki ayrı tip mikrotürbin üretim sisteminin dinamik modellenmeleri incelenmiştir. Ada modunda ve şebeke ile paralel çalışma modunda tek şaft tipi ve ayrı şaft tipi mikrotürbin üretim sistemi modelleri Matlab/Simulink'te geliştirilmiş, bir dağıtık üretim birimi olarak yük takip performansları gözlemlenmiştir. Tek şaftlı model; hız, ivme ve sıcaklık kontrol denetleyicileri ile kompresör-türbin ve yakıt sisteminden oluşurken, ayrı şaftlı model; hız ve güç kontrol denetleyicilerinden oluşmaktadır.

Ada çalışma modunda yük profili, gerçek bir meskenin saatlik elektrik tüketim değerleri baz alınarak oluşturulmuştur. Ada modu çalışmada bu meskene eşdeğer 20 meskenden oluşan bir sitenin elektriksel güç ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Temmuz, Nisan ve Ocak aylarından bir gün belirlenerek belirlenen günlerdeki saatlik elektrik tüketim değerleri ada modundaki modellere yük olarak uygulanmıştır. Ada modu çalışmanın simülasyon sonuçlarına göre, yüklerin devreye girdiği ve her iki modelin de bu yükleri başarılı bir şekilde besleyebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca doğalgazla çalışan bu modellere Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan bloklar aracılığıyla yakıt tüketim ve yakıt maliyet blokları entegre edilerek çeşitli yük değişimlerine bağlı olarak modellerin ne kadar yakıt tükettiği ve tüketilen yakıtın ne kadara mal olduğu tespit edilmeye

çalışılmıştır. Yakıt tüketim ve yakıt maliyeti sonuçlarına göre tek şaftlı modelin, ayrıık şaftlı modele göre daha fazla yakıt tükettiği ve dolayısıyla yakıt maliyetinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

MTÜS modellerinin dağıtım şebekesi ile paralel çalışma modundaki yük profili, ada çalışma modundaki yük profili ile aynıdır ve simülasyon, üç zamanlı elektrik tarifesi (gündüz-puant-gece) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. 20 meskenlik sitenin gece tarifesi dönemindeki güç ihtiyacı sadece şebeke tarafından, gündüz tarifesi dönemindeki güç ihtiyacı mikrotürbin üretim sistemi ile dağıtım şebekesi paralel çalıştırılarak her iki kaynak tarafından, puant tarifesi dönemindeki güç ihtiyacı ise sadece mikrotürbin tarafından karşılanmıştır. Bu üç senaryo, mikrotürbin üretim sisteminin sadece yakıt maliyeti göz önünde bulundurularak ve üç zamanlı elektrik tarifesi (gündüz-puant-gece) dikkate alınarak şebeke ve mikrotürbin üretim sistemi arasında yapılan maliyet analizine göre belirlenmiştir. Maliyet analizine göre, Temmuz ayı senaryosuna göre 20 meskenin bir günlük güç ihtiyacının sadece mikrotürbin üretim sisteminden karşılanması durumunda elektrik tüketim maliyetinin 870 TL, sadece dağıtım şebekesi tarafından karşılanması durumunda 1,064.32 TL ve mikrotürbin üretim sistemi ile şebekenin paralel çalışarak karşılanması durumunda ise 861.15 TL olduğu hesaplanmıştır. Nisan ve Ocak ayları senaryolarında da aynı durum geçerli olup, elektrik tüketim maliyetinin MTÜS ve dağıtım şebekesinin paralel çalışarak karşılanması durumunda en düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, mikrotürbinlerin hem ısı hem de elektrik kaynağı olarak, özellikle konut uygulamalarında kullanılmasına yönelik farklı çalışmalara yol gösterecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Esmaili, R., Das, D., Klapp, D.A., Dernici, O. ve Nichols, D.K., (2006). "A Novel Power Conversion System for Distributed Energy Resources", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 18-22 June 2006, Montreal, Que., Canada.
- [2] Brenna, M., Tironi, E. ve Ubezio, G., (2004). "Proposal of a Local DC Distribution Network with Distributed Energy Resources", 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 12-15 Sept. 2004, Lake Placid, New York, USA.
- [3] Mohamed, A., Nizam, M. ve Salam, A.A., (2009). "Performance Evaluation of Fuel Cell and Microturbine as Distributed Generators in a Microgrid", European Journal of Scientific Research, 30:554–570.
- [4] El-Khattam, W. ve Salama, M.M.A., (2004). "Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits", Electric Power Systems Research, 71:119–128.
- [5] Tikkişetty, T. ve Gutta, B., (2011). "Modeling And Simulation Of Micro Turbine Based DG System Feeding Vector Controlled İnduction Motor (VCIM) Drive and Other Static Loads", International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 9:289–293.
- [6] Jahani, R., Malekshah, A.S., Nejad, H.C. ve Araskalaei, A.H., (2011). "Applying a New Advanced İntelligent Algorithm for Optimal Distributed Generation Location And Sizing in Radial Distribution Systems", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5:642–9.
- [7] How do wind turbines work?, <https://energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>, 10 Ağustos 2017.
- [8] Knier G., How do photovoltaics work? <https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>, 10 Haziran 2017.
- [9] Fuel Cells, <http://www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/fuel-cells/>, 10 Haziran 2017.
- [10] Fuel Cells, <https://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>, 10 Haziran 2017.

- [11] Gaonkar, D.N. ve Patel, R.N., (2006). "Modeling and Simulation of Microturbine Based Distributed Generation System", IEEE Power India Conference, 10-12 April 2006, New Delhi, India.
- [12] Gaonkar, D.N., Patel, R.N. ve Pillai, G.N., (2006). "Dynamic Model of Microturbine Generation System for Grid Connected/Islanding Operation," IEEE International Conference on Industrial Technology, 15-17 Dec. 2006, Mumbai, India.
- [13] Gaonkar, D.N., (2010). Performance of Microturbine Generation System in Grid Connected and Islanding Modes of Operation, Distributed Generation, InTech.
- [14] K Nayak, S. ve Gaonkar, D.N., (2012). "Modeling and Performance Analysis of Microturbine Generation System in Grid Connected/Islanding Operation", 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems", 16-19 Dec. 2012, Bengaluru, India.
- [15] K Nayak, S., Gaonkar, D.N. ve Shivarudraswamy, R., (2011). "Fuzzy Logic Controlled Microturbine Generation System for Distributed Generation", 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE2011), Energy Procedia, 14: 1213-1219.
- [16] Kandil, M.S., El-Saadawi, M.M., Hassan, A.E. ve Abo-Al-Ez, K.M., "Dynamic Modeling and Control of Microturbine DG System for Autonomous Operation", Mansoura University Department of Electrical Engineering, <http://www.sdaengineering.com/mepcon10/papers/172.pdf>, 27 Kasım 2016
- [17] Ofualagba, G., (2012). "The Modeling and Simulation of a Microturbine Generation System", International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 2, Issue 2, ISSN 2229-5518.
- [18] Saha, A.K., Chowdhury, S., Chowdhury, S.P. ve Crossley, P.A., (2009). "Modeling and Performance Analysis of a Microturbine as a Distributed Energy Resource", IEEE Transactions on Energy Conversion, 24:529–538.
- [19] Saha, A.K., (2011). "Study of Microturbine Models in Islanded and Grid-Connected Mode", Journal of Energy and Power Engineering, 5:862-869.
- [20] Guo, X. ve Guo, H., (2011). "Simulation and Control Strategy of a Micro-Turbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operations", Energy Procedia, 12:368-376.
- [21] Singh, N.K., Tiwari, P. ve Srivastava, J., "Simulation Of Microturbine Generation System For Unbalance Grid Power Supply", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2, Issue 7, ISSN: 2278-0181.
- [22] Srikanth, K.S., Naresh, K., Narasimha, Rao, L.V. ve Ramesh, V. (2016). "Matlab/Simulink Based Dynamic Modeling of Microturbine Generator for Grid and Islanding Modes of Operation", International Journal of Power Systems, Vol. 1, ISSN: 2367-8976
- [23] Asgharian, P. ve Noroozian, R., (2016). "Modeling and Simulation of Microturbine Generation System for Simultaneous Grid-Connected/Islanding

- Operation”, 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 10-12 May 2016, Shiraz, Iran.
- [24] Kumar, A., Sandhu, K.S., Jain, S.P. ve Kumar, P.S., (2009), “Modeling and Control of Micro- Turbine Based Distributed Generation System”, *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 3:65–72.
- [25] El-Sharkh, M.Y., Sisworahardjo, N.S., Uzunoglu, M., Onar, O. ve Alam, M.S., (2007). “Dynamic Behavior of PEM Fuel Cell and Microturbine Power Plants”, *Journal of Power Sources*, 164:315–321.
- [26] Uzunoglu, M., Onar, O., El-Sharkh, M.Y., Sisworahardjo, N.S., Rahmana, A. ve Alama, M.S., (2007). “Parallel Operation Characteristics of PEM Fuel Cell and Microturbine Power Plants”, *Journal of Power Sources*, 168:469–476.
- [27] Kalantar, M. ve Mousavi, S.M.G., (2010). “Dynamic Behavior of a Stand-Alone Hybrid Power Generation System of Wind Turbine, Microturbine, Solar Array And Battery Storage”, *Applied Energy*, 87:3051–3064.
- [28] Mousavi, S.M.G., (2012). “An Autonomous Hybrid Energy System of Wind/Tidal/Micro- Turbine/Battery Storage”, *Electrical Power and Energy Systems*, 43: 1144–1154.
- [29] Mohamed, A., Nizam, M. ve Salam, A.A., (2009). “Performance Evaluation of Fuel Cell and Microturbine as Distributed Generators in a Microgrid”, *European Journal of Scientific Research*, 30:554–570.
- [30] Marti’n, J.I.S., Zamora, I., Marti’n, J.J.S., Aperribay, V. ve Eguia, P., (2010). “Hybrid Fuel Cells Technologies for Electrical Microgrids”, *Electric Power Systems Research*, 80:993–1005.
- [31] Komatsu, Y., Kimijima, S. ve Szymd, J.S., (2010). “Performance Analysis for the Part-Load Operation of a Solid Oxide Fuel Cell–Micro Gas Turbine Hybrid System”, *Energy*, 35:982–988.
- [32] Caisheng, W., Colson, C.M., Nehrir, M.H. ve Jian, L., (2009). “Power Management of a Stand- Alone Hybrid Wind-Microturbine Distributed Generation System” 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, 24-26 June 2009, Lincoln, NE, USA.
- [33] Jain, A., Singh, B.P., Bhullar, S. ve Verma, M.K., (2016). “Performance of Hybrid Wind-Microturbine Generation System in Isolated Mode”, 2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems (ICETEESES–16), 11-12 March 2016, Sultanpur, India.
- [34] Abdel-Geliel, M., Zidane, I.F., Anany, M. ve Rezeka, S.F., (2014). “Modeling and Simulation of a Hybrid Power Generation System of Wind turbine, Micro-turbine and Solar Heater Cells”, 11th IEEE International Conference on Control&Automation, 18-20 June 2014, Taichung, Taiwan.
- [35] Nascimento, M.A.R., Lora, E.S. ve Correa, P.S.P., Andrade, R.V., Rendon, M.A., Venturini, O.J., Ramirez, G.A.S., (2008). “Biodiesel Fuel in Diesel Micro-Turbine Engines: Modelling and Experimental Evaluation”, *Energy*, 33:233–240.

- [36] Alkhalil, F., Colas, F. ve Robyns, B., (2010). "Secant Minimizes the Cost of Fuel and Emissions in a Power Station of Small Cogeneration Multimachines", International Conference on Renewable Energy and Eco-Design in Electrical Engineering, 23-24 March, Lille, France.
- [37] Rahman, S., Pipattanasomporn, M. ve Tech, V., (2010). "Modeling and Simulation of a Distributed Generation-Integrated Intelligent Microgrid", Strategic Environmental Research Development Program (SERDP) Project SI-1650, Final Report.
- [38] Alimardani, A., Keshtkar, H. ve Abdi, B., (2011). "Optimization of Fuel Consumption in Micro-Turbines", Energy Procedia, 12:779 – 788.
- [39] Keshtkar, H., Solanki, J. ve Solanki, K., (2014). "Dynamic Modeling, Control and Stability Analysis of Microturbine in a Microgrid", 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 14-17 April, Chicago, IL, USA.
- [40] Gomatom, P. ve Jewell, W., "Fuel Parameter and Quality Constraints for Microturbine Distributed Generators, Proceedings of Power Systems 03: Distributed Generation and Advanced Metering, Wichita State University, Center for Energy Studies, Wichita, Kansas, USA.
- [41] Singh, S. ve Srinivasan, G., (2012). "Competitiveness of a Natural Gas Microturbine", 2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 29 April-2 May, Montreal, QC, Canada.
- [42] Sisworahardjo, N. ve El-Sharkh, M.Y., (2013). "Validation of Artificial Neural Network Based Model of Microturbine Power Plant", 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 6-11 October, Lake Buena Vista, FL, USA.
- [43] Nikkhajoei, H. ve Iravani, M.R., (2002). "Modeling and Analysis of a Micro-Turbine Generation System", 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 21-25 July, Chicago, IL, USA.
- [44] Hwang, Y., (2004). "Potential Energy Benefits of Integrated Refrigeration System with Microturbine and Absorption Chiller", International Journal of Refrigeration, 27:816–829.
- [45] Wang, W., Cai, R. ve Zhang, N., (2004). "General Characteristics of Single Shaft Microturbine Set At Variable Speed Operation and Its Optimization", Applied Thermal Engineering, 24:1851–1863.
- [46] Belmonte, S., Nùñez V., Viramonte J.G. ve Franco J., (2009). "Potential Renewable Energy Resources of the Lerma Valley, Salta, Argentina for its Strategic Territorial Planning", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:1475–1484.
- [47] Liss, W.E., (1999). "Natural Gas Power Systems for the Distributed Generation Market", Power-Gen International'99 Conference, 30 Nowember, New Orleans, Louisiana, USA.
- [48] Scott, W.G., (2000). "Micro Gas Turbine Cogeneration Applications", International Power and Light Conference, USA.

- [49] Watts, J.H., (1999). "Microturbines: A New Class of Gas Turbine Engine", Global Gas turbine News, 39:4-8.
- [50] Kincaid D.E., (1999). "The Role of Distributed Generation in Competitive Energy Markets", Distributed Generation Forum, Gas Research Institute (GRI).
- [51] Barker, Micros T., (1997). "Catalysts and Electronics", Power-Gen International 96, Turbomachinery, 38(1): 19-21
- [52] Ismail, M.S., Moghavvemi, M. ve Mahlia, T.M.I., (2013). "Current Utilization of Microturbines as a part of a Hybrid System in Distributed Generation Technology", Renewable and Sustainable Energy Reviews 21:142–152.
- [53] Zhu, Y. ve Tomsovic, K., (2002). "Development of Models for Analyzing the Load-Following Performance of Microturbines and Fuel Cells", Electric Power Systems Research, 62:1–11.
- [54] Bruno, J.C., Ortega-Lo´pez, V. ve Coronas, A., (2009). "Integration of Absorption Cooling Systems into Micro Gas Turbine Trigeneration Systems Using Biogas: Case Study of a Sewage Treatment Plant", Applied Energy, 86: 837–847.
- [55] Thornton, A. ve Monroy, C.R., (2011). "Distributed Power Generation in the United States, Renewable And Sustainable Energy Reviews, 15:4809–4817.
- [56] Aga, A. E., (2013). "Fuel Supply Investigation for an Externally Fired Microturbine Based Micro CHP System", Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm.
- [57] Hahn E., The ELGAS website, <http://www.elgas.com.au/blog/492-what-is-lpg-lpg-gas-lp-gas>, 17 Temmuz 2017.
- [58] The EIA website, https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=diesel_use, 17 Temmuz 2017.
- [59] Kaikko, J. ve Backman, J., (2007). "Technical and Economic Performance Analysis for a Microturbine in Combined Heat and Power Generation, Energy, 32:378–387.
- [60] Medrano, M., Brouwer, J., McDonell, V., Mauzey, J. ve Samuelson, S., (2008). "Integration of Distributed Generation Systems into Generic Types of Commercial Buildings in California", Energy and Buildings, 40:537–548.
- [61] Akorede, M.F., Hizam, H. ve Pouresmaeil, E., (2010). "Distributed Energy Resources and Benefits to the Environment", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:724–734.
- [62] Pilavachi, P.A., (2002). "Mini and Micro-Gas Turbines for Combined Heat and Power", Applied Thermal Engineering, 22:2003–2014.
- [63] Al-Hinai, A. ve Feliachi, A., (2002). "Dynamic Model of a Microturbine Used as a Distributed Generator", Proceeding of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory, 19 March, Huntsville, AL, USA.

- [64] Nikkhajoei H. ve Reza I.M., (2005). "A Matrix Converter Based Microturbine Distributed Generation System" IEEE Transaction Power Delivery, 20(3):2182-2192.
- [65] Oğuz, Y., Üstün, S.V., Yabanova İ., Yumurtacı M. ve Güney İ., (2012). "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System to Improve the Power Quality of a Split Shaft Microturbine Power Generation System", Journal of Power Sources, 197:196–209.
- [66] Tikkişetty, T. ve Gutta, B., (2011). "Modeling and Simulation of Micro Turbine Based DG System Feeding Vector Controlled İnduction Motor (VCIM) Drive and Other Static Loads", International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 9:289–293.
- [67] Vasen, N., Vivarelli, S., Janssen, R. ve Liebich, M., (2004). "Opportunities for Biofuel-Burning Microturbines in the European Decentralised-Generation Market (BIOTURBINE).
- [68] Boundy, R., Diegel, S.W., Wright, L. ve Davis, S. C., (2011). "Biomass Energy Data Book", 4th ed. Tennessee, cta.ornl.gov/bedb.
- [69] EPDK Elektrik Tarifeleri 2018, <https://gazelektrik.com/s-s-s/epdk-elektrik-tarifeleri-2018>, 21 Nisan 2018.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şehriban ÇELİK
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.05.1993 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : sehriban.celik@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Pamukkale Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Şair Abay Konanbay Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017-Halen	Schneider Elektrik San. ve Tic A.Ş.	Teknik Destek Mühendisi
2014-2016	Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi	Elektrik-Elektronik Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Celik, S., Kekezoglu, B., Baysal, M. (2017). "Modeling and Simulation of Split Shaft Microturbine Generation Systems Based on Fuel Consumption", 8th International Advanced Technologies Symposium, October 19-21, Elazig, Turkey.

