

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**JEOTERMAL SANTRALLERDE ATIK ISIDAN
TERMOELEKTRİK ETKİ İLE ENERJİ GERİ KAZANIMININ
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

MAHMUT HEKİM

DENİZLİ, ARALIK - 2021

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**JEOTERMAL SANTRALLERDE ATIK ISIDAN
TERMOELEKTRİK ETKİ İLE ENERJİ GERİ KAZANIMININ
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

MAHMUT HEKİM

DENİZLİ, ARALIK - 2021

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon Birimi tarafından 2017FEBE027 no'lu proje ile
desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

MAHMUT HEKİM

ÖZET

JEOTERMAL SANTRALLERDE ATIK ISIDAN TERMoeLEKTRİK ETKİ İLE ENERJİ GERİ KAZANIMININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

MAHMUT HEKİM

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ENGİN ÇETİN)

DENİZLİ, ARALIK - 2021

Jeotermal Enerji Santralleri (JES), yer altındaki ısıyı elektrik enerjisine dönüştüren yapılardır. JES'lerin elektrik enerjisi üretim verimliliklerinin %20'ler civarında olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, JES'lere Termoelektrik Generator (TEG) entegrasyonu yapılarak, atık ısıdan elektrik enerjisi üretilmesi, böylelikle reenjekte edilen jeotermal akışkanın atık ısısının geri kazanımı hedeflenmiştir. Çalışmada tasarlanan hibrit sistemde, JES'lerdeki reenjeksiyon kuyusuna gönderilen jeotermal akışkan, TEG'ler üzerinden geçirilerek elektrik enerjisi üretilmesi sağlanmaktadır. TEG sisteminde; her biri 3,2 W gücündeki TEG modüllerinin 12 adedi seri bağlanarak bir seri kol yapısı meydana getirilmiştir. Oluşturulan 4 adet seri kol da paralel bağlanmıştır. Sistem hayata geçirilmeden önce Matlab & Simulink ortamında tasarlanıp deneyimlenmiştir. Benzetim sonucunda TEG sistem verimi %2,44 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sistem modeli, laboratuvar ortamında deney düzeneği haline getirilmiştir. Sistem, programlanabilir mantık denetleyicisi (PLC) tabanlı bir düzenekle kontrol edilecek şekilde oluşturulmuştur. Tasarlanan düzenepteki jeotermal kuyu ve soğutma kulesi modellerinden gelen sıcak ve soğuk su kullanılarak, TEG sisteminde DC elektrik enerjisi üretilmiştir. Sistemde yer alan evirici ile de, DC elektrik enerjisi 230 V AC elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Üretilen enerji, elektriksel yük olarak seçilen led lambaların enerjilendirilmesinde kullanılmıştır. Çalışmada, Denizli'de kurulu Jeoden JES'ten alınan veriler birlikte değerlendirilerek termodinamik analizler de yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre; jeotermal akışkanın ısı enerjisinin, santral evaporator bölümünde maksimum düzeyde değerlendirilememesi neticesinde JES net çıkış gücünün düştüğü, bununla birlikte TEG'lerin güç çıkışının, reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklığındaki artışla birlikte arttığı görülmüştür. Varılan sonuç; bu tür bir hibrit sistemden daha fazla enerji elde edebilmesi yolunda, TEG'lerin daha düşük güç çıkışları ile kullanılmasını gerektirir yöndedir. Bir diğer gözlem, santral soğutma suyunun yüksek sıcaklık değerleri için JES'in ve TEG'lerin çıkış gücü değerlerinin azaldığı şeklindedir. TEG'lerden, yüzeyleri arasındaki ısı fark büyüdükçe, daha fazla güç çıkışı elde edilebilmektedir. Bu noktada, toplam sistem veriminin artırılması amacıyla santral soğutma suyu sıcaklık değerinin mümkün olduğu kadar düşük tutulması yerinde olacaktır.

ANAHTAR KELİMELELER: Termoelektrik generator, jeotermal santral, atık ısı, enerji geri kazanımı, hibrit sistem modeli.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENERGY RECOVERY BY THERMOELECTRIC EFFECT FROM WASTE HEAT IN GEOTHERMAL POWER PLANTS

PH.D THESIS

MAHMUT HEKİM

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ENGİN ÇETİN)

DENİZLİ, DECEMBER 2021

Geothermal Power Plants (GPP) convert the thermal energy into electrical energy which is from the geothermal reservoir. It is known that the electrical energy production efficiency of GPPs is around 20%. In this study, it is aimed to generate electrical energy from waste heat by integrating a Thermoelectric Generator (TEG) into GPPs, thus recovering the waste heat of the reinjected geothermal fluid. In the designed hybrid system, the geothermal fluid sent to the reinjection well in the GPPs is passed over the TEGs to generate electrical energy. In the TEG system; a branch is formed by connecting 12 TEG modules in series each with a power of 3.2 W. And then, 4 branches are connected in parallel. Before the system is implemented, it is designed and simulated in Matlab & Simulink. As a result of the simulation, the TEG system efficiency is obtained as 2.44%. The obtained system model is constructed as an experimental setup. The experimental setup is controlled by a programmable logic controller (PLC) based control unit. DC electrical energy is generated in the TEG system by using hot and cold water supplying from the geothermal well and cooling tower models. With the inverter in the system, DC electrical energy is converted into 230 V AC electrical energy. The generated energy is used to energize the LED lamps selected as electrical load. In the study, the data obtained from the Jeoden GPP established in Denizli are evaluated with data from experimental setup together. After that, thermodynamic analyzes are also carried out. According to the analysis results; because of the thermal energy of the geothermal fluid could not be utilized at the maximum level in the power plant evaporator section, it is observed that the net output power of the GPP decreased, however, the power output of the TEGs increased with the rising of the temperature of the reinjected geothermal fluid. According to these results, in order to obtain more energy from such a hybrid system, it requires the use of TEGs with lower power outputs. Another observation is that the output power values of the GPP and TEGs decrease for high temperature values of the GPP cooling water. For larger thermal differences between the two surfaces of TEGs, the more power output can be evaluated. At this point, it would be appropriate to keep the cooling water temperature of GPP as low as possible in order to increase the total system efficiency.

KEYWORDS: Thermoelectric generator, geothermal power plant, waste heat, energy recovery, hybrid system model.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler ve Literatür Araştırması	2
1.2 Tezin Amacı.....	10
1.3 Tezin Kapsamı	11
2. JEOTERMAL SANTRALLER ve TERMÖELEKTRİK	
GENERATORLER	14
2.1 Jeotermal Enerji	15
2.2 Jeotermal Enerji Santralleri.....	16
• Kuru Buhar Santraller.....	17
• Buharlaştırılmalı Santraller.....	18
• Binary Çevrimli Jeotermal Enerji Santralleri	19
2.3 Termoelektrik Generatorler.....	22
2.3.1 Termoelektrik Modülün Generator Olarak Kullanılması	24
3. HİBRİT SİSTEM TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ	26
3.1 JES-TEG Hibrit Sistemi'ne Genel Bir Bakış.....	26
3.2 Termoelektrik Generatorun Modellenmesi.....	30
3.2.1 Termoelektrik Generator Sistemi Tasarım Bilgileri.....	30
3.2.2 Termoelektrik Generator Sistemi Matematiksel Modeli	32
3.3 Termoelektrik Generator Sistemi Matlab & Simulink Benzetimi	39
3.3.1 Benzetim Arayüzü	40
3.3.2 Boost Konvertör	47
3.4 Deney Düzeneği.....	51
3.4.1 TEG Sistemi Genel Yapısı	53
3.4.2 TEG Modüllerinin Tesisi.....	55
3.4.2.1 TEG Montaj Detayları	55
3.4.2.2 Bakır Kutu Profil İmalat Aşaması	56
3.4.2.3 TEG Modüllerin Bakır Kutu Profil Aralarına Yerleştirilmesi	61
3.4.3 Sıcak/Soğuk Su Sirkülasyon Sistemi.....	64
3.4.4 TEG Sistemi Veri Toplama ve Ölçüm Ekipmanı.....	66
3.4.5 Soğutma Sistemi.....	68
3.4.6 Isıtma Sistemi Rezistans Seçimi.....	69
3.4.7 Sıcak ve Soğuk Su Hatları.....	70
3.4.8 Elektrik Sisteminin Tesisi.....	71
3.4.9 Solid State Relay ile Isıtıcı Kontrolü.....	73
3.4.10 PLC Tabanlı Veri Toplama ve Kontrol Sistemi.....	75
3.4.10.1 PVKS Genel Yapısı	77
3.4.10.2 PLC Ünitesi ve STEP7 MicroWIN Yazılımı.....	82

3.4.10.3 PLC Programlama Prosedürü	84
3.4.10.4 Sıcak Su Tank Sıcaklığı Değerinin PLC ile Ölçülmesi	86
3.4.10.5 PLC ile Isıtıcı ve Soğutucu Kontrolü	89
3.4.10.6 Sıcak ve Soğuk Su Hatlarının Debisinin Ölçülmesi	91
3.4.10.7 TEG Sistemi Verilerinin Anlık Takibi	93
4. JES-TEG SİSTEM DENEYLERİ	96
4.1 TEG Modüllerinin Test Edilmesi	96
4.2 Montaj İşlemi Doğrulama Prosedürleri	99
4.3 Farklı Konfigürasyonlarla Oluşturulan TEG Sistem Deneyleri	101
4.3.1 Sekizli Seri / Altılı Paralel Kol TEG Bağlantı Deneyleri	101
4.3.2 On İkili Seri / Dörtlü Paralel Kol Doğrudan İnvertör Bağlantılı Sistem	103
4.3.3 On İkili Seri / Dörtlü Paralel Kol Şarj Regülatörü ve Akülü Sistem	104
4.4 İnvertörün Yük Altında İncelenmesi	108
4.5 Pompa Akış Hızı ve Sıcaklık Farkının TEG Sistemine Etkisi	111
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ MEVCUT BİR SANTRALE UYARLANMASI	117
5.1 Jeoden JES	117
5.2 Jeotermal Santralin Termodinamik Modeli	120
5.3 Santral Verilerinin TEG Sistemine Uyarlanması	123
6. BULGULAR	130
6.1 Teknik Bulgular	130
6.2 Ekonomik Bulgular ve İşletme Sürekliliği	132
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	137
8. KAYNAKLAR	140
9. EKLER	149
EK A Akış Debilerine Göre Hesaplanan Gerilim ve Güç Değer Tabloları	149
EK B Step 7 Micro/WIN Ladder Diyagramları	154
10. ÖZGEÇMİŞ	188

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Enerji üretim kaynakları baz alındığında 2010 ve 2020 yıllarına ait Türkiye'deki elektrik enerjisi santral kurulu güçleri..	2
Şekil 2.1: Kuru buhar santrallere ait genel prensip şeması..	18
Şekil 2.2: Çift kademe buharlaştırma sistemi akış şeması..	19
Şekil 2.3: Buharlaştırmalı sistem (solda) ve ORC sistemi (sağda) akış şemaları..	19
Şekil 2.4: ORC akış şeması..	20
Şekil 2.5: ORC kapalı termodinamik çevrimi..	21
Şekil 2.6: Kombine çevrim jeotermal sistem akış şeması..	22
Şekil 2.7: Termoelektrik modülün genel yapısı..	23
Şekil 2.8: Seebeck Etkisi..	24
Şekil 2.9: TEG modülü iç yapısı..	24
Şekil 2.10: TEG temel yapısı..	25
Şekil 3.1: JES-TEG hibrit enerji üretim sistemi akış şeması..	28
Şekil 3.2: Jeotermal santral kuyusu, by-pass ve üretim hatları..	28
Şekil 3.3: TEG modülü sıcaklık-güç eğrisi..	31
Şekil 3.4: TEG modülü sıcaklık-gerilim eğrisi..	31
Şekil 3.5: TEG modülü Thevenin eşdeğer devresi..	38
Şekil 3.6: $N_s = 12$ ve $N_p = 4$ olacak şekilde TEG sistemi bağlantı konfigürasyonu..	40
Şekil 3.7: TEG sistemi Matlab & Simulink modeli..	41
Şekil 3.8: Matlab & Simulink benzetim çalışmasında arayüze tasarım parametrelerinin girişi..	42
Şekil 3.9: TEG sistemi için Matlab & Simulink benzetimi alt sistem gösterimi..	43
Şekil 3.10: TEG sistem benzetimi veri girişi ve takibi alt sistemi..	45
Şekil 3.11: TEG sistem benzetimi hesaplamalar alt sistemi..	46
Şekil 3.12: Kontrollü gerilim kaynağı bloğu alt sistemi..	47
Şekil 3.13: Boost konvertör devresi..	47
Şekil 3.14: DC/DC boost konvertör alt sistemi..	49
Şekil 3.15: DC/AC invertör alt sistemi..	49
Şekil 3.16: TEG sistemi çıkış gerilimi dalga şekli..	50
Şekil 3.17: DC/AC invertör giriş gerilimi dalga şekli..	51
Şekil 3.18: DC/AC invertör çıkış gerilimi dalga şekli..	51
Şekil 3.19: Temin edilen Kryotherm marka TGM-199-1.4-0.8 model TEG modülleri..	52
Şekil 3.20: TEG sistemi genel prensip şeması..	54
Şekil 3.21: Bakır L profiller..	57
Şekil 3.22: Bakır profilin kaynak işlemi ile oluşum aşamaları..	58
Şekil 3.23: Bakır profil yüzeyinin düzleştirilmesi..	59
Şekil 3.24: Bakır profil yüzeyine lama ve TEG montajı..	59
Şekil 3.25: Isı transferi için kullanılan zig-zag bakır şeritler..	60
Şekil 3.26: İmal edilen bakır kutu profillerin nihai görünümü..	60
Şekil 3.27: TEG modül görünüşü..	61
Şekil 3.28: TEG yüzeylerine termal macun sürülmesi..	62

Şekil 3.29: TEG’lerin soğuk su taşıyan bakır profil üzerine yerleştirilmesi....	62
Şekil 3.30: TEG’lerin sıcak su taşıyan bakır profil üzerine yerleştirilmesi.	63
Şekil 3.31: TEG modül montajının tamamlanması.....	63
Şekil 3.32: Alüminyum termal izolasyon kutusu montajı.....	64
Şekil 3.33: Alüminyum termal izolasyon kutusu nihai görünümü.	64
Şekil 3.34: Sıcak/soğuk su sirkülasyon sistemi tek hat şeması.....	65
Şekil 3.35: TEG yüzey sıcaklığını ölçmek için kullanılan termokupl.	67
Şekil 3.36: Soğutma sisteminin montajı.....	68
Şekil 3.37: Sıcak/Soğuk su sirkülasyon sistemi montaj aşamaları.....	70
Şekil 3.38: TEG Sistemi kontrol ve kumanda panosu bağlantı şeması.....	71
Şekil 3.39: 12 adet seri, 4 adet paralel kol bağlantısı ile oluşturulan TEG sistemi.	72
Şekil 3.40: Isıtıcı anahtarlamaında kullanılan SSR.	73
Şekil 3.41: JES-TEG hibrit sistem modeli.	74
Şekil 3.42: JES-TEG deney düzeneği ana ekipmanı.....	75
Şekil 3.43: JES-TEG deney düzeneği için farklı açılardan 3 boyutlu görünüm.	75
Şekil 3.44: PVKS pano kapağı.....	77
Şekil 3.45: PVKS pano içeriği.	78
Şekil 3.46: PLC’nin analog giriş ve dijital çıkış bağlantı şeması.	81
Şekil 3.47: Siemens S7-200 CPU 224 6ES7214-1AD23-0XB0 PLC.....	82
Şekil 3.48: Step 7 MicroWIN programı arayüzü.	83
Şekil 3.49: EM 235 dip switch, gain ve offset ayar noktaları..	85
Şekil 3.50: Step7 MicroWIN sembol tablosu görünümü.	86
Şekil 3.51: Sıcak su tank sıcaklık değerinin görüntülenmesi.....	88
Şekil 3.52: Isıtıcı kontrolü için MicroWIN ladder diyagramı.....	90
Şekil 3.53: Sıcak su (solda) ve soğuk su (sağda) sayaçları.	91
Şekil 3.54: Sıcak su akış ölçüm prosesi MicroWIN arayüzü.....	92
Şekil 3.55: MicroWIN programı ile analog verilerin anlık izlenmesi.....	94
Şekil 3.56: MicroWIN programı ile analog verilerin trend olarak izlenmesi. .	94
Şekil 3.57: PLC’de kaydedilen verilerin, Excel dosyası halinde elde edilmesi.....	95
Şekil 3.58: Tanımlı analog verilerin ana ekranda izlenmesi.	95
Şekil 4.1: TEG modül test düzeneği.	96
Şekil 4.2: TEG sisteminde modül çıkışlarının ölçülmesi.....	97
Şekil 4.3: TEG’lerin yerleşim düzeni.....	99
Şekil 4.4: Profil ağırlığı ile hasar gören TEG.....	100
Şekil 4.5: TEG koruması için kullanılan tampon malzemeler.	101
Şekil 4.6: TEG sisteminin LED lambalar ile yüklenmesi.	104
Şekil 4.7: TEG sistem çıkışının doğrudan invertöre bağlanması.....	105
Şekil 4.8: TEG çıkışının şarj regülatörü ve akü üzerinden invertöre bağlantısı.....	106
Şekil 4.9: Airflow anemometre / termometre.....	106
Şekil 4.10: TEG sistemince AC yüklerin enerjilendirilmesi.....	108
Şekil 4.11: Elektriksel yük deneyleri için oluşturulan düzenek.....	109
Şekil 4.12: Boşta çalışan invertörün TEG sistemine bağlanması sonrası oluşan elektriksel dalga şekilleri (a) İnvertör giriş gerilim ve akım grafikleri, b) İnvertör DC giriş gücü, c) İnvertör çıkış gerilim grafiği).....	110

Şekil 4.13: LED lambaların devreye alınması ile birlikte oluşan invertör giriş / çıkış hattı üzerindeki elektriksel veriler (a) İnvörtör girişı DC gerilim ve akım grafikleri, b) İnvörtör DC girişı gücü, c) İnvörtör çıkış gerilim ve akım grafikleri, d) İnvörtör çıkış gücü).	110
Şekil 4.14: $\Delta T = 50$ °C için zamana bağılı gerilim ve güç grafiğı.	113
Şekil 4.15: $\Delta T = 60$ °C için zamana bağılı gerilim ve güç grafiğı.	114
Şekil 4.16: $\Delta T = 70$ °C için zamana bağılı gerilim ve güç grafiğı.	114
Şekil 4.17: $\Delta T = 80$ °C için zamana bağılı gerilim ve güç grafiğı.	115
Şekil 4.18: Farklı kütleel debiler için TEG sistemi çıkış gerilim değerleri.	116
Şekil 4.19: Farklı kütleel debiler için TEG sistemi çıkış gücü değerleri.	116
Şekil 5.1: Jeoden JES santral sahası.	118
Şekil 5.2: JEODEN JES prensip şeması.	118
Şekil 5.3: Pure Cycle 280 modülü genel yapısı.	119
Şekil 5.4: Jeoden JES ulusal enterkonnekte bağlantısı.	120
Şekil 5.5: (a) Sabit durumda bir çalışma koşulu için jeotermal enerji santrali için sıcaklığa özgü entropi diyagramı. (b) Evaporator ve kondenserin temas noktası sıcaklık hesaplamaları için sıcaklık-ısı transfer hızı diyagramları.	122
Şekil 5.6: Reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklık değerine bağılı olarak; net güç ile evaporator ve kondenser basınç değerleri.	125
Şekil 5.7: Reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklık değerine bağılı olarak; R245fa ve soğutma suyunun kütle akış hızları ile Carnot ve termal verim değerlerindeki değişimler.	126
Şekil 5.8: Soğutma suyunun değişken girişı sıcaklık değerine bağılı olarak net güç ile evaporator ve kondenser basınç değerleri.	127
Şekil 5.9: Soğutma suyunun değişken girişı sıcaklık değerine bağılı olarak; R245fa ve soğutma suyunun kütle akış hızları ile Carnot ve termal verim değerlerindeki değişimler.	127
Şekil 5.10: Net güç, TEG'lerin çıkış gücü ve sıcaklık farkının, reenjekte edilen jeotermal akışkanın girişı sıcaklığı ile değişimi.	128
Şekil 5.11: Net güç, TEG'lerin çıkış gücü ve sıcaklık farkının, soğutma suyu girişı sıcaklığı ile değişimi.	129

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Kryotherm TGM-199-1.4-0.8 teknik özellikleri..	32
Tablo 3.2: TEG sistemi işletme koşulları ve tasarım bilgileri.	32
Tablo 3.3: 48 adet TEG'in farklı kombinasyonlardaki bağlantısına göre hesaplanan veriler.	39
Tablo 3.4: PVKS pano kapağında görülen ekipmana dair detaylar.	78
Tablo 3.5: PVKS pano içi ekipmanı.	79
Tablo 3.6: Sistemde dahilinde gelişebilecek olası olaylar ve PLC müdahale komutları.	80
Tablo 3.7: Sensörler ve sayaçlardan ölçülen analog veri türleri.	81
Tablo 3.8: EM 235 için tek yönlü tam skala giriş çözünürlük tablosu.	84
Tablo 4.1: TEG modüllerine dair gerilim ölçümleri esnasındaki sıcaklık parametreleri.	97
Tablo 4.2: TEG'lerin bireysel gerilim ölçüm değerleri.	98
Tablo 4.3: Sekizli seri altılı paralel kol TEG bağlantısı için hesaplama sonucu elde edilen gerilim değerleri.	102
Tablo 4.4: Sekizli seri altılı paralel kol TEG bağlantısı için ölçülen gerilim değerleri.	102
Tablo 4.5: TEG'lerin on iki seri / dört paralel kol konfigürasyonu için rezistans devredeyken elde edilen ölçüm verileri.	103
Tablo 4.6: TEG sistemi enerji üretim logları.	107
Tablo 4.7: $\Delta T = 80$ °C için değişken pompa kademelerinde TEG sistemi veri takibi.	112
Tablo 5.1: Pratt&Whitney Pure Cycle 280 modülünün teknik özellikleri..	118
Tablo 5.2: Kararlı durumdaki çalışma koşulları için tek bir Pure Cycle modülünden ölçüm yoluyla elde edilen veriler.	123
Tablo 5.3: Santralin termodinamik özellikleri.	124
Tablo 5.4: Termodinamik modellemeye dayanan ORC'nin hesaplanmış verileri.	124
Tablo 6.1: TEG sistemi kurulum maliyeti.	133
Tablo 6.2: Mevcut laboratuvar imkanları dahilinde temini yapılan ekipmanlar.	133
Tablo A.1: 50 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri..	150
Tablo A.2: 60 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri..	151
Tablo A.3: 70 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri..	152
Tablo A.4: 80 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri..	153

SEMBOL LİSTESİ

c	: Suyun öz ısısı [J/kg.°C]
D	: Duty Cycle
$\dot{E}_{in}$	: Birim zaman başına enerji girişi, [kJ.s ⁻¹]
$\dot{E}_{out}$	: Birim zaman başına enerji çıkışı, [kJ.s ⁻¹]
f	: Enerji satış fiyatı, [₺/kWh]
g	: Gün sayısı
G	: TEG sistemi yıllık geliri
h	: Özgül entalpi, [kJ.kg ⁻¹]
h_f	: Doymuş sıvının özgül entalpisi, [kJ.kg ⁻¹]
h_g	: Doymuş buharın özgül entalpisi, [kJ.kg ⁻¹]
h_{pp,con}	: Kondenserin temas noktasında özgül entalpisi, [kJ.kg ⁻¹]
h_{pp,ev}	: Evaporatorun temas noktasında özgül entalpisi, [kJ.kg ⁻¹]
I_{DC-TEG}	: TEG çıkış akımı, [A]
I_{DC-TEGS}	: TEG sistemi çıkış akımı, [A]
I_{GEN}	: Generator akımı, [A]
I_{max}	: TEG maksimum akımı, [A]
I_{load}	: Yük akımı, [A]
I_s	: Boost konvertör giriş akımı, [A]
K_{th}	: Isıl iletkenlik sabiti, [W.K ⁻¹]
m	: Suyun kütlesi, [kg]
M	: TEG sistemi toplam maliyeti
$\dot{m}_{CW}$	: Soğutma suyu kütle akış hızı, [kg.s ⁻¹]
$\dot{m}_{GB}$	: Jeotermal akışkanın kütle akış hızı, [kg.s ⁻¹]
$\dot{m}_{in}$	: Giriş kütle akış hızı, [kg.s ⁻¹]
$\dot{m}_{out}$	: Çıkış kütle akış hızı, [kg.s ⁻¹]
$\dot{m}_{R245fa}$	: R245fa kütle akış hızı, [kg.s ⁻¹]
n_{string}	: Paralel bağlı dizi sayısı
n_{TEG}	: Seri bağlı TEG sayısı
N_P	: Paralel bağlı modül sayısı
N_S	: Seri bağlı modül sayısı
N_T	: TEG sistemindeki toplam modül sayısı
P₁	: Jeotermal akışkan giriş basıncı, [kPa]
P₂	: Jeotermal akışkan reenjeksiyon basıncı, [kPa]
P₇	: Soğutma suyu giriş basıncı, [kPa]
P₈	: Soğutma suyu çıkış basıncı, [kPa]
P_{con}	: Kondenser basıncı, [kPa]
P_{ev}	: Evaporator basıncı, [kPa]
P_{max}	: TEG maksimum gücü, [W]
P_o	: Çıkış gücü, [W]
Q_{ht}	: Toplam ısı gücü, [W]
$\dot{Q}_{in}$	: Birim zamanda ısı enerji girişi, [kJ.s ⁻¹]
$\dot{Q}_{in,GB}$	: Birim zamanda jeotermal su ısı enerji girişi, [kJ.s ⁻¹]
$\dot{Q}_{in,R245fa}$	: Birim zamanda R245fa ısı enerji girişi, [kJ.s ⁻¹]
$\dot{Q}_{out}$	: Birim zamanda ısı enerji çıkışı, [kJ.s ⁻¹]
$\dot{Q}_{out,CW}$	: Birim zamanda soğutma kulesi ısı enerji çıkışı, [kJ.s ⁻¹]
$\dot{Q}_{out,R245fa}$	: Birim zamanda R245fa ısı enerji çıkışı, [kJ.s ⁻¹]

Q_w	: Suyu ısıtmak için gerekli enerji [J]
R_{ac}	: TEG iç direnci, [Ω]
R_{GEN}	: Generator direnci, [Ω]
R_{in}	: TEG iç direnci, [Ω]
R_L	: Yük direnci, [Ω]
R_t	: Isıl direnç, [$K.W^{-1}$]
s	: Özgül entropi, [$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$]
S	: Seebeck sabiti [$V.K^{-1}$]
T	: TEG sistemi yatırımı geri dönüş süresi
T_1	: Jeotermal akışkan giriş sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
T_2	: Jeotermal akışkan reenjeksiyon sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
T_7	: Soğutma suyu giriş sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
T_8	: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
T_{amb}	: Ortam sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
T_{ave}	: Ortalama sıcaklık, [$^{\circ}C$]
T_c	: TEG soğuk yüzey sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
T_h	: TEG sıcak yüzey sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
T_{max}	: Maksimum çalışma sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
$T_{pp,con}$	: Kondenserin temas noktasındaki sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
$T_{pp,ev}$	: Evaporatorun temas noktasındaki sıcaklığı, [$^{\circ}C$]
U_{DC-s}	: Seri bağlı TEG'lerin DC hat gerilimi, [V]
U_{DC-TEG}	: TEG DC gerilimi, [V]
U_{inv-AC}	: İnvertör AC gerilimi, [V]
U_{inv-DC}	: İnvertör DC gerilimi, [V]
U_{load}	: Yük gerilimi, [V]
U_o	: TEG sistemi tasarım çıkış gerilimi, [V]
U_{GEN}	: TEG sistemi reel çıkış gerilimi, [V]
U_{max}	: TEG maksimum gerilim değeri, [V]
U_{SR}	: Şarj regülatörü gerilim değeri, [V]
V_a	: Boost konvertör çıkış gerilimi, [V]
V_s	: Boost konvertör kaynak gerilimi, [V]
$\dot{W}_{carnot}$	: Carnot gücü, [kW]
$\dot{W}_{gross}$	: Brüt güç, [kW]
$\dot{W}_{net}$	: Net güç, [kW]
$\dot{W}_p$	: Pompa gücü, [kW]
$\dot{W}_T$	: Türbin gücü, [kW]
$\$$	: Amerikan doları
₺	: Türk lirası
ϵ_{con}	: Kondenserin etkinliği
ϵ_{ev}	: Evaporatorun etkinliği
η_{max}	: Maksimum verim, [%]
$\eta_{p,s}$	: Pompanın izantropik verimi [%]
$\eta_{T,s}$	: Türbinin izantropik verimi [%]
$\eta_{th,ORC}$	: ORC'nin ısı verimi [%]
$\eta_{th,s}$	: Carnot verimi [%]
ΔT	: Sıcaklık farkı, [$^{\circ}C$]
$\Delta T_{pp,con}$	: Kondenser için temas noktası sıcaklık farkı, [$^{\circ}C$]
$\Delta T_{pp,ev}$	: Evaporator için temas noktası sıcaklık farkı, [$^{\circ}C$]

KISALTMALAR LİSTESİ

AC	:	Alternative Current
AIGK	:	Atık Isı Geri Kazanımı
CFD	:	Computational Fluid Dynamics
DC	:	Direct Current
DI	:	Digital Input
DO	:	Digital Output
EES	:	Engineering Equation Solver
EMK	:	Elektromotor Kuvvet
FOM	:	Figure of Merit
FV	:	Fotovoltaik
GPP	:	Geothermal Power Plant
IoT	:	Internet of Things
JES	:	Jeotermal Enerji Santrali
JES-TEG	:	Jeotermal Enerji Santrali-Termoelektrik Generator
KAR	:	Kaçak Akım Rölesi
KC	:	Kalina Cycle
KGK	:	Kontrollü Gerilim Kaynağı
MCB	:	Miniature Circuit Breaker
ORC	:	Organic Rankine Cycle
PLC	:	Programmable Logic Controller
PVGIS	:	Photovoltaic Geographical Information System
PVKS	:	PLC Tabanlı Veri İzleme ve Kontrol Sistemi
SISD	:	Sıcak Su Dönüş Sıcaklığı
SISDB	:	Sıcak Su Dönüş Basıncı
SISG	:	Sıcak Su Geliş Sıcaklığı
SISGB	:	Sıcak Su Geliş Basıncı
SIST	:	Sıcak Su Tank Sıcaklığı
SOSD	:	Soğuk Su Dönüş Sıcaklığı
SOSDB	:	Soğuk Su Dönüş Basıncı
SOSG	:	Soğuk Su Geliş Sıcaklığı
SOSGB	:	Soğuk Su Geliş Basıncı
SOST	:	Soğuk Su Tank Sıcaklığı
SSR	:	Solid State Relay
TCMB	:	Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası
TEG	:	Termoelektrik Generator
TES	:	Termoelektrik Soğutucu
YEK	:	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YEKDEM	:	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

ÖNSÖZ

Özel sektörde çalışırken doktora eğitimi yapmamı teşvik eden, ders aşamasından başlayarak mezuniyete kadar tüm aşamalarda her türlü yardımını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini paylaşan tez danışmanım Doç. Dr. Engin ÇETİN'e, doktora tezinin ilerlemesinde bilgi ve tecrübeleriyle yönlendirmeler yapan, yüksek lisans eğitimimden danışmanım olan Prof. Dr. Bekir Sami SAZAK'a, tez kapsamında kurulan deney setinin tasarım, kurulum, analiz ve deney aşamalarında destek veren Prof. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU'na, simülasyon, deney seti elektrik tesisatı ve güç elektroniği konularında yaşanan sorunları aşmamıza yardım eden Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na, deneylerin yapılması sırasında stratejik yönlendirmeler yapan, hesaplama ve analiz konularında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet YILANCI'ya, çalışmaya tezin savunulması aşamasında katılıp yapıcı önerilerde bulunan Prof. Dr. Yusuf ÖNER ve Prof. Dr. Yüksel OĞUZ'a teşekkür ederim.

Bu tez kapsamında kurulan deney setinin cihaz ve ekipmanları 2017FEBE027 no'lu Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında temin edildiğinden, PAÜ BAP Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Doktora eğitimim devam ederken 6 yıl boyunca çalıştığım firma olan Jeoden JES Elektrik Üretim A.Ş. yöneticilerine, personellerine ve Genel Müdürü Hasan ÖZDEN'e, doktora eğitimimin son 4 yılında Öğretim Görevlisi olarak görev yaptığım Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi TBMYO öğretim elemanlarına, akademik konularda destek veren Doç. Dr. Mustafa Ünal'a, TBMYO Müdürü Prof. Dr. Oktay TALAZ'a teşekkür ederim.

Üniversite-Sanayi iş birliğinin gelişmesine katkıda bulunmak amacıyla, yoğun iş dönemlerinde zaman ayırarak, deney setinin kurulumuna titizlikle destek veren ısıger Mühendislik firmasından Umut GERELİOĞLU'na, Ramazan GÜRLER'e ve diğer firma çalışanlarına teşekkür ederim. Elektrik panosu montajına katkı koyan Elk. Tkr. Levent ERBİL'e, termoelektrik generatorler üzerine uzmanlığına başvurduğum Gazi Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Raşit AHISKA'ya teşekkür ederim.

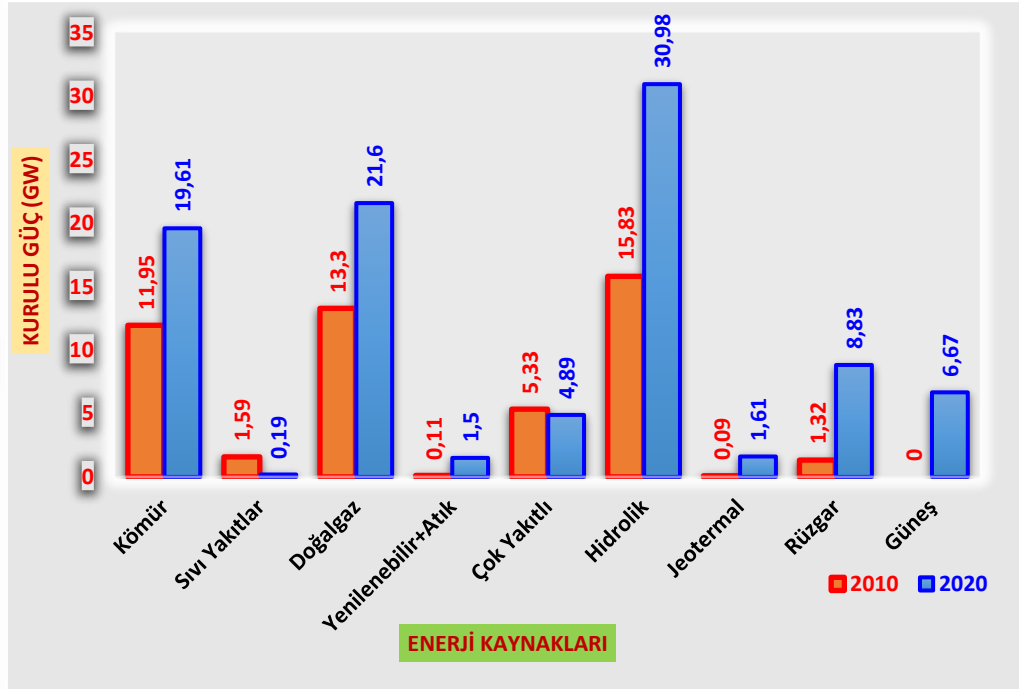
Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekte bulunan rahmetli anneme ve babama, abilerime ve ablama, çalışma ve eğitim hayatım boyunca sabır ve desteğini yanımda hissettiğim sevgili eşim Dilek HEKİM'e, canım çocuklarım Umut ve Dilay'a teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, tüm dünyada enerji sektörü üzerine yapılan çalışmalar, artan bir ivme göstermiştir. Enerji sektörü içerisinde de özellikle fosil yakıtlara dayalı geleneksel ısı enerjisi üretim sistemlerine göre daha rekabetçi unsurlara sahip olan yenilenebilir enerji teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Eldeki veriler, yenilenebilir enerji sistemlerinin tüm dünya için, enerji üretiminde güçlü bir rol üstlendiğini göstermektedir (REN21 2020). Yenilenebilir enerji teknolojileri arasında, tüm yıl boyunca enerji üretimine uygun olan Jeotermal Enerji Sistemleri tercih edilen sistemler arasında yer almaktadır (IRENA 2017). Hazırlanan enerji senaryolarına göre, 2030 yılında tüm dünyadaki jeotermal enerji santrallerinden 282 TWh elektrik enerjisi üretilmesi öngörülmüştür (IEA 2021). Dünyada enerji ihtiyacının sürekli artmasına karşılık, her türden fosil ve yenilenebilir enerji üretim kaynakları ile enerji talebinin karşılanmasına çalışılmaktadır. Bu bağlamda da, son yıllarda ülkemizde jeotermal enerjinin, Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücündeki ve toplam enerji üretimindeki payı artış göstermektedir. Bu durum, Şekil 1.1’de görülmektedir. Ülkemiz, jeotermal enerji santrali kurulu gücünde dünyada ilk beş ülke arasına girmiştir (Enerji Atlası 2021).

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de elektrik enerjisine olan talebin artması, beraberinde enerji üretim kaynaklarının çeşitlendirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu bağlamda, ülkemizdeki jeotermal sahalarda kurulumu yapılan jeotermal santrallerin kurulu güçleri de artış göstermiştir. Santral kapasitelerinin artmasıyla birlikte, kurulumu yapılan santrallerin daha verimli bir şekilde çalıştırılma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durum; santral tasarımcılarının, enerji üretiminde kullanılan jeotermal akışkanın üretim sonrası reenjeksiyon kuyusu üzerinden rezervuara geri gönderilmeden önce atık ısısından yeniden elektrik enerjisi üretimi üzerine yoğunlaşmalarına neden olmuştur. Jeotermal akışkanın atık ısısından elektrik enerjisi üretim metodlarından birisi de, bu çalışmanın konusunu oluşturan Termoelektrik Generatorlerin (TEG) mevcut santral yapısına entegrasyonu şeklinde ifade edilebilir. Jeotermal santral soğutma suyu ile üretimde kullanılan jeotermal akışkanın, oluşturulacak TEG sistemi üzerinden geçirilmesi, reenjekte edilen jeotermal akışkanın

atık ısısının elektrik enerjisi üretiminde kullanılmasını, böylelikle jeotermal santralden daha fazla elektrik enerjisi üretimi yapılarak santralin daha verimli bir şekilde işletilmesini sağlayacaktır. İlerleyen bölümlerde bu husus, detaylı bir şekilde ele alınmıştır.



Şekil 1.1: Enerji üretim kaynakları baz alındığında 2010 ve 2020 yıllarına ait Türkiye’deki elektrik enerjisi santral kurulu güçleri (TEİAŞ 2021).

1.1 Genel Bilgiler ve Literatür Araştırması

Bilindiği üzere, jeotermal enerji santrallerinin verimleri en fazla %20 olarak raporlanmıştır (Zarrouk ve Moon 2014). Bu noktada, jeotermal enerji santrallerinin verimlerini arttırmak için, bir takım ilave sistemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birisi de, jeotermal enerji santrallerine ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren TEG entegrasyonudur (Kumar ve diğ. 2019). Çevre dostu birer katı hal ısııl enerji dönüştürücüsü olan TEG’ler, Seebeck Etkisi olarak adlandırılan prensibe göre, her iki yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkından doğru akım karakteristikli elektrik enerjisi üreten yapılardır (Fathabadi 2019). TEG’ler, iki seramik plaka arasına yerleştirilmiş termokupllardan oluşan yarı iletken yapılardır (Ramirez ve diğ. 2019). Hareketli parçaları olmadığı için, çok az bakım gerektirirler

(Elankovan ve diğ. 2019). Seebeck Etkisi'ne göre; iki farklı yarıiletken malzeme birleştirilip, eklem adı verilen bu birleşim noktalarına farklı sıcaklık değerleri uygulandığında, yarıiletken yapı gerilim üretir (Kanimba ve Tian 2016). Üretilen gerilimin değeri, sıcak ve soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkı büyüdükçe artar. Bununla birlikte, TEG'lerin sıcaklık iletimlerinin lineer olmamasından dolayı, elektriksel çıkış güçlerini de modellemek güçtür (Wang ve diğ. 2019). Bir TEG'in çıkış gücü ve verimi arttırılmak istenirse, TEG'in sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı da arttırılmalıdır (Zheng ve diğ. 2019).

TEG'lerden ısı etki ile elektrik enerjisi üretimi üzerine, literatürde yer edinmiş pek çok çalışma mevcuttur. Aşağıda, bu hususta güncelliğini koruyan çalışmalara ilişkin bir literatür derlemesi sunulmuştur.

Dişlitaş'ın (2002) çalışmasında, jeotermal enerjiden elektrik enerjisi elde etmek amacıyla TEG sistemi kurulumu gerçekleştirilmiş ve bu TEG sisteminin kontrolü de mikrodenetleyici ile yapılmıştır. Termoelektrik yarıiletkenlerden oluşan TEG'ler kullanılarak Seebeck Etkisi ile elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir. Termoelektrik modülden elektrik üretilmesi için gerekli olan sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı, ısı su ve soğuk su akışıyla sağlanmıştır. Termoelektrik modüllerden, yüzeyleri arasında sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak değişen DC gerilim elde edildiği bilgisinden hareketle, TEG sisteminin çıkışını 5 V DC, 12 V DC, yük bağlantı kısmını da 220 V AC değerlerinde elde edebilmek için regüle ve evirici devreler kullanılmıştır. Bu kriterlerde elektrik enerjisinin üretilmesinin jeotermal kaynağa sahip bölgelerde TEG sistemi ile yapılabileceği önerilmiştir.

Mamur (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; TEG modüllerden oluşan, TEG-PAS olarak adlandırılan sistemin kurulumu gerçekleştirilmiş, sistem datalarının takibi ve testleri yapılmıştır. Bu TEG sisteminin elektriksel verilerini ve bu elektriksel verileri etkileyen ısı verilerin takibi için PLC otomasyon sistemi kullanılmıştır. Bu sistem başarılı bir şekilde çalıştırılıp, elde edilen verilerin değerlendirilmesi Matlab & Simulink ortamında yapılmıştır. İzleme sistemindeki verilerle benzetim verileri değişik sıcaklık farkları (ΔT) için karşılaştırılmıştır. TEG sisteminin tüm parametreleri, kurulumu tamamlanan TEG-PAS sistemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen enerji miktarına göre ve kapladığı alana göre TEG ve Fotovoltaik (FV) panel karşılaştırması yapılmıştır. Ticari ve taşınabilir özellikteki TEG sisteminin düşük sıcaklıklı jeotermal alanlarda uygulanabilmesi için altyapı hazırlığı yapılmıştır.

Xie ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, deniz tabanındaki hidrotermal deliklerin yüksek sıcaklıkları nedeniyle oluşan ısı enerjisinin kullanılmasını hedeflemişlerdir. Bu amaçla, bir ısı borusu aracılığıyla hidrotermal akışkanlardan ısı enerjisi toplayan ve termoelektrik jeneratörlerle ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir termoelektrik dönüştürücü geliştirmişlerdir. Çalışmada, termoelektrik dönüştürücünün sürekli olarak bir veri kaydedicisine ve bir led lambaya enerji vermesini sağlayan bir güç yönetim sistemi tasarlamışlardır.

Neamtu ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli yedekleme sistemleri için maksimum güç noktası izleyicisi ve bir Li-ion pil modülüne sahip düşük güçlü bir elektrik üretim sistemi önerilmiştir. Sistemde, TEG'ler vasıtasıyla ev ısıtması için kullanılan jeotermal akışkandan elektrik enerjisi üretilmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen modelin özellikle güvenlik ve izleme sistemleri gibi düşük güç talebi olan sistemler için kullanışlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Suryawanshi ve diğ. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Seebeck Etkisi prensibi ile çalışan termoelektrik modüller kullanılarak, içten yanmalı motorlardaki egzoz gazı sıcaklığı ile sistem üzerinden akan soğutma sıvısı arasındaki sıcaklık farkından faydalanmak suretiyle elektrik üretimi yapan bir TEG sistemi tasarlanmıştır. Tasarımda ihtiyaç olunan ısıtma ve soğutmayı sağlamak için, modüllerin her iki tarafında ısı eşanjörleri kullanılmıştır. Sistemin ana teması; bir pili şarj etmek için gerekli olan optimum miktardaki elektrik enerjisinin üretimi için, atık enerjiyi değerlendirebilen TEG'lerden yararlanılabileceği şeklindedir. Böylelikle, yakıt tüketiminin yanı sıra sera gazı emisyonunun da azaltılabileceği ön görülmektedir.

Gholamian ve diğ. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, jeotermal kaynaklı bir Organik Rankine Çevriminin (ORC – Organic Rankine Cycle) performansını arttırmak için, atık ısının bir kısmının güç ve/veya hidrojen üretimi için kullanılarak geri kazanıldığı iki yeni sistem önerilmiştir. İlk önerilen sistemde, ORC çevriminde kullanılan jeotermal akışkanın dönüş suyundaki atık ısının bir kısmının termoelektrik generator kullanılarak elektrik enerjisi üretimiyle geri kazanılabileceği savunulmuştur. İkinci önerilen sistemde termoelektrik generator tarafından üretilen ek gücün, hidrojen üretimi için proton değişim membran elektrolizöründe kullanılması planlanmıştır. Önerilen sistemlerin performansları; enerji, ekserji ve eksergoekonomik bakış açılarıyla incelenmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçların çok amaçlı

optimizasyonu ile; önerilen sistemlerin ekserji verimlerinin, temel ORC çevriminden %21,9 ve %12,7 oranında daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Islam ve diğ. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki farklı termoelektrik jeneratör konfigürasyonuna sahip, güneş enerjisine dayalı, güneş kollektörleri tarafından tahrik edilen, entegre çoklu üretim sisteminin karşılaştırmalı enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk konfigürasyonda, TEG'leri parabolik güneş kollektörleriyle ORC arasına dahil ederek çalışmalar yapılmıştır. Termoelektrik generatorlerin yüksek sıcak bağlantısı güneş kollektörleri çıkışına bağlı iken, ORC çalışma sıvısı R113, atık ısıyı korumak ve ilave elektrik üretmek için düşük sıcaklık bağlantısı boyunca dolaştırılmıştır. İkinci konfigürasyonda ise ilk konfigürasyondan farklı olarak TEG'lerin yüksek sıcak bağlantısı güneş kollektörü çıkışındaki güneş ısı eşanjörü üzerinden sağlanmıştır. Her iki konfigürasyonda TEG'ler tarafından üretilen elektrik; hidrojen üretmek için kullanılarak ORC'nin enerji ve ekserji verimliliği arttırılmıştır.

Rodrigues ve diğ. (2018), kompostlama işlemleri sırasında açığa çıkan ısı enerjisi toplayan bir termoelektrik ısı geri kazanım sistemi ile ilgili deneyler yapmışlardır. Çalışmada yer alan ısı geri kazanım yapısında, kompostlama sistemlerinin altyapısı ile mimari bir çerçeve elde etmek için geliştirilen 0,5 m²'lik 120 adet adet ticari TEG kullanılmıştır. TEG sistemi ile; 20 °C'lik bir sıcaklık gradyanında 500 Ω'luk bir yük direnci için yaklaşık 11.3 V'luk gerilim, maksimum 18.5 mA'lik akım ve yine maksimum 175 mW/m²'lik güç yoğunluğu elde edilmiştir.

Zare ve Palideh'in çalışmalarında (2018), jeotermal gibi düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklardan enerji üretimi için en uygun seçeneklerden birisinin Kalina Çevrimi (KC – Kalina Cycle) olduğundan ve ısıyı doğrudan elektriğe dönüştürmek için TEG kullanımının son zamanlarda yaygınlaştığından bahsedilmiştir. Çalışmada, KC'nin atık ısısının termoelektrik jeneratörler ile kullanılma olasılığı üzerinde durulmuştur. Bu bağlamda; önerilen sistem modellenmiş, analiz edilmiş ve geleneksel KC performansı ile karşılaştırılmıştır. Sistemlerin performanslarını değerlendirmek için termodinamik ve ekonomik modeller geliştirilmiş ve parametrik çalışmalar yapılmıştır. Neticede; tipik çalışma koşullarında, geleneksel KC'ye kıyasla önerilen sistem için net çıkış gücü, enerji ve ekserji verimliliğinde yaklaşık %7,3'lük bir artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Catalan ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, sıg sıcak kuru kayalık alanlarda jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi üretmek için termoelektrik generatorleri kullanan bir prototip geliştirilmiştir. Geliştirilen 2 adet TEG içeren, 2 fazlı kapalı termosifon prototip ile, $\Delta t = 180$ °C sıcaklık farkı için TEG başına 3,29 W elektrik enerjisi üretilmiştir. Sistemin düşük termal direnci ve yardımcı enerji tüketimi gerektirmemesi nedeniyle, bu tür jeotermal alanlardan elektrik enerjisi üretmek için TEG'ler iyi bir alternatif olarak sunulmuştur.

Computational Fluid Dynamics (CFD) yazılımı modellemesi kullanarak üç boyutlu yeni bir TEG modeli üzerine yapılan çalışmada, ısı ve elektrik modellerin birleşiminden oluşan TEG modülünün fiziksel modeli için bir çözüm sunulmuştur (Eldesoukey ve Hassan 2019). Çalışmada, üç boyutlu TEG'den oluşturulan fiziksel modelde TEG'ler baca duvarına monte edilmiştir. Baca duvarına monte edilen TEG'in performansı üzerindeki akış rejimlerinin etkisini incelemek için üç boyutlu model kullanılmıştır. Baca içindeki ve dışındaki sıcak akışkan gazların ve soğutucu havanın giriş akış hızının, TEG'in ısı transferi ve çıkış gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Soğutucu hava hızını artırmadan sıcak akışkan gazların giriş hızını artırmanın veya tersini yapmanın TEG çıkış gücü üzerinde büyük bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Aynı toplam akış hızında TEG'in soğuk tarafının ısı transferinin sıcak tarafa kıyasla TEG çıkış gücü üzerinde daha etkili olduğu gözlenmiştir.

Rattner ve Meehan (2019) tarafından yapılan çalışmada, Atık Isı Geri Kazanımı (AIGK) uygulamalarında yaygın olarak kullanılan TEG'lerden maksimum düzeyde güç çıkışı elde edilebilmesi için gerekli olan modül sayısı ve modül konfigürasyonuna dair önerilerde bulunulmuştur. Çalışmada, AIGK sistemlerini tanımlamak ve en uygun TEG modülü dizi boyutunu tahmin etmek için, basit bir analitik model oluşturulmuş, oluşturulan modelin, karmaşık hesaplamalı ve deneysel yaklaşımlarla geliştirilebilen AIGK sistem tasarımlarına rehberlik edebileceği vurgulanmıştır.

Catalan ve diğ. (2020) tarafından, volkanik patlamaları tahmin etmekte kullanılan volkanik izleme istasyonlarına güç sağlamak için, bir termoelektrik sistem tasarlanmıştır. Isı eşanjörlerinden, TEG'lerden ve ilgili elektronik devrelerden oluşan entegre sistem, nesnelerin interneti teknolojileri (IoT) kullanılarak geliştirilmiştir. Böylece, volkanik kızgın sulardan yayılan ısı TEG'ler ile elektrik enerjisine dönüştürülmüş, farklı sensörlere güç veren sürekli bir üretim sağlanmıştır. 14

kilometreden fazla mesafeden veri toplama ve iletişim talebini karşılamak için; yalnızca 1 adet TEG modülü ile, 51,5 °C'lık bir ΔT sıcaklık farkında 0,49 W enerji üretilmiştir.

Gunay ve diğ. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, TEG maliyetinin sıcaklık farkına (ΔT) bağımlılığı incelenmiştir. Ölçüm yapılan TEG santralin maliyeti, termoelektrik blokların maliyeti ile şebekeye bağlı invertörün maliyetinden oluşturulmuştur. ΔT 'ye bağlı olarak geri ödeme süresi, 5 yıllık bir garanti süresi, 1250 \$/kW maliyet ve kWh başına \$0.133 gelir varsayılarak maliyet hesabı yapılmıştır. ΔT 'deki artışla geri ödeme süresinin hızla azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada, $\Delta T = 100$ °C iken, modül başına üretilen güç 7,6 W ve termal verimlilik %4,2 olarak gösterilmiştir. Temas sorunları ortadan kaldırıldığında 20 modülden 152 W güç değerine ulaşmanın mümkün olduğu belirtilmiştir. Bu durumda geri ödeme süresinin 7,1 yıl olacağı tahmin edilmiştir. $\Delta T = 200$ °C olduğunda ise bu sürenin 1,7 yıla düşeceği tahmin edilmiştir.

Khanmohammadi ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, proton değişim membran yakıt hücresi, TEG'ler ve Organik Rankine flaş döngüsü tabanlı entegre bir jeotermal sistem önerilmiştir. Entegre sistem termodinamik olarak modellenmiş ve sonuçları geleneksel sistemle karşılaştırılmıştır. TEG'leri kullanmanın birinci ve ikinci yasa verimliliklerini sırasıyla %2,7 ve %2,8 arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Kuhite ve diğ. (2020) tarafından, atık ısı ve termoelektrik generator kombinasyonlarını kullanarak elektrik üretimi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, iki tekerlekli araçların susturucusundan çevreye atık ısı olarak dağılan ısı enerjisinin, TEG'ler vasıtasıyla elektrik üretimi için kullanılabileceği savunulmuştur. Çalışma sonucunda, termoelektrik generatorlerin ve ısı borularının birlikte kullanımının, özellikle de baca gazlarını filtre eden susturuculardan atık ısı geri kazanımı ve bu yolla elektrik üretimi için TEG kullanımının, teknolojik anlamda son derece umut vaat eden teknolojiler olduğuna vurgu yapılmıştır.

Liu ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, petrol ve gaz endüstrisinde kuyu içi sensörler ve kontrol araçları için sağlam ve güvenilir kuyu içi güç kaynağı ihtiyacını karşılamak amacıyla proje geliştirilmiştir. Rezervuardan üretilen akışkanın termoelektrik teknolojisi ile elektrik gücüne dönüştürülebilen ısı enerjisi taşıdığı belirtilmiştir. Kuyu içi ortamda yerinde güç üretimini gerçekleştirmek için bir

rezervuardan gelen sıcak akışkan, TEG'in sıcak tarafı için ısı kaynağı olarak, yüzeyden kuyuya enjekte edilen soğuk sıvıyı ise TEG'in soğuk tarafı için soğuk su kaynağı olacak şekilde tasarım geliştirilmiştir. Böylelikle, petrol kuyularında kuyu içi güç üretimi için TEG teknolojisini kullanan bir prototip tasarlanmıştır.

Malik ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, düşük sıcaklıkta birincil enerji kaynağı olarak jeotermal enerjinin kullanıldığı KC tabanlı bir sistemin performansı incelenmiştir. Çalışmada, sistemde boşa harcanan ısıyı geri kazanmak ve ekstra miktarda elektrik üretmek için bir termoelektrik generator kullanılarak daha yüksek verim eldesi amaçlanmıştır. Buhar çevrimi ve KC için sırasıyla jeotermal su ve su-amonyak karışımı olmak üzere iki tip akışkan kullanılmıştır. Temel KC sistemi, TEG'li KC sistemi, TEG ve Proton değişim membran yakıt hücresi ile entegre KC sistemi olmak üzere üç sistem konfigürasyonu üzerinde karşılaştırmalı bir performans analizi yapılmıştır.

Li ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, bir TEG sisteminden elektrik üretim sistemi yapmak için gerekli olan ana parçaların maliyetleri hesaplanmıştır. TEG sisteminin toplam maliyeti, parça maliyetlerine ve Bottle Rock Jeotermal Santrali, California, ABD'de yapılan saha testlerinin verilerine göre tahmin edilmiştir. Toplam maliyet farklı sıcaklıklarda değerlendirilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda, bir TEG enerji üretim sisteminin toplam maliyetinin düştüğü gözlemlenmiştir. TEG cihazının maliyetinin, sıcak ve soğuk akışkan arasında 152 °C'lik bir sıcaklık farkı varken, 13.900 \$/kW civarında olacağı hesaplanmıştır. Spesifik sıcaklık farkında geri ödeme süresi yaklaşık 8,4 yıl olarak tahmin edilmiştir. TEG sistemlerinin hem maliyetinin hem de geri ödeme süresinin sıcaklık farkının artmasıyla azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Termoelektrik malzemelerin iyileştirilmesi ve FOM değerinin artmasıyla birlikte, TEG tarafından kW başına güç üretim maliyetinin önemli ölçüde azalacağını iddia etmişlerdir.

Ding ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, termoelektrik generatorler, jeotermal enerjinin geliştirilmesi için potansiyel bir alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Üretilen jeotermal akışkan ile büyük ölçekli, zemin tabanlı ve parçalı dairesel eş merkezli silindirik termoelektrik generatorlerin tasarımı önerilmiştir. Termoelektrik modülün içindeki ısı transferini ve elektrik akımı etkisini dikkate alan ve Engineering Equation Solver (EES) yazılımı ile çözülen termoelektrik enerji üretimi için matematiksel bir model sunulmuştur. 130°C'lik giriş sıvısı sıcaklık

farkı altında 500 m uzunluğunda segmentli dairesel eş merkezli silindirik termoelektrik generatorler ile yaklaşık 136 kW güç çıkışının elde edilebileceği iddia edilmiştir. Çalışma sonucunda jeotermal akışkanın akış hızı ve sıcaklığının termoelektrik generator çıkış gücü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

TEG'lerin iki yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkı kullanılarak elektrik enerjisinin üretilbildiği farklı çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmada ve örnek çalışmalarda; genellikle TEG modüllerinin düşük verimli olmalarına rağmen orta ve uzun vadede yapılacak araştırmalar neticesinde verimlerinin artabileceği, maliyetlerinin düşme eğiliminde olabileceği, işletme ömürlerinin de uzun olduğu belirtilmiştir. TEG'lerin endüstriyel sistemlerde kullanımı noktasında; genellikle, elektrik enerjisi üretim imkanlarının kısıtlı olduğu, enerji üretim maliyetlerinin daha az dikkate alındığı, çoğunlukla doğada mevcut bulunan ısı enerjisinden ve atık ısı enerjisinden yararlanılan, kesintisiz enerji elde edilebilecek çalışmalar yapılmıştır. Sunulan bu çalışmada, Jeotermal Enerji Santrali-Termoelektrik Generator (JES-TEG) hibrit enerji sisteminin tasarlanması, benzetimi, PLC Tabanlı Veri İzleme ve Kontrol Sistemi (PVKS) ile takip ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen bu sistem jeotermal tesiste çalışabilir özelliklere sahip olmasının yanında, laboratuvar deney seti olarak da kullanılabilir. Bu çalışmadaki TEG sisteminde, sıcak ve soğuk su akış hızları; 0,2 kg/s, 0,3 kg/s ve 0,4 kg/s iken, ΔT sıcaklık farkının; 50 °C, 60 °C, 70 °C ve 80 °C değerleri için ayrı ayrı olmak üzere, akışkan hızlarının gerilim ve güç çıkışlarına etkisinin görülmesi amacıyla özgün deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, daha yüksek kütle akış hızları ve sıcaklık farklarının TEG sistemi gerilim ve güç çıkışlarını arttırdığı gözlenmiştir. Bilinen literatür bilgisinden farklı olarak; mevcut bir JES'in işletme şartları altında, tasarlanan TEG sisteminin çalıştırılması ile ilgili termodinamik modellemeler geliştirilmiş, parametrik enerji analizinden TEG sistemi sıcak yüzeyinin ısıtılmasında kullanılan reenjekte jeotermal akışkanın sıcaklığının artmasıyla TEG'lerin güç çıkışının arttığı, ancak ORC'nin net gücünün azaldığı sonucuna varılmıştır. Yine elde edilen analiz sonuçlarına göre; TEG sistemi soğuk yüzeyinin soğutulmasında kullanılan soğutma suyunun sıcaklık değerinin düşmesi ile birlikte, ORC'nin ve TEG'lerin güç çıkışının da arttığı gözlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Jeotermal santrallerde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan jeotermal akışkan, enerji üretimi sonrasında, hem jeotermal döngünün sürdürülebilirliğinin sağlanması, hem de yoğun mineral içermesi sebebiyle çevre kirliliği yaratmaması için, santral sahasındaki reenjeksiyon kuyusuna pompalanır. Jeotermal santrallerde enerji üretimi sonrasında reenjeksiyon kuyusuna pompalanan jeotermal akışkan, bu işlemde önce TEG'lerden geçirilerek, yeniden elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir. Bu akışkan bir tür atık ısı enerjisi bünyesinde barındırır. TEG'ler de bu türden bir atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar (Ma ve diğ. 2019). Atık ısı enerjisinin TEG'lerde kullanılmasıyla, jeotermal santral verimi de arttırılabilir (Hekim ve Cetin 2019).

Bu çalışmada, gerçekleştirilen TEG sistemi ile jeotermal kaynak bulunan tesislerde atık ısı kullanılarak; temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi mümkün olabilmektedir. Bu özelliğiyle sunulan TEG sisteminin, bu alanda yapılan çalışmalara örnek teşkil etmesi hedeflenmiştir.

Enerji, hayatımızın en önemli unsurlarından birisidir. İnsan hayatının önemli gereklilikleri arasında bulunan enerjinin; temin edilmesi, üretimi ve iletimi oldukça yüksek maliyetlidir (Cetin ve diğ. 2013). Bu sebeple kısıtlı, pahalı ve temini zor olan enerjinin, gerekli olduğu yerde etkin bir şekilde kullanılmasına dikkat edilmeli, enerjinin verimli kullanımına yönelik yöntemler geliştirilmeli, enerji tasarrufuna yönelinmeli ve çevre dostu, alternatif enerji kaynaklarının kullanımı artırılmalıdır (Hekim ve Cetin 2018). Bu tez çalışması ile de yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle jeotermal enerji kaynaklarının kullanımının arttırılması ve jeotermal kaynaklı sistemlerde atık ısının enerjisinin geri kazanımı amaçlanmıştır.

Jeotermal enerji, tekniğe uygun kullanılması halinde çevreye en az düzeyde zararı olan, enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunan enerji kaynakları arasında yer alır (Cetin ve diğ. 2013). Jeotermal enerjiden farklı yöntemlerle elektrik enerjisi üretilmektedir. Düşük sıcaklıktaki kaynaklardan da ORC sistemi haricinde, TEG modüllerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan TEG sistemleri ile elektrik üretimi yapılabilmektedir (Dişlitaş 2002). TEG'ler ile elektrik enerjisi üretilirken, fabrikalardan, enerji santrallerinden, ısı merkezlerinden veya endüstriyel cihazlardan dış ortama yayılan tüm ısı kaynakları kullanılabilir (Ahıska ve

diğ. 2011). Bu sayede enerji verimliliği arttırılabilmekte ve enerji üretimine katkıda bulunulabilmektedir.

Termoelektrik generatorlerde, termo-elemanlar gerilim çıkışını yükseltebilmek için seri, akım değerini yükseltebilmek için de paralel bağlanırlar. Verimleri çok düşük olarak bilinen modüllerin seri ve paralel olarak bağlanıp ısı değiştirici arasına yerleştirilmesi ile kullanım için gerekli olan gerilimlere ulaşılabilir (Hekim ve Cetin 2019). Kullanılan modül sayısı arttırılmak suretiyle jeotermal santralde kullanılan jeotermal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünde yükseliş sağlanabilir.

Bu çalışmada, düşük sıcaklıkta jeotermal kaynaklı JES’lerde elektrik üretimi amaçlı kullanılan jeotermal akışkanın, enerji üretimi sonrasında reenjeksiyon kuyusuna gönderilmeden önce Termoelektrik Generator Sistemi’nden geçirilerek ikinci kez elektrik enerjisi üretiminde kullanılması, böylelikle santral genel verimin arttırılması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla, bir JES-TEG hibrit enerji sistemi tasarlanmıştır.

Bu tez çalışması ile gerçekleştirilen TEG sistemi ile jeotermal kaynak bulunan tesislerde atık ısı kullanılarak; temiz, kurulum maliyeti haricinde maliyet yükü olmayan elektrik üretimi gerçekleştirilebilir.

1.3 Tezin Kapsamı

Yapılan bu çalışma, toplam yedi bölümden oluşmaktadır. Tezin ilk bölümü olan “Giriş” bölümünde; tezin amacından, öneminden ve literatürdeki yerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde genel olarak tez konusu hakkında yapılan ulusal ve uluslararası dergi makaleleri, sempozyum-kongre bildirileri ve lisansüstü tezlerle ilgili yapılan literatür araştırması ile edinilen bilgilerden bahsedilmiş, tezin genel bir tanıtımı yapılarak, çalışmada nihai olarak hedeflenen ana unsur irdelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının gerekliliklerinden, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yeri olan JES’lerin verimli çalışmasının öneminden ve çevrim tiplerine göre JES’lerin çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Yine bu bölümde TEG’ler hakkında genel bilgiler verilmiş, TEG’lerin seri ve paralel bağlantıları ile oluşturulan TEG

sistemlerinden, TEG sistemlerinin JES’lerde kullanılması ile oluşturulan JES-TEG hibrit sistem kazanımlarından söz edilmiştir.

Üçüncü bölümde, bu çalışma kapsamında kurulumu yapılan JES-TEG modelinin tasarım ve gerçekleştirme aşamaları anlatılmıştır. Sistemde kullanılan TEG modül katalog verileri kullanılarak yapılan tasarım hesaplamaları, tasarlanan sistemin TEG formülasyonlarından hareketle Matlab & Simulink modelinin oluşturulması, TEG konfigürasyonunun elde edilmiş safhaları anlatılmış ve benzetim sonuçları sunulmuştur. JES-TEG hibrit sisteminin kurulum aşamaları; tasarım, malzeme seçimi ve temini, montaj yöntemleri v.b. hususlar yönünden detaylandırılmıştır. Düzeneği kontrol eden PLC tabanlı veri toplama ve kontrol sisteminin kurulum aşamaları, PLC MicroWIN yazılımı ile TEG sisteminin kontrol ve takibinin yapılış safhaları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde kurulumu tamamlanan JES-TEG hibrit sisteminin devreye alınması safhaları, enerji üretim aşmasına geçişte karşılaşılan sorunların çözümüne yönelik faaliyetler, enerji üretiminin ardından elektriksel yüklerin seçilmesi, sonrasında TEG sistemi deneylerine geçilmesi gibi hususlara değinilmiş, deneysel çalışmanın safhaları, deneyler sırasında ölçülen veriler, bu verilerin değerlendirilmesi sonucunda oluşturulan grafik, tablo gibi detaylar sunulmuştur.

Beşinci bölümde, laboratuvar ortamında deneysel olarak çalışılan TEG sisteminden elde edilen verilerin, Denizli ili Sarayköy ilçesinde kurulu olan Jeoden JES’e uyarlanması için yapılan çalışmalardan bahsedilmiş, TEG sistemi ve JES verileri kullanılarak yapılan verimlilik analizlerinin metot ve sonuçları paylaşılmış, JES-TEG hibrit enerji sisteminden elde edilebilecek kazanımlar anlatılmıştır.

Altıncı bölümde kurulumu tamamlanan TEG sistemi ile ilgili teknik ve ekonomik bulgulardan bahsedilmiştir. Teknik olarak sistemin kurulumunda izlenen metotlar, sistemin diğer çalışmalardan ayrılan belirgin özelliklerine değinilmiş ve çalışmada izlenilen stratejiler açıklanmıştır. TEG konfigürasyonlarına bağlı olarak elde edilen elektriksel bulgular ile işletme şartlarının sistemde üretilebilecek enerji miktarına etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, sistemin maliyet verileri ve sistem gücüne göre yapılan yatırımın geri dönüş süresi açıklanmıştır. Sistemin mali geri dönüş süresi benzer çalışmalardaki verilerle karşılaştırılarak, farklılık arz eden

hususlar vurgulanmıştır. TEG sisteminin çalışma süresi ile ilgili bilgiler verilmiş, JES verilerinin bu süre üzerindeki etkileri yorumlanmıştır.

Yedinci bölümde tez çalışmasının konusunu oluşturan JES-TEG sisteminin tasarım ve kurulum aşamalarını, deney sonuç ve analizlerini kapsayan genel bir değerlendirme yapılmış, tez çalışması kapsamında konulan hedeflere ulaşıp ulaşılmadığı irdelenmiş, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, tez konusu ile ilintili olarak bundan sonra yapılabilecek çalışmalara yönelik sunulan öneri ve tahminler değerlendirilmiştir.

Ekler bölümünde ise, TEG sisteminde akışkan hızının değişiminin gerilim ve güç değerlerine etkisini gözlemleyebilmek amacıyla yapılan deneylere ait veri tabloları sunulmuştur. Yanı sıra, TEG sistemi verilerini izleyip, sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan, Siemens MicroWIN ortamında oluşturulmuş TEG sistem yazılımının tüm detayları verilmiştir.

2. JEOTERMAL SANTRALLER ve TERMOELEKTRİK GENERATORLER

Gelişmişlik düzeyiyle beraber artış gösteren elektrik enerjisi ihtiyacının, doğaya zarar vermeden karşılanabilmesi için arayışlar sürmektedir. Türkiye’de son yıllarda konvansiyonel enerji kaynakları olarak bilinen kömür, petrol ve doğalgaz gibi kaynaklarla üretim yerine, jeotermal, güneş, rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Günümüzde çevre kirliliğine yol açmayan, yatırım ve işletme maliyetleri düşük olan, temiz enerji olarak sınıflandırılan kaynaklarla elektrik üretim olanakları arayışı devam etmektedir. Yerküredeki ısının yer kabuğuna yayılımı yolu ile temin edilen jeotermal enerji, doğanın bizlere armağanı olarak nitelendirilebilecek enerji kaynakları arasında yer alır. Jeotermal enerji kullanarak elektrik üretimi yapan JES’ler de temiz, doğaya zarar vermeyen, uygun işletme koşulları sağlanarak sürdürülebilir özelliği olan elektrik üretim sistemleri arasında yer almaktadır.

Jeotermal enerji kaynaklarının sıcaklık, basınç ve debi gibi özellikleri değerlendirilerek kullanım alanları belirlenmektedir. Kaynağın fiziksel değerlerine göre elektrik üretiminde kullanılması tercih edilmekte, şehir ve bölge ısıtmasında, soğutma sistemlerinde, gıda kurutmasında, turizm ve sağlık amaçlı termal tesislerde ve birçok alanda jeotermal kaynaklardan doğrudan veya dolaylı olarak yararlanılmaktadır (Özdemir 2012).

Türkiye’de jeotermal kaynak verileri incelendiğinde, ORC çevrimi ile elektrik enerjisi üretilebilecek 100 °C sıcaklık değerinin üzerinde sıcaklık değerine sahip kaynakların oldukça fazla olduğunu görmekteyiz. Bu da bize, Türkiye’nin artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için kullanılabilecek önemli bir jeotermal potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Cetin ve Diğ. 2013).

Dünyada artış eğiliminde olan enerji ihtiyacının önemli bir kısmı, kısa bir zaman aralığında azalacağı ve/veya tükeneceği tahmin edilen fosil yakıtlardan karşılanabilmektedir. Tahmin edilen tükenme veya azalmanın gerçekleşmesini beklemeden alternatif enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilmesi için çalışma

yapılmalıdır. Günümüzde enerji üretiminde farklı enerji kaynaklarından yararlanılması da bu sebeptendir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretim arayışlarının arttığı son zamanlarda, jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça zengin bir ülke olan Türkiye’de, yenilenebilir enerjinin kullanım oranı da artmaktadır. Dünya jeotermal enerji kaynakları incelendiğinde, Türkiye’nin jeotermal enerji bakımından önemli bir potansiyele sahip ülkelerinden birisi olduğu görülmektedir. Bu durum Türkiye’ye, jeotermal enerji kaynağı kullanarak elektrik enerjisi üretimi yapma çalışmalarında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Türkiye, dünya yüzeyinin yalnızca %5’lik kısmında bulunan jeotermal kaynaklara sahip ülkelerden birisi olarak, jeotermal potansiyel açısından Avrupa’da ilk, Dünya’da ise yedinci sırada yer almaktadır. Maden Tetkik Arama Enstitüsü, Türkiye sınırlarında bulunan jeotermal kaynak sayısını 277 olarak kaydetmiştir (Özdemir 2012).

2.1 Jeotermal Enerji

Yerkürenin çekirdeğindeki ısı enerjisinin, yeryüzünün yakın derinliklerine kadar yayılması, Jeotermal Enerji olarak tanımlanır (Yıldız 2014). Jeotermal Enerji başka bir ifadeyle; yer kabuğunun yüzeye yakın derinliklerinde rezervuarlar içerisinde bulunan doğrudan veya dolaylı enerji türlerine dönüştürülerek yararlanılan, ısınmış akışkanların içerdikleri doğal kaynak ısı enerjisi türü olarak da tanımlanmaktadır (Özdemir 2012).

Jeotermal sistemler, birbiriyle doğal yollarla bağlantılı olan ısı kaynağı, beslenme alanı, akışkan, rezervuar ve örtü kayaç gibi oluşumların bir araya gelmesiyle oluşan sistemlerdir (Düzağaç 2015). Jeotermal sistemlerin önemli parametrelerinden oluşan rezervuar, yerkabuğunun yüzeye yakın derinliklerinde bulunan kayaçların hacmi olup, ısı değerlerinin ekonomik olarak üretildiği jeotermal kaynak olarak da adlandırılır. Rezervuardaki ısıdan ekonomik olarak yararlanabilmek için, sistemde çoğunluğu sulardan oluşan akışkanların dolaşım halinde olmasına gereksinim olmaktadır. Yerkürenin ilk oluşumuyla çekirdekte oluşan ısı enerjisi jeotermal sistemin en önemli ısı kaynağı olup, bu enerji yerkürenin magma ve manto bölümünden yer kabuğuna doğru yayılmaktadır. Rezervuar kayaç, derinlere süzülen

yeraltı sularının depolanması ve ısı kaynağı yardımıyla ısınmasını sağlamaktadır (Yıldız 2014).

Enerji gereksiniminin neredeyse %50'lik kısmını ithal enerji kaynakları olan petrol ve doğalgazdan karşılayan Türkiye için jeotermal potansiyel, büyük bir önem taşımaktadır. Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli 2.000 MWe ve 31.500 MWt olarak tahmin edilmekte olup, bu değerlere göre ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacını karşılamada jeotermal kaynakların fosil enerji kaynakları ile rekabet edecek seviyede olmadığı görülmektedir. Fosil yakıtlara nazaran jeotermal enerjinin avantajlarından bazıları; jeotermal enerji, jeotermal enerji kaynakları, jeotermal enerji tesisleri, jeotermal kaynağa erişim şeklinde listelenmiştir (Özdemir 2012).

- **Jeotermal enerji:** Çevre sorunları çok düşük düzeydedir, teknolojik gereksinimleri yurt içinden karşılanabilecek seviyededir, yatırım bütçesi makuldür, kısa süreli meteorolojik olaylardan çok az etkilenir, yerli enerji üretimini destekler, ülkenin enerji politikalarını yürütürken bağımsız olmasına katkı sağlar.
- **Jeotermal enerji kaynakları:** Hidrolik, güneş, rüzgâr gibi tükenmez enerji kaynaklarındandır, diğer enerjilerden daha ucuzdur, diğer enerjilere kolaylıkla dönüşebilir.
- **Jeotermal enerji tesisleri:** Bakımı, kurulumu, işletilmesi kolaydır, emre amadeliği yüksektir, yatırım maliyeti diğer enerji kaynaklarına göre daha düşüktür.
- **Jeotermal kaynağa erişim:** Kaynak yerini ve sıcak akışkanları tespit etme şansı petrole göre fazladır, jeotermal enerji daha sık sondaj gereksinimi duyduğu için jeotermal sondaj, petrol ve doğalgaza göre daha düşük maliyetlidir, teknolojik gelişmeler sondaj yeri lokasyon tespitinde ve sondaj faaliyetlerinde başarı şansını yükseltmektedir.

2.2 Jeotermal Enerji Santralleri

2020 yılı Aralık ayı sonu itibariyle, ülkemizde faaliyet gösteren 60 adet jeotermal enerji santralinin kurulu gücü, 1613,2 MWe düzeyine ulaşmıştır. Jeotermal

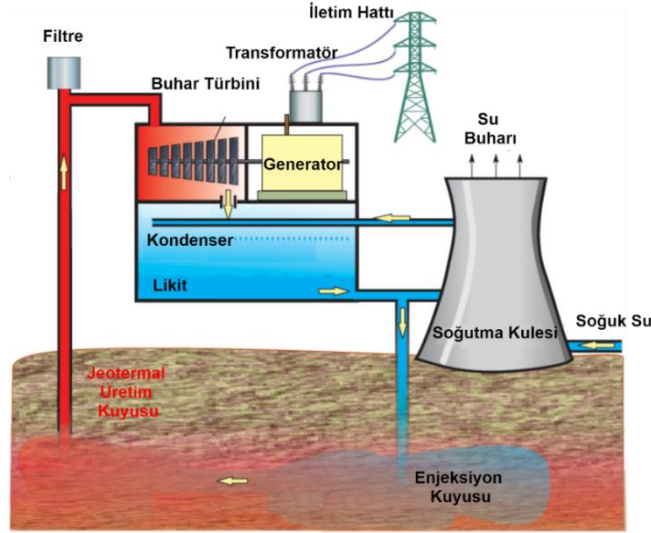
kaynaklarla üretim yapan santrallerin kurulu gücünün Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücüne oranı %1,68'e yükselmiştir (TEİAŞ 2021).

Jeotermal Enerji Santralleri, yeraltı kaynaklı sıcak akışkanın çeşitli proseslerden geçirilerek kullanıma hazır hale getirilen ısı enerjisinin, santral bünyesindeki türbin-generatör grubu sayesinde elektrik enerjisine dönüştürüldüğü santral tipidir. Jeotermal santrallerde, güç üretiminde dikkate alınması gereken termodinamik verimi etkileyecek tasarım parametreleri arasında, jeotermal kaynağın enerji üretimi için uygun olması, akışkan debisi, kuyu başı basıncı ve sıcaklığı gibi parametreler önemlidir (Ankara Kalkınma Ajansı 2021).

JES'ler, kullandıkları termodinamik çevrimlere göre çeşitlilik gösterirler. JES'leri; kuru buhar enerji santrali, buharlaştırılmalı enerji santrali ve binary çevrim enerji santrali olmak üzere ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür (Anderson ve Rezaie 2019). Son yıllarda santral verimliliklerini artırmak için; buharlaştırılmalı enerji santral sisteminin geliştirilmesiyle elde edilen çift buharlaştırılmalı santraller ve buharlaştırılmalı sistemle ORC sistemin bir arada kullanılmasıyla elde edilen kombine çevrim santraller de kullanılmaya başlanmıştır.

- **Kuru Buhar Santraller**

Şekil 2.1'de akış şeması görülen, jeotermal santral tipleri arasında en basiti olan kuru buhar santrallerde jeotermal akışkandan çıkan kuru buhar veya kızgın buhar, filtreden geçirilerek doğrudan türbin-generatör grubuna gönderilir. Buharın enerjisi ile türbin ve türbine akupla bağlantılı generatör döndürülerek elektrik enerjisi üretimi yapılır (Süren 2012). Soğutma kulesinden gelen soğuk su, buharın sıvı hale getirilmesinde kullanılarak tekrar soğutma kulesine gönderilir. Sıvı hale gelen buhar reenjeksiyon kuyusuna transfer edilir. Üretilen elektrik enerjisi transformatör ve iletim hatı üzerinden şebekeye verilir.

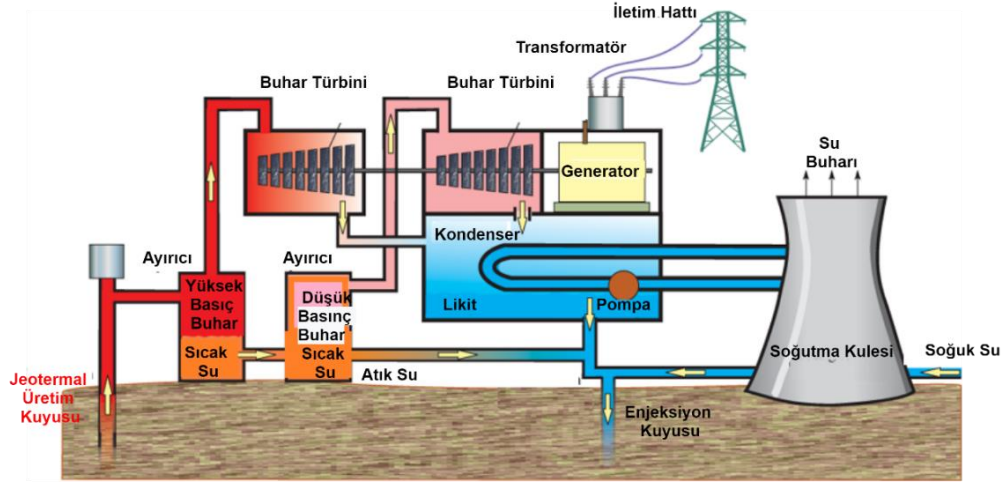


Şekil 2. 1: Kuru buhar santrallerine ait genel prensip şeması (Electrical Academia 2021).

• Buharlaştırılmalı Santraller

Bir sonraki teknoloji olan buharlaştırmalı santrallerde, jeotermal akışkan içerisinde ayırıcı yardımıyla ayrıştırılan buhar, türbin-generator grubuna gönderilir. Jeotermal akışkandaki buhar oranı çok azsa veya jeotermal akışkanı tamamen sıvı fazda ise buharlaştırmalı çevrimler kullanılır. Buharlaştırmalı santralde, buhar ve yüksek basınçlı sıcak su karışımı, basıncı azaltan ve sıvının bir kısmının anında buhara "flaş etmesine" neden olan delikli plaka aracılığıyla pompalanır. Buhar, kalan sıcak su ve akışkandan ayrıldığında, işlem kuru buhar sistemindeki ile aynıdır. Gerek kuru buhar gerekse buharlaştırmalı teknolojilerde, yüksek sıcaklıkta (genellikle 140 °C ve üzeri) jeotermal akışkana ihtiyaç duyulur. Ayrıca bu tip santrallerdeki türbin ünitesi doğrudan jeotermal akışkana maruz kaldığından, santral ömrü bu durumdan olumsuz yönde etkilenir (Electrical Academia 2021).

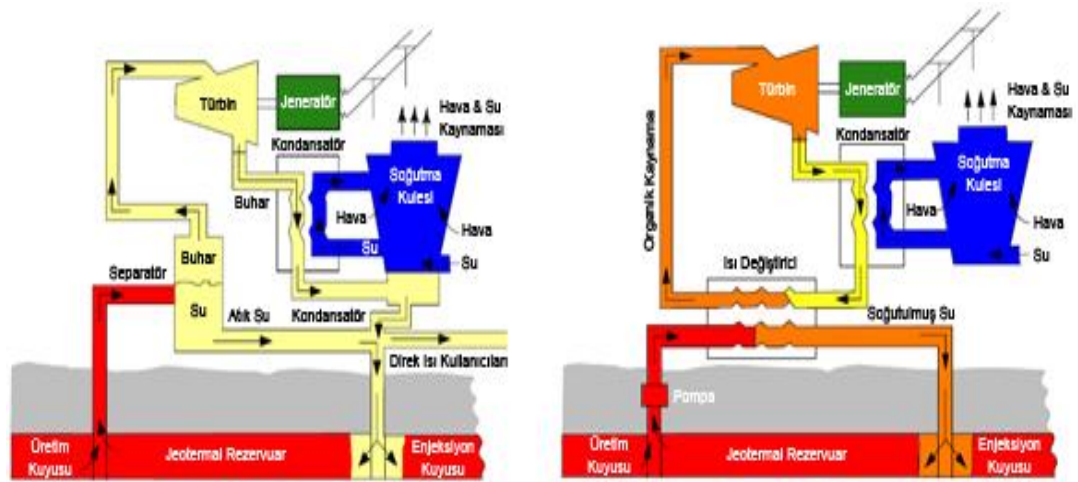
Buharlaştırmalı santrallerin verimlerini artırmak için Şekil 2.2'de akış şeması görülen çift buharlaştırma sistemi kullanılmaya başlanmıştır. Sistemde jeotermal üretim kuyusundan gelen jeotermal akışkan buhar ve sıvı fazlarına ayrışması için önce ayırıcıya gönderilir. Ayırıcı çıkışındaki buhar yüksek basınç türbinine, su ise bir flaş tanka transfer edilir. Düşük bir basınçla flaşlanan sıvının kalanı enjeksiyona gönderilirken, buhar alçak basınç türbinine gönderilir. Böylece sistem verimi artırılmış olur (Electrical Academia 2021).



Şekil 2.2: Çift kademe buharlaştırma sistemi akış şeması (Electrical Academia 2021).

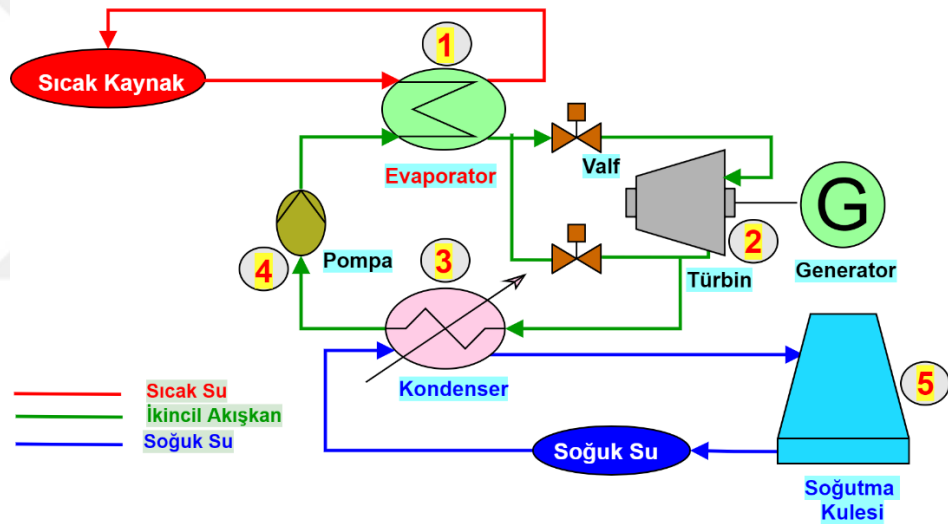
• Binary Çevrimli Jeotermal Enerji Santralleri

En son teknoloji olan binary çevrimli (ORC) jeotermal santrallerde düşük sıcaklıklardaki jeotermal akışkan (100 °C civarı), enerjisini düşük sıcaklıklarda buhar fazına geçebilen ikincil bir akışkana aktarır (Örneğin R134, izobütan, izopentan gazı) (Bozkurt 2013). Böylelikle santral sahasında jeotermal kuyudan çıkarılan düşük sıcaklıklardaki jeotermal akışkan, elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir hale gelir. Ayrıca ikincil akışkan kullanılarak, içerisinde santral türbin ekipmanına zarar verebilecek metalürjik materyal barındıran jeotermal akışkan da türbine gönderilmemiş olur. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla buharlaştırmalı sistemle binary çevrimli santrallerin akış şeması Şekil 2.3'te birlikte gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Buharlaştırmalı sistem (solda) ve ORC sistemi (sağda) akış şemaları (Özden ve Paul 2011).

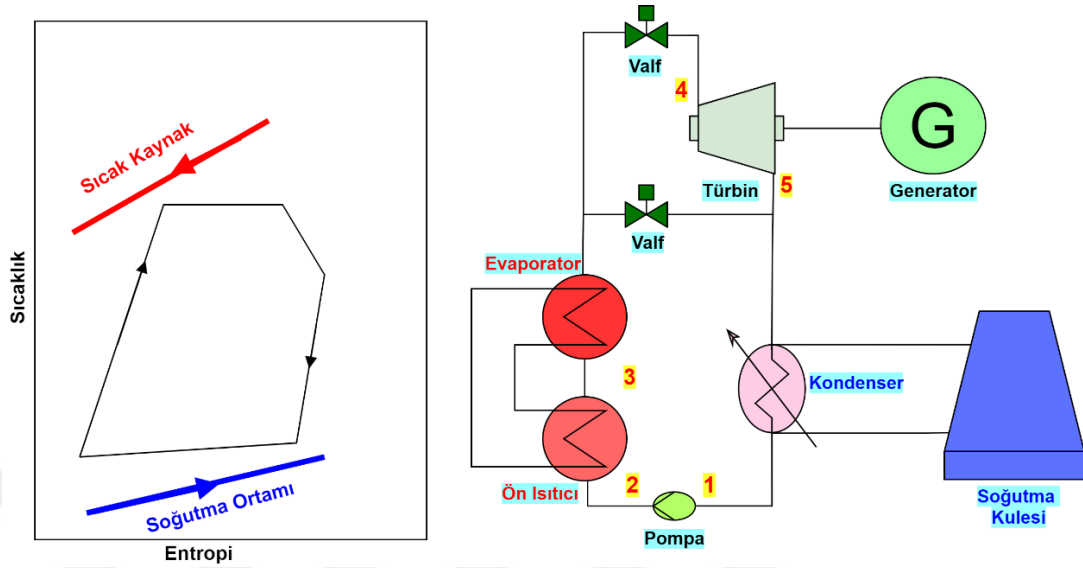
Isıdan elektrik üreten sistemi esas alan bir ORC teknolojisiyle elektrik üretimi yapan jeotermal santralin akış şeması Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Akış şemasına göre, jeotermal kaynaktan gelen sıcak akışkan (kırmızı çizgi) ısı değiştiricisinden (evaporator) geçirilir ve jeotermal akışkanın ısı enerjisi evaporatordan geçirilen ikincil akışkana (yeşil çizgi) aktarılır. Jeotermal akışkan evaporatordan düşük sıcaklıkta ayrılarak reenjeksiyon ile geri basılır. İkincil akışkan ise evaporatoru buhar olarak terk eder ve türbinden geçirilerek elektrik enerjisi elde edilir. Türbinden düşük sıcaklık ve basınçta ayrılan ikincil akışkan, kondenserde yoğusturulur. Kondenserdeki yoğusturma işleminde soğutma suyu olarak soğutma kulesinden temin edilen soğutma suyu (mavi çizgi) kullanılır. Soğutma suyu sistemde devirdaim edilir. Kondenserde yoğusturulan ikincil akışkan, bir pompa ile yeniden evaporatore pompalanır. Sistem kapalı devre olarak tekrarlanır (Pratt&Whitney 2009).



Şekil 2.4: ORC akış şeması (Pratt&Whitney 2009).

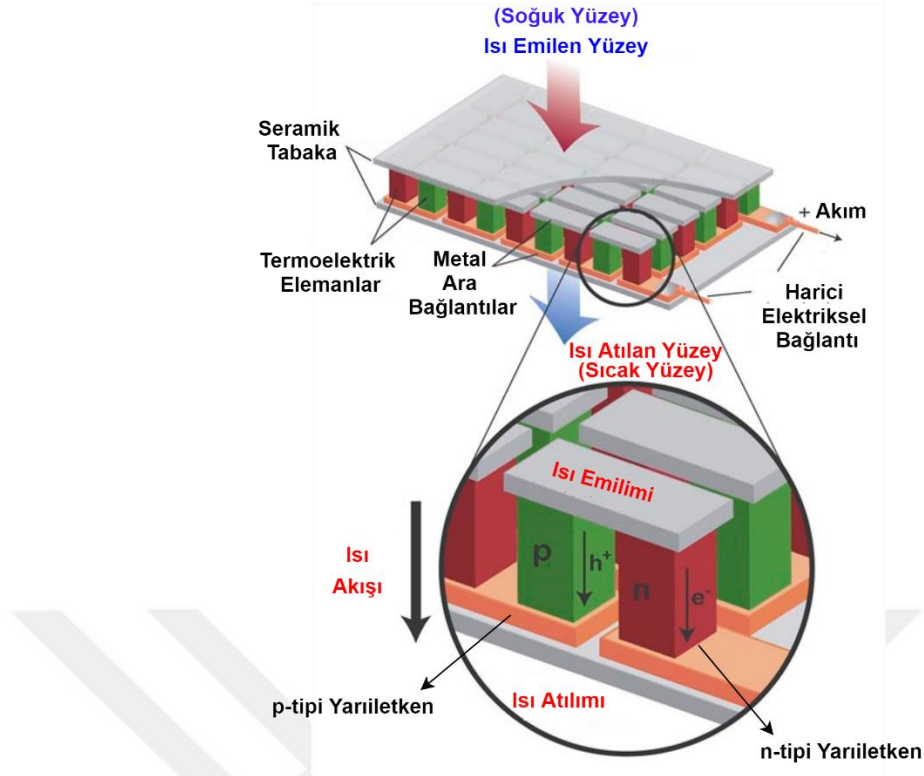
ORC'nin kapalı termodinamik çevrimi, Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmiştir. Sıcaklık-Entropi veya T-S diyagramı, ORC çevrimiyle birlikte incelenebilir. Jeotermal kaynaktan ön ısıtmaya transfer olan ısı kullanılarak, evaporator içerisinde bulunan ikincil akışkanın buharlaştırılması gerçekleşir (2-3-4). Buhar haline geçen ikincil akışkan, valfler kullanılarak jeneratörle bağlantılı olan elektrik türbinine yönlendirilerek enerjisini türbine aktarır (4-5). Buhar halindeki ikincil akışkan sıvı haline geçirilerek çevrime sokulması için kondensere transfer olur. Soğutma kulesinden temin edilen su veya hava kullanılarak kondenser içerisindeki ikincil akışkan yoğusturulur (5-1). Çevrimin son aşamasında, ikincil akışkan pompa

kullanılarak varsa ön ısıtıcıya, yoksa doğrudan evaporatore pompalanır (1-2). Kapalı çevrim bu şekilde tamamlanır (Pratt&Whitney 2009).



Şekil 2.5: ORC kapalı termodinamik çevrimi (Pratt&Whitney 2009).

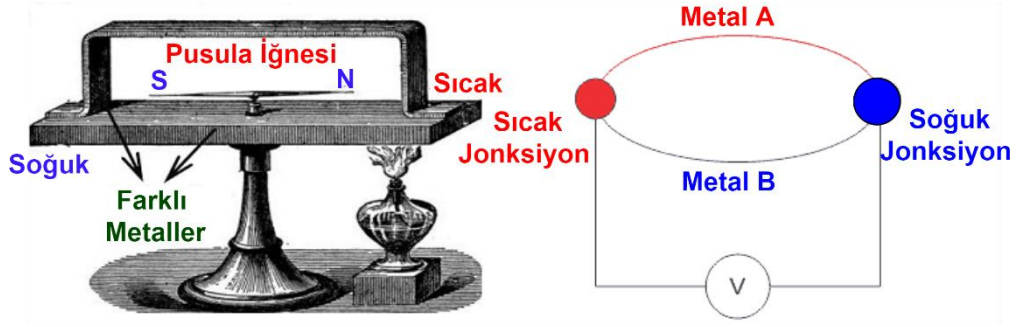
Buharlaştırılmalı santrallerin verimini artırmak için, buharlaştırılmalı sistemlerle ORC sistemler kombine edilerek beraber kullanılabilir. Kombine jeotermal sistemlerin akış şeması Şekil 2.6'da gösterildiği gibidir. Kombine çevrim sisteminde, jeotermal kaynak akışkanı, ayırıcı kullanılarak buhar ve su olarak ayrıştırılır. Ayırıcı çıkışına ulaşan yüksek basınçlı buhar, yüksek basınç türbinine gönderilir. Türbine bağlı generator vasıtasıyla elektrik enerjisi üretilir. Yüksek basınç türbin çıkışındaki düşük basınçlı buharın ısı enerjisi ise, binary çevrim sistemin buharlaştırıcısının içindeki yoğunlaştırılan ikincil akışkanın buharlaşmasında kullanılır. Buharlaşan ikincil akışkan ikinci kademe düşük basınç türbinine yönlendirilerek ikinci kademe türbine bağlı generatörden elektrik üretilir. Ayırıcı çıkışındaki sıcak su, binary çevrim ön ısıtıcısına transfer edilerek, Rankine Çevrimi enerji üretimine güç katkısı sağlar (Öztemir 2011).



Şekil 2.7: Termoelektrik modülün genel yapısı (Northwestern 2021).

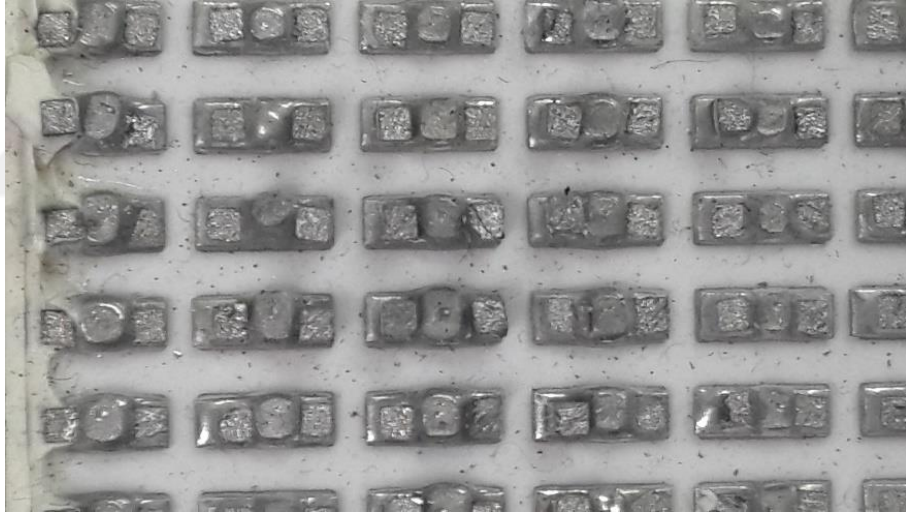
Bu termoelektrik modüller değişik boyut ve kapasitelerde olmak üzere soğutma, ısıtma ve elektrik üretiminde kullanılacak şekilde üretilirler. Isı ve elektrik enerjisinin birbirine dönüşümünün temeli olan termoelektrik etki, Alman fizikçi Thomas Seebeck tarafından 1821 yılında keşfedilmiştir. Termoelektrik modüller; Peltier, Termoelektrik Soğutucu (TES) ve TEG olarak bilinmektedir. Küçük bir DC gerilimin TES’e tatbik edilmesiyle Peltier etkisi nedeniyle termoelektrik modülün bir yüzeyindeki ısı diğer yüzeye taşınır. Bu şekilde TES modülün bir yüzeyi ısınmaya, diğer yüzey de soğumaya başlar. DC gerilimin polaritesinin yön değiştirmesiyle ısının hareket yönü de ters yöne çevrilir (Kayabaşı 2014).

İki farklı malzemenin bir araya getirilmesi ile oluşan devredeki iletkenlerin birleşme noktalarına (eklem) farklı sıcaklıklar tatbik edildiğinde, malzeme uçlarında sıcaklık farkıyla doğru orantılı DC gerilim elde edilmesi Seebeck Etkisi olarak açıklanmaktadır. Seebeck Etkisi prensibi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Burada Metal A ve Metal B olarak adlandırılan farklı metaller kullanılarak oluşturulan seri devrede, iletkenlerin birleşim noktalarını sıcak eklem ve soğuk eklem noktası olarak belirleyip, bu iki birleşim noktası arasında yeterli bir sıcaklık farkı oluşturulduğunda, iletken uçlarında bir potansiyel farkı meydana gelir (Mamur 2014).



Şekil 2.8: Seebeck Etkisi (Teknoloji 2021).

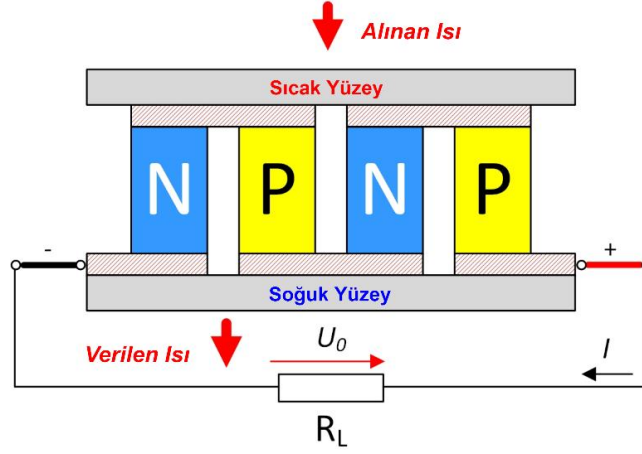
İçyapısı Şekil 2.9’da görülen TEG modüllerinin verimlilik artışı için, Termoelektrik Verim Katsayısı (FOM-Figure of Merit) parametresinin yüksek olması tercih edilmektedir. Bunun haricinde yüksek verimli TEG’ler; sıcaklık farkı uygulanan TEG çıkış gerilimi Seebeck Sabiti (S) ile doğru orantılı değiştiği için yüksek Seebeck Sabiti’ne, Joule ısısını azaltmak için yüksek elektriksel iletkenliğe, ısı kayıplarını azaltmak için düşük ısı iletkenliğe sahip olmalıdır (Mamur 2014).



Şekil 2.9: TEG modülü iç yapısı.

2.3.1 Termoelektrik Modülün Generator Olarak Kullanılması

TEG modülü yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulursa, Seebeck Etkisi’nden dolayı TEG çıkışında DC gerilim elde edilir (Liu ve diğ. 2014). Gerilimin yönü, ısı akışının yönüne bağlıdır; yani hangi noktanın daha sıcak olduğuna göre değişmektedir. TEG temel yapısı, Şekil 2.10’da görülmektedir.



Şekil 2.10: TEG temel yapısı (Siouane ve diğ. 2017).

Yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulan TEG modülünün çıkış uçlarına bir yük bağlanırsa, yük üzerinden bir I akımı geçişi olur. TEG'den üretilen P gücü veya I akımını; yüzeyler arasındaki ΔT sıcaklık farkı, modülü oluşturan yarıiletken malzemelerin özellikleri, R_{in} iç direnci ve harici R_L yük direnci değerleri etkiler. TEG sayısı artırılmak suretiyle, TEG sisteminin akım ve gerilim değeri istenilen düzeyde ayarlanabilir. TEG'ler seri bağlanarak gerilim değeri, paralel bağlanarak da akım değeri yükseltilebilir.

3. HİBRİT SİSTEM TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Bir JES'e verim arttırımı maksadıyla eklemenebilecek TEG sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleşmesi için, öncelikle sistemde kullanılacak TEG modüllerinin seçimi yapılmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde, teknik özellikleri ve tedarik kolaylığı nedeniyle, sistemde Kryotherm modüllerinin kullanımına karar verilmiştir. Öncelikle, seçilen Kryotherm marka 199-1.4-0.8 kodlu TEG modülünün katalog verileri baz alınarak, Matlab & Simulink ortamında benzetim çalışması yapılmıştır. Literatürde geçen ve TEG'lerde kullanılan formüller göz önüne alınarak önemli sistem parametreleri matematiksel olarak hesaplanmış, bu matematiksel veriler Matlab & Simulink benzetim çalışmasında kullanılmıştır. Benzetim çalışmasının matematiksel ve elektriksel verileri, çalışma kapsamında kurulumu yapılan TEG sisteminin de temelini oluşturmuştur. İlgili veriler ve TEG verimliliğini etkileyen faktörler dikkate alınarak nihai tasarım yapılmıştır.

3.1 JES-TEG Hibrit Sistemi'ne Genel Bir Bakış

Basit yapılı ve hareketli parçaları olmayan TEG'lerin malzeme ömrü uzun olup, işletme-bakım maliyetleri düşüktür (Madruga 2021). Bu durum, TEG'lerin jeotermal santrallere entegrasyonunu kolaylaştırır. TEG'lerin bu olumlu özelliklerinin çeşitli avantajlar sunmasına rağmen, verimlerinin %5-%10 gibi düşük bir düzeyde olması dezavantaj olarak kabul edilebilir. TEG'lerin elektrik enerjisini atık enerjiden elde ettiği JES-TEG gibi hibrit sistemlerde verimlilik değerinin düşük olması sorun olarak görülmeyebilir (Ahıska ve diğ, 2012).

Düşük sıcaklık/verim değerlerine sahip jeotermal santraller daha verimli çalıştırılabilmesi için, çeşitli enerji üretim sistemleri ile desteklenmiştir. Biyokütle, güneş enerjisi ve hidrojen enerjisine ek olarak, jeotermal santrallerin verimliliğini artırmak için TEG sistemlerinden de faydalanılabilir. Jeotermal santrallerde elektrik enerjisi üretiminde kullanıldıktan sonra reenjeksiyon kuyusuna gönderilen jeotermal akışkanın içinde atık ısı enerjisi bulunmaktadır. Bu atık ısı enerjisi, jeotermal santrale entegre TEG'ler kullanılarak elektrik enerjisi üretimi için yeniden değerlendirilebilir.

İster buharlaştırmalı JES'ler olsun ister ORC JES'ler olsun, enerji verimliliği çok önemlidir. Bu bağlamda, iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluştuğunda yük üzerinde DC elektrik enerjisi üretilen, yani Seebeck Etkisi ile çalışan TEG modülleri kullanılarak oluşturulan TEG sistemlerinin jeotermal tesislere uygulanması düşünülebilir. Bu sayede JES'lerin reenjeksiyona gönderilen dönüş suyundaki atık ısı değerlendirilerek santral verimli bir şekilde çalıştırılabilir.

JES'lerde jeotermal akışkan, elektrik enerjisi üretimi sonrası, reenjeksiyon kuyusuna gönderilir. Burada amaç, jeotermal kaynağın sürdürülebilir olmasıdır. Bu çalışma; reenjeksiyon kuyusuna gönderilen atık ısı olarak değerlendirilebilecek jeotermal akışkanın bu gönderim işlemi öncesinde TEG sisteminden geçirilerek, tekrardan elektrik enerjisi üretiminde kullanılması üzerinedir. Yarıiletken yapıdaki TEG'lerin bir yüzeyinden soğuk, diğer yüzeyinden sıcak su geçirilerek, oluşan ısı fark sayesinde elektrik enerjisi üretimi yapılabilir. JES'lerde TEG sistemi kullanımıyla, genel santral veriminin de artırılması hedeflemiştir. Çalışma kapsamında, ORC sistemi ile çalışan bir JES-TEG Hibrit Enerji Üretim Sistem Simülatörü tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sarayköy/ Denizli'de kurulumu yapılan Jeoden JES Santrali ORC akış şemasına uyarlanan, jeotermal dönüş suyundan elektrik elde etmek amacıyla tasarlanan JES-TEG Hibrit Enerji Üretim Sistemi akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir. TEG sisteminin jeotermal akışkan dönüş hattının sıcak yüzeyle, soğutma kulesinden gelen soğutma hattının da soğuk yüzeyle ilişkilendirilmesi gerekliliği dikkate alınmalıdır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, TEG sistemi, jeotermal dönüş suyu hattındaki atık ısı kullanılacak şekilde tasarlanmıştır.

Gerekli verimlilik hesapları dikkate alınarak, santral besleme suyu üzerine veya jeotermal kuyu yakınında bulunan ve Şekil 3.2'de görülen santral by-pass hattına da aynı şekilde TEG sistem montajı yapılabilir. TEG modüllerinin seri-paralel bağlantıları düzenlenerek ve sayıları artırılarak güç ayarlaması yapılabilir.

çalıştığı sürece TEG sisteminin sıcak yüzeyi için gerekli sıcak su atık ısı enerjisinden, soğuk yüzeyi için gerekli soğuk su ise çalışmakta olan soğutma kulesinden temin edilir. Soğuk ve sıcak su enerjisi, ORC çeviriminde pompalarla sürekli yüksek debi ile akış halinde olduğu için, TEG sistemi için ilave pompa kullanılmasına gerek yoktur. Sıcak/soğuk su debilerinin de JES’lerde yüksek olması nedeniyle TEG sistemi verimi olumlu etkilenecektir. TEG sistemi verimine sıcak/soğuk su debilerinin etkisi ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. TEG sistemini maliyetsiz çalıştırarak atık ısıdan yararlanma miktarı artınca, JES’lerde verimlilik artışı gerçekleşmesi beklenir.

TEG sistemi; maliyetsiz atık ısı temini yapılabilen jeotermal enerji kaynaklı termal turizm, şehir ısıtma sistemleri ve benzeri tesislerde aynı prensiplerle uygulanabilir.

TEG’ler kullanılarak farklı ısı uygulamalardan kaynaklanan atık ısının geri kazanılması konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Ancak bunlardan sadece birkaçı TEG’lerin jeotermal santrallere entegrasyonu ile ilgilidir. Aslında jeotermal akışkan, kondenser ve reenjeksiyon kuyularına gitmeden önce hala bir miktar ısı enerjisiye sahiptir. Bu nedenle, jeotermal santrallerin performansını artırmak için bu atık ısı enerjinin kullanım olanakları göz önünde bulundurulmalıdır.

Atık ısıdan elektrik üretimi için TEG kullanılan çalışmaların bazıları JES-TEG sistemlerine referans teşkil etmesi için literatür taramasında incelenmiştir. Bu incelemelere göre araştırmacılar sıcaklık farkına ve TEG modül sayısına bağlı olarak kapasitesi değişen elektrik üretimleri gerçekleştirmişler (Catalan ve diğ. 2019, Niu ve diğ. 2009), elektrik üretim kapasitesinin artırılması için öneriler sunmuşlar (Liu ve diğ. 2014), yapmış oldukları analizlere göre TEG sistem verimini hesaplamışlar (Ahıska ve Mamur 2016), TEG sisteminin entegre edildiği ORC ve KC gibi sistemlerin verimlerindeki artışlardan bahsetmişlerdir (Khanmohammadi ve diğ. 2020, Malik ve diğ. 2020).

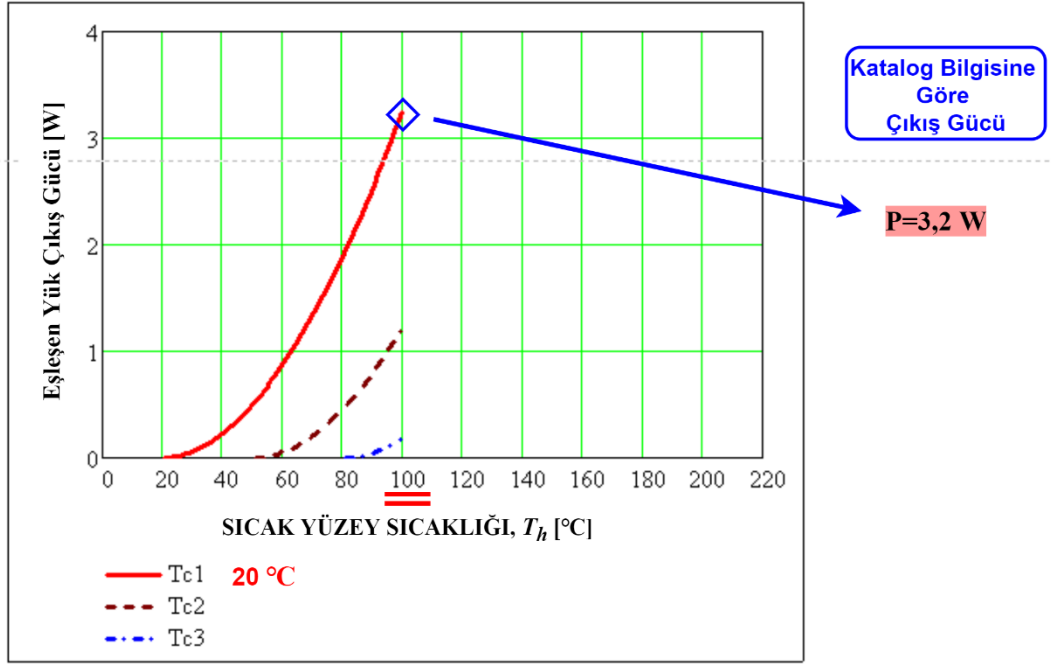
3.2 Termoelektrik Generatorun Modellenmesi

Bu çalışma kapsamında, 50 adet Kryotherm marka 199-1.4-0.8 kodlu TEG modülü kullanılmıştır. Temin edilen TEG modüllerinin 2 adedi de yedek olarak muhafaza edilmiştir. Kurulum için gerekli olan matematiksel modelde, 48 adet TEG'den oluşan TEG sisteminden en yüksek güç değerini elde etmek için, en uygun seri ve paralel bağlantı konfigürasyonu oluşturularak $R_{GEN} \approx R_L$ eşitliği gerçekleştirilmeye çalışılmıştır (Ahiska ve Mamur 2011).

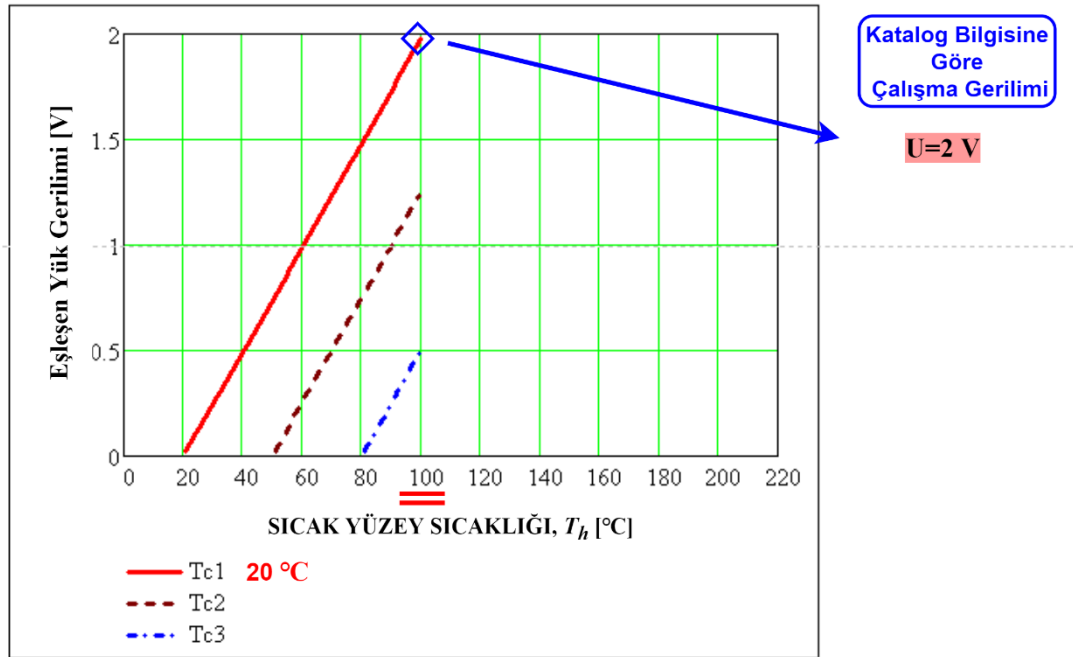
48 adet TEG kullanılarak $U = 20$ V DC ve $I = 7,5$ A'lık sisteme göre tasarım yapılmıştır. 12 adet TEG'in seri, sonrasında bu seri koldan dördünün paralel bağlandığı toplam 48 adet TEG modülden oluşan konfigürasyon; üretilen U_{GEN} çıkış gerilim değerinin, TEG sisteminde kullanılan invertörü devreye sokabilecek yeterlilikte olmasından dolayı tercih edilmiştir. Bu konfigürasyonda matematiksel hesaplamalar yapıldıktan sonra, Matlab & Simulink benzetimi gerçekleştirilmiş ve deney seti kurularak deneysel çalışmalar yapılmıştır.

3.2.1 Termoelektrik Generator Sistemi Tasarım Bilgileri

Çalışma kapsamında kurulan TEG sistemi tasarım kriterleri olarak belirlenen sıcak yüzey sıcaklığı (T_h) için 100 °C ve soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) için 20 °C değerleri için sıcaklığa bağlı olarak değişen güç eğrisi, Şekil 3.3'te, gerilim eğrisi ise Şekil 3.4'te sunulmuştur. Kullanıcılar, üretici firma tarafından Tablo 3.1'de verilen parametreleri kullanarak, kendi işletme koşullarında, değişik yüklerde ve sıcaklık değerlerinde TEG sistemi tasarlayıp, elektriksel güç hesaplamalarını yapabilir. Bu çalışma kapsamında kurulumu yapılan TEG sistemi için işletme koşulları ve tasarım kriterleri, Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3: TEG modülü sıcaklık-güç eğrisi (Kryotherm 2019).



Şekil 3.4: TEG modülü sıcaklık-gerilim eğrisi (Kryotherm 2019).

Tablo 3.1: Kryotherm TGM-199-1.4-0.8 teknik özellikleri (Kryotherm 2019).

Parametre	Şartlar	Değer
Çıkış Gücü (P_0)	@ $T_h = 100\text{ °C}$, $T_c = 20\text{ °C}$	3,2 W
Yük Gerilimi (U_{load})	@ $T_h = 100\text{ °C}$, $T_c = 20\text{ °C}$, For $R_L = R_{ac}$	2 V
Yük Akımı (I_{load})	@ $T_h = 100\text{ °C}$, $T_c = 20\text{ °C}$, For $R_L = R_{ac}$	1,6 A
Dahili TEG Direnci (R_{ac})	@ çalışma sıcaklığı (100 °C)	1,25 $\Omega \pm 10\%$
Isıl Direnç (R_t)	Termal macun uygulaması ile	0,57 K/W $\pm 10\%$
Maksimum Verim (η_{max})	@ çalışma sıcaklığı (100 °C), For $R_L = R_{ac}$	%2,6
Boyutlar ($ExBxH$)	Yükseklik tolerans $\pm 0,015\text{ mm}$	40x40x3,2 mm
Maximum Çalışma Sıcaklığı (T_{max})	Termal macun uygulaması ile	200 °C

Tablo 3.2: TEG sistemi işletme koşulları ve tasarım bilgileri.

Parametre	Değer
Tasarım Gücü (P_0)	150 W
Çıkış Gerilimi (U_0)	20 V
Çıkış Akımı (I_{TEG})	7,5 A
Sıcak Yüzey Sıcaklığı (T_h)	100 °C (373,15 K)
Soğuk Yüzey Sıcaklığı (T_c)	20 °C (293,15 K)

3.2.2 Termoelektrik Generator Sistemi Matematiksel Modeli

Yapılan tüm hesaplamalar, değişik yük değerlerinde TEG’lerden elde edilebilecek güç için önem arz etmektedir. TEG sistemi kurulumuna geçmeden önce, kullanılacak TEG özelliklerine ve işletme şartlarına göre hesaplamalar yapılmalıdır. Bu hesaplama sonuçlarına göre bağlantı şekilleri, kullanılan modül tipi ve sayısı gibi verilerde değişiklik yapılabilir.

Matlab & Simulink benzetimine geçilmeden önce, ilerleyen kısımlarda yer alan güç üretimi formülleri, Tablo 3.1’deki TEG katalog bilgileri ve Tablo 3.2’deki TEG sistemi tasarım verileri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplama sonuçları, ilerleyen bölümlerde detay bilgileri verilen, Matlab & Simulink benzetimi verileriyle karşılaştırılmıştır. Benzetim verileri ile matematiksel hesapların birbirini doğruladığı görülmüştür.

Hesaplamalara geçmeden önce, TEG modüllerinin ısı ve enerji parametrelerinin öneminden bahsetmek yerinde olacaktır. Seebeck Sabiti (S) yüksek olan TEG modüllerinin çıkış gerilimleri ve dolayısıyla çıkış güçleri yüksek olacaktır. Elektriksel iletkenlikleri yüksek olan TEG modüllerinde istenmeyen Joule ısı düşük olur. Düşük ısı iletkenliğe sahip TEG modüllerinde ısı kayıpları da azalacaktır. Özetle; düşük ısı iletkenliğe, yüksek Seebeck Sabiti'ne ve elektriksel iletkenliğe sahip olan TEG modüllerinin daha verimli çalışması beklenir (Mamur 2014).

TEG ile üretilen güç; modül yüzeyleri arasındaki ΔT sıcaklık farkına, yarıiletken malzeme özelliklerine ve R_L yük direncinin TEG iç direnç değerine yakın değerde olmasına bağlıdır. Ticari olarak TEG üreten firmalar katalog bilgisi olarak; Tablo 3.1'de gösterilen TEG dahili modül iç direncini, maksimum verimliliği, sıcaklık farklarına göre yük üzerinde görülen gerilim, akım ve güç değerlerini, tasarım alanı bakımından da TEG modül ebatlarını verirler. Bu katalog değerleri, oluşturulan TEG sisteminin elektriksel verilerinin hesaplamalarında kullanılır. TEG üreten firmalar, ısı enerjisi transferinin verimli yapılabilmesi için montaja yönelik koşulları da düzenleyebilirler.

Bir TEG için ortalama yüzey sıcaklığı T_{ave} , (3.1) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$T_{ave} = \frac{(T_h + T_c)}{2} \quad (3.1)$$

(3.1) eşitliğinde tasarım parametreleri arasında yer alan T_h ve T_c değerleri (sırasıyla; 373,15 K ve 293,15 K) yerlerine konularak T_{ave} değeri 333,15 K olarak elde edilmiştir.

Yük direnci R_L , (3.2) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$R_L = \frac{U_0}{I} \quad (3.2)$$

Tasarım değerleri olan çıkış gerilimi (U_0) 20 V ve yük akımı (I) 7,5 A olacak şekilde (3.2) eşitliğinde kullanılarak, yük direnci (R_L) 2,667 Ω olarak hesaplanmıştır.

TEG sistemi çıkış gücü P_o , (3.3) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$P_o = U_o \times I \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte; U_o için 20 V ve I için 7,5 A değerleri kullanıldığında, TEG sistemi çıkış gücü 150 W olarak elde edilir.

Sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı olan ΔT değeri, (3.4) eşitliği ile hesaplanır.

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (3.4)$$

Burada; $T_h = 373,15$ K, $T_c = 293,15$ K değerleri (3.4) eşitliğinde yerlerine konularak ΔT değeri 80 K elde edilmiştir.

Seebeck Sabiti (S); tek bir TEG modülü üzerinden (3.5) eşitliğindeki gibi elde edilir;

$$S = \frac{2U_{max}}{\Delta T} \quad (3.5)$$

Kryotherm katalog bilgisi tablosundan $U_{max} = 2$ V ve $\Delta T = 80$ K değerleri (3.5) eşitliğinde yerlerinde kullanılarak, S değeri 0,05 V/K olarak hesaplanmıştır.

Tek bir TEG'in maksimum gücü hesaplanırken $R_{in} = R_L$ kabul edilir. Bu nedenle, burada tek bir TEG için (3.6) eşitliği kullanılıp R_{in} hesaplanarak R_L de elde edilmiş olunur. TEG Sistemi'nde bulunan TEG grubunun direnci R_{in} ile yük direnci R_L 'nin birbirine eşit olması, pratikte oldukça zordur. Bu değerler mümkün olduğunca yakın seçilirse, sistemden maksimum verim elde edilebilir (Mamur 2014).

$$R_{in} = \frac{U_{max}^2}{P_{max}} \quad (3.6)$$

R_{in} değeri, TEG modülünün maksimum güç (3,2 W) ve gerilim (2 V) değerlerinin (3.6) eşitliğinde kullanılması ile, Tablo 3.1'de verildiği gibi 1,25 Ω olarak elde edilmiştir.

TEG'lerde, Termoelektrik Değer Katsayısı (FOM; Z) (3.7) eşitliğinden hesaplanır.

$$Z = \frac{4\eta_{TEG}^{max}}{[\Delta T - \eta_{TEG}^{max}(1,5T_h + 0,5T_c)]} \quad (3.7)$$

TEG'in maksimum verimi η_{max} 'ın, hesaplanan ΔT , T_h ve T_c değerlerinin (3.7) eşitliğinde kullanılmasıyla Z değeri, $0,001687 \text{ K}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Isıl iletkenlik değeri K_{th} ; (3.8) eşitliğinden elde edilir (Tsai and Lin 2010).

$$K_{th} = \frac{S^2}{R_{in} \times Z} \quad (3.8)$$

TEG modül için hesaplanan S ve Z değerleri ile TEG modül iç direnci R_{in} 'in (3.8) ifadesinde kullanılmasıyla; K_{th} değeri $1,1853 \text{ W/K}$ olarak hesaplanmıştır.

Sistemdeki toplam modül sayısı N_T ; seri bağlı modül sayısı N_S ve paralel bağlı modül sayısı N_P değerlerinin çarpılmasıyla eşitlik (3.9)'daki gibi elde edilir (Ferrotec 2021).

$$N_T = N_S \times N_P \quad (3.9)$$

Eşitlik (3.9) kullanılarak toplam modül sayısı olan N_T değeri, 48 olarak elde edilmiştir.

Yük direnci R_L 'den geçen akım; (3.10) eşitliğinden elde edilebilir (Dişlitaş 2002).

$$I_{GEN} = \frac{N_S \times S \times \Delta T}{\frac{N_S \times R_{in}}{N_P} + R_L} \quad (3.10)$$

TEG modülü için hesaplanan Seebeck Sabiti'nin ($0,05 \text{ V/K}$), seri ve paralel bağlı modül sayılarının (sırasıyla 12 ve 4), yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ΔT değerinin (80K), TEG iç direnci R_{in} değerinin ($1,25 \Omega$) ve yük direnci R_L değerinin ($2,667 \Omega$) (3.10) eşitliğinde kullanılmasıyla TEG sistemi çıkış akımı I_{GEN} , $7,48 \text{ A}$ olarak hesaplanmıştır.

Generatörden elde edilebilecek Watt cinsinden maksimum çıkış gücü P_o , (3.11) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$P_o = U_o \times I = \frac{N_T \times (S \times \Delta T)^2}{4 \times R_{in}} \quad (3.11)$$

Burada N_T , S , ΔT , R_{in} değerleri (3.11) denkleminde yerlerine konularak P_o 153,6 W şeklinde hesaplanmıştır.

Tek bir TEG'in maksimum çıkış gücü P_{Lmax} değeri (3.12) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$P_{Lmax} = \frac{S^2 \times \Delta T^2}{4 \times R_{in}} \quad (3.12)$$

S , ΔT , R_{in} değerleri (3.12) denkleminde kullanılarak, P_{Lmax} değeri 3,2 W olarak elde edilmiştir. Bu değer ayrıca Tablo 3.1'de verilen TEG katalog verilerine göre maksimum gücün değerini de göstermektedir.

Gerekli minimum modül sayısı n_{min} , (3.13) eşitliğinden bulunur;

$$n_{min} = \frac{P_o}{P_{Lmax}} \quad (3.13)$$

P_o ve P_{Lmax} değerinin (3.13) eşitliğinde kullanılmasıyla n_{min} değeri, 48 adet TEG modülü olarak hesaplanmıştır.

$N_S = 12$ ve $N_P = 4$ için TEG sisteminin direnci R_{GEN} , (3.14) eşitliğinden hesaplanır.

$$R_{GEN} = \frac{N_S \times R_{in}}{N_P} \quad (3.14)$$

N_S , R_{in} ve N_P değerleri (3.14) eşitliğinde kullanılarak R_{GEN} değeri 3,75 Ω olarak elde edilmiştir.

Maksimum generator verimliliği ise, $R_{GEN} = R_L$ durumunda ortaya çıkar (Döşkaya 2014). Seri ve paralel bağlı TEG sayıları ile konfigürasyonlar denenerek, R_{GEN} değerinin R_L değerine eşit veya en yakın olduğu, toplam 48 adet TEG için ideal bağlantı konfigürasyonu belirlenir (Hekim ve Cetin 2019). Bu çalışmada, 12 adet seri bağlı TEG modülünden oluşturulan seri kol ve bu seri koldan türetilen dörtlü paralel

kol bağlantı konfigürasyonu, R_{GEN} değerinin R_L değerine en yakın olduğu konfigürasyon olarak belirlenmiş ve Matlab & Simulink benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Generator gerilimi U_{GEN} ; I_{GEN} akımı ve R_L yük direncinin eşitlik (3.15)'te kullanılmasıyla 19,95 V olarak elde edilmiştir.

$$U_{GEN} = I_{GEN} \times R_L \quad (3.15)$$

U_{GEN} ve R_L kullanılarak eşitlik (3.16) ile TEG sisteminden üretilen elektriksel güç değeri P_o , 149,23 W olarak hesaplanmıştır.

$$P_o = \frac{U_{GEN}^2}{R_L} \quad (3.16)$$

Tek bir TEG'in verimi, (3.17)'deki formül kullanılarak bulunur;

$$\eta_{max} = \frac{Z \times \Delta T}{[4 + Z \times (1,5T_h + 0,5T_c)]} \quad (3.17)$$

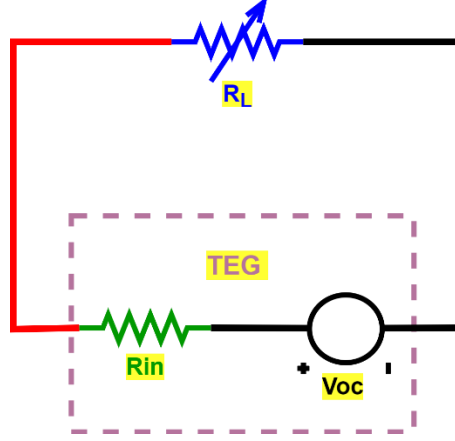
Eşitlik (3.17)'de geçen Z , ΔT , T_h ve T_c değerleri yerlerine konularak yapılan hesap sonucunda TEG modülü maksimum verimi %2,6 olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan TEG verim değerinin Tablo 3.1'de gösterilen katalog değeriyle aynı olduğu görülmektedir.

Yük bağlı tek bir TEG modülünden geçen akım, (3.18) eşitliği ile hesaplanır. Maksimum güç üretimi için $R_{in}=R_L$ şartı sağlanırsa, I değeri katalogda belirtilen I_{max} değerine eşit olarak elde edilir (Ahiska ve diğ. 2011).

$$I = \frac{S \times \Delta T}{R_{in} + R_L} \quad (3.18)$$

Şekil 3.5'te görülen TEG modülü Thevenin eşdeğer devresine göre; ΔT sıcaklık farkıyla TEG modülünde DC gerilim elde edilir. TEG modülünün iç direnci $R_{in}=1,25 \Omega$ ve harici bağlanan yük $R_L=1,25 \Omega$ üzerinden denklem (3.18)'de ifade edilen I akımı dolaşır.



Şekil 3.5: TEG modülü Thevenin eşdeğer devresi (Kryotherm 2019).

S , ΔT , R_{in} ve R_L değerlerinin (3.18) eşitliğinde yerlerine konulmasıyla, TEG modülü iç direnci R_{in} ve R_L yük direnci üzerinden (maksimum güç transferi için $R_{in} = R_L = 1,25 \, \Omega$ alınır) dolaşan I akımı, 1,6 A olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan I akımı değeri, Tablo 3.1’de verilen en yüksek akım değeri ile aynıdır.

TEG sistemine toplam Watt olarak ısı girişi Q_{ht} , eşitlik (3.19)’dan hesaplanabilir.

$$Q_{ht} = (S \times T_h \times I) - (0,5 \times I^2 \times R_{in}) + (K_{th} \times \Delta T) \quad (3.19)$$

Q_{ht} değerini hesaplamak için eşitlik (3.19)’dan türetilen (3.20) denklemi kullanılmıştır (Dişlitaş 2002).

$$Q_{ht} = N_T \times \left[\left(\frac{S \times T_h \times I_{GEN}}{N_P} \right) - \left(0,5 \times \left(\frac{I}{N_P} \right)^2 \times R_{in} \right) + (K_{th} \times \Delta T) \right] \quad (3.20)$$

Q_{ht} değerinin hesaplamasında, tasarımda verilen T_h , N_P değerleri, TEG modül kataloğunda verilen R_{in} değeri, önceki formüller kullanılarak hesaplanan N_T , S , K_{th} , ΔT değerleri ve akım bileşeni olarak R_L yükü üzerinden geçen I_{GEN} akım değeri kullanılmıştır. Böylelikle Q_{ht} değeri, 6.121,49 W olarak hesaplanmıştır.

TEG sistemi verimliliği E_g ise, TEG sisteminde üretilen elektriksel güç P_o 'ın TEG sisteminde toplam Watt olarak ısı girişi olan Q_{ht} 'ye oranı şeklinde, eşitlik (3.21)'den hesaplanır.

$$E_g = \frac{P_o}{Q_{ht}} \times 100 \quad (3.21)$$

P_o 'ın ve Q_{ht} 'nin (3.21) eşitliğinde kullanılmasıyla $E_g = \%2,44$ olarak elde edilir.

Çalışmada, 12 adet seri, 4 adet paralel bağlı TEG kombinasyonu için yapılan hesaplamalardaki metot kullanılarak, 48 adet TEG'in olası tüm kombinasyonları için hesaplamalar yapılmıştır. Bu konfigürasyonlara göre, Tablo 3.2'de verilen tasarım kriterleri baz alınarak ($U = 20$ V DC, $I = 7.5$ A, $P = 150$ W, $R_L = 2,67 \Omega$) I_{GEN} , U_{GEN} , P_o , Q_{ht} , E_g ile R_{GEN}/R_L değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.3'te gösterilmiştir. Tablo 3.3'teki verilere göre 8 adet seri 6 adet paralel kol TEG'den oluşan sistemin $R_{GEN} \approx R_L$ şartını daha iyi sağladığı ve bu durumdaki verimin de daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine de bu çalışmada, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi, invertör giriş gerilimine göre tasarım yapılması gerektiğinden, TEG sisteminde 12 adet seri 4 adet paralel kol TEG'den oluşan tasarım uygulanmıştır.

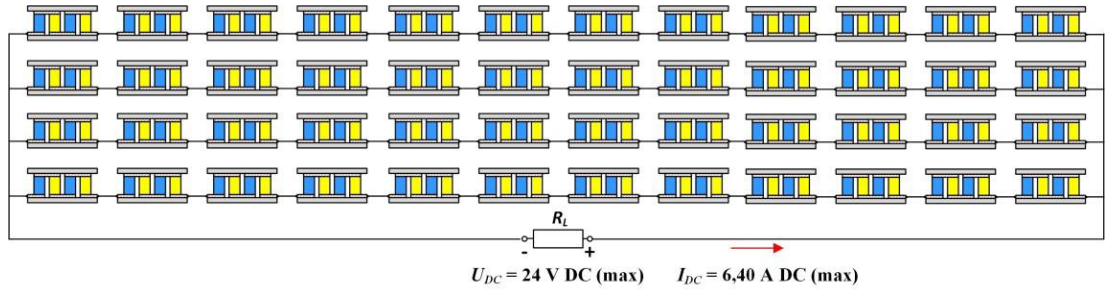
Tablo 3.3: 48 adet TEG'in farklı kombinasyonlardaki bağlantısına göre hesaplanan veriler.

N_s	N_p	N_t	I_{GEN} (A)	U_{GEN} (V)	P_o (W)	Q_{ht} (W)	η_{max} (%)	R_{GEN} (Ω)	R_L (Ω)	R_{GEN}/R_L
48	1	48	3,06	8,17	25,03	7013,83	0,36	60,00	2,67	22,50
24	2	48	5,43	14,49	78,74	6763,36	1,16	15,00	2,67	5,62
12	4	48	7,48	19,95	149,22	6121,49	2,44	3,75	2,67	1,41
8	6	48	7,38	19,69	145,42	5608,38	2,59	1,67	2,67	0,63
6	8	48	6,66	17,76	118,25	5276,25	2,24	0,94	2,67	0,35
4	12	48	5,19	13,84	71,81	4933,26	1,46	0,41	2,67	0,15
2	24	48	2,89	7,70	22,23	4658,90	0,48	0,10	2,67	0,04
1	48	48	1,49	3,96	5,89	4579,28	0,13	0,02	2,67	0,01

3.3 Termoelektrik Generator Sistemi Matlab & Simulink Benzetimi

Bölüm 3.2'de yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen veriler ışığında, Şekil 3.6'da görülen TEG sisteminin Matlab & Simulink ile matematiksel modeli oluşturulmuştur. Hesaplanan verilerle TEG Sisteminin Matlab & Simulink

benzetiminde elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. İlerleyen kısımlarda da görüldüğü üzere, benzetim verileri ile matematiksel hesapların birbirini doğruladığı görülmüştür.



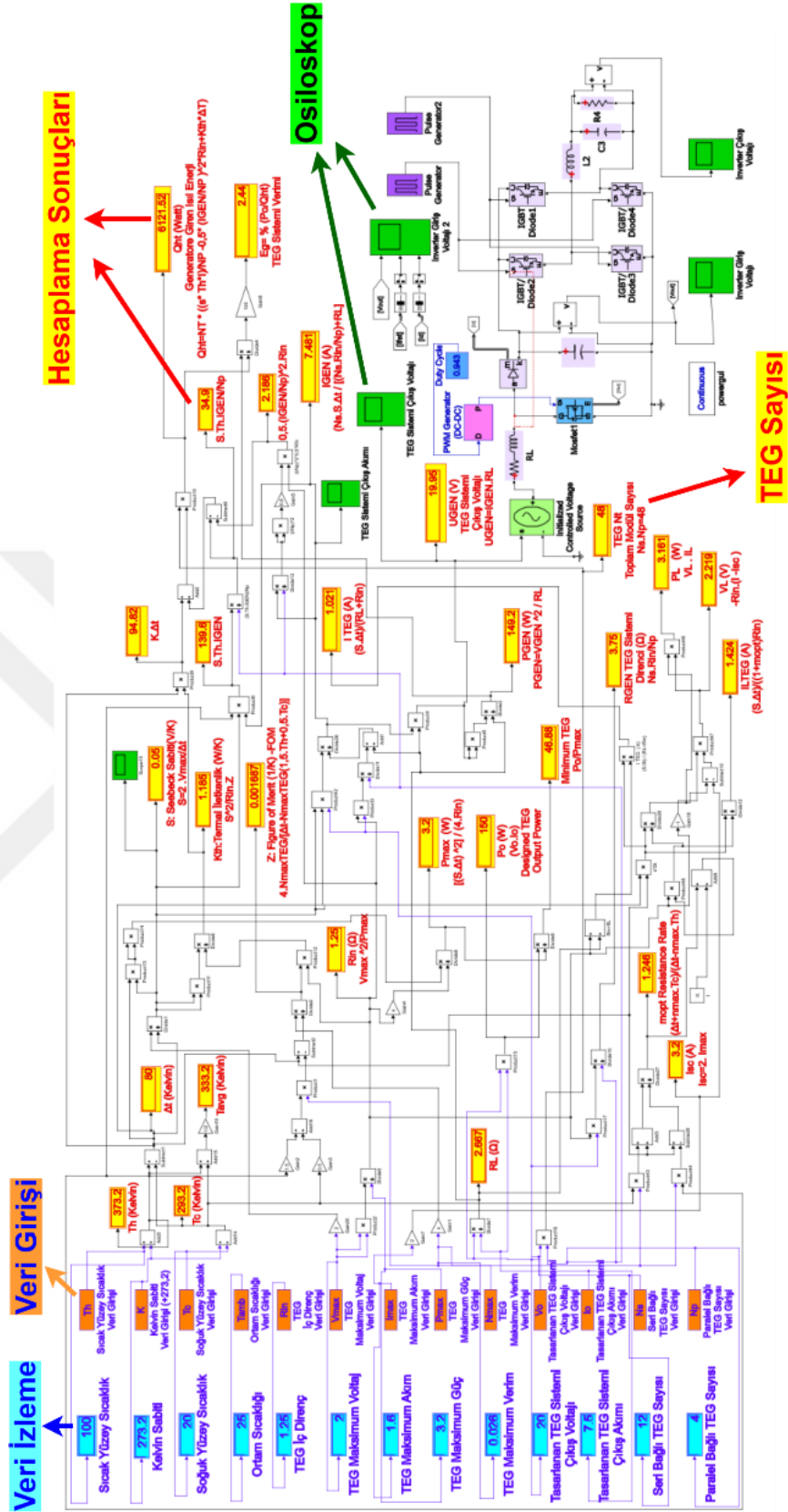
Şekil 3.6: $N_S=12$ ve $N_P=4$ olacak şekilde TEG sistemi bağlantı konfigürasyonu.

Sistem parametreleri 20 V DC çıkış gerilimi, 7,5 A çıkış akımı, 100 °C sıcak yüzey sıcaklığı, 20 °C soğuk yüzey sıcaklığı ve 150 W güç çıkışı olacak şekilde sistem modeli tasarlanmıştır. Bu verilere göre belirtilen TEG modülünden, benzetimde de 48 adet kullanılmıştır.

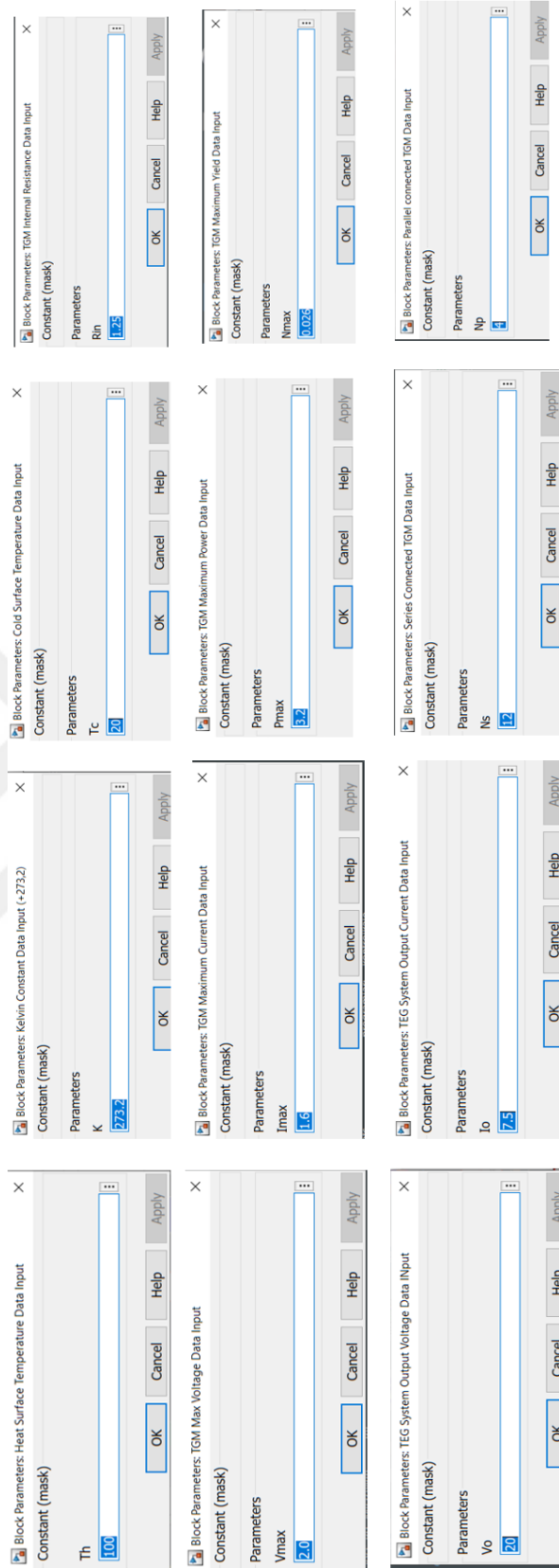
48 adet TEG'den en yüksek gücü elde etmek için, $R_{GEN} \approx R_L$ eşitliği gerçekleştirilmeye çalışılarak en uygun konfigürasyon, seri bağlı TEG sayısı $N_S=12$ ve paralel bağlı TEG sayısı $N_P=4$ olarak hesaplanmış, tüm TEG sistemi bağlantısı Şekil 3.6'da gösterilen konfigürasyon baz alınarak benzetime tabi tutulmuştur.

3.3.1 Benzetim Arayüzü

Şekil 3.6'daki konfigürasyona ait TEG sisteminin Matlab & Simulink modeli, Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Sunulan Matlab & Simulink benzetim modelinde, farklı güç parametrelerine göre, farklı TEG'lerin temel katalog verileri kullanılarak alternatif sistem benzetimleri yapılabilir. TEG sistemi tasarımı ve benzetimi için, Şekil 3.7'deki arayüzün solunda turuncu ile gösterilen veri girişlerinin bulunduğu kısma, TEG'lerin katalog verileri ile birlikte; TEG sisteminin sıcak yüzey sıcaklığı, soğuk yüzey sıcaklığı, seri bağlı TEG sayısı, paralel bağlı TEG sayısı, akım, gerilim ve güç bilgileri ayrı ayrı girilmelidir. Bunun için belirtilen kutucuklara ayrı ayrı çift tıklandıktan sonra açılan pencereye Şekil 3.8'de örneği gösterildiği gibi veri girişi yapılarak benzetim çalıştırılmalıdır.



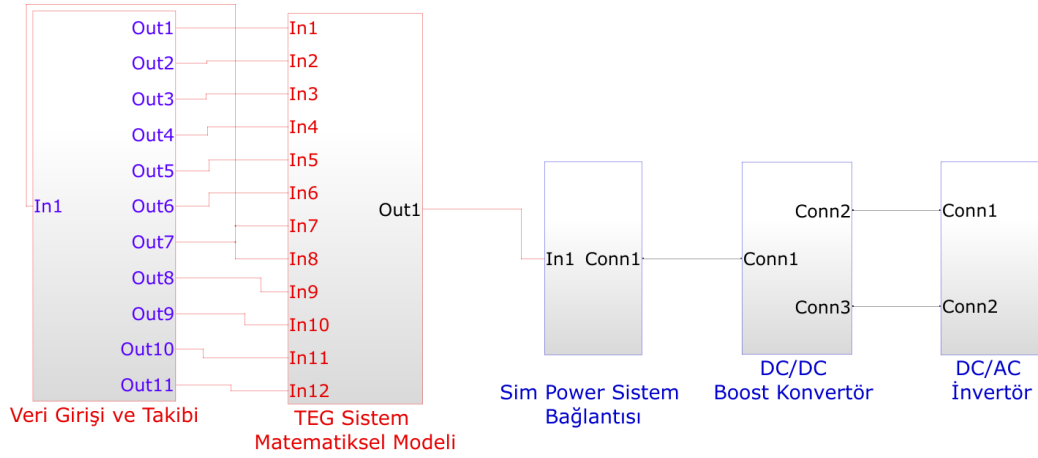
Şekil 3.7: TEG sistemi Matlab & Simulink modeli.



Şekil 3.8: Matlab & Simulink benzetim çalışmasında arayüze tasarım parametrelerinin girişi.

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere, benzetim modeli çalıştırılınca, tasarım değerleri, ekranın solundaki mavi renkli kutucuklarda görülebilmektedir. Benzetim sonundaki akım, gerilim, güç verilerine ilişkin hesaplamalar, arayüzdeki sarı renkli kutucuklarda görülebilenken, bu verilere ait dalga şekilleri, osiloskop olarak adlandırılan ve yeşil renkte gösterilen kutucuklara çift tıklanarak takip edilebilmektedir. Bu veriler değerlendirilerek en uygun tasarıma karar verilebilmekte, bu çalışmada olduğu gibi bir TEG sistemi kurulumu yapılabilir.

Şekil 3.7’de tamamı tek bir ekranda görülen TEG sistemi, Matlab & Simulink benzetiminin daha kolay anlaşılabilmesi için, Simulink yazılım özellikleri kullanılarak alt sistemlere ayrılmıştır. Şekil 3.9’da, alt sistemlere ayrılmış Matlab & Simulink benzetim ekranı görülmektedir. Simulink yazılımı çalışırken bu alt sisteme ayrılmış bölümlere, blok üstleri çift tıklanarak ulaşılabilir. Alt sistemlere ulaşıncı izlenebilen veriler, Şekil 3.7’de görülen TEG sistemi Matlab & Simulink modelleme ekranında görülen verilerle aynıdır.

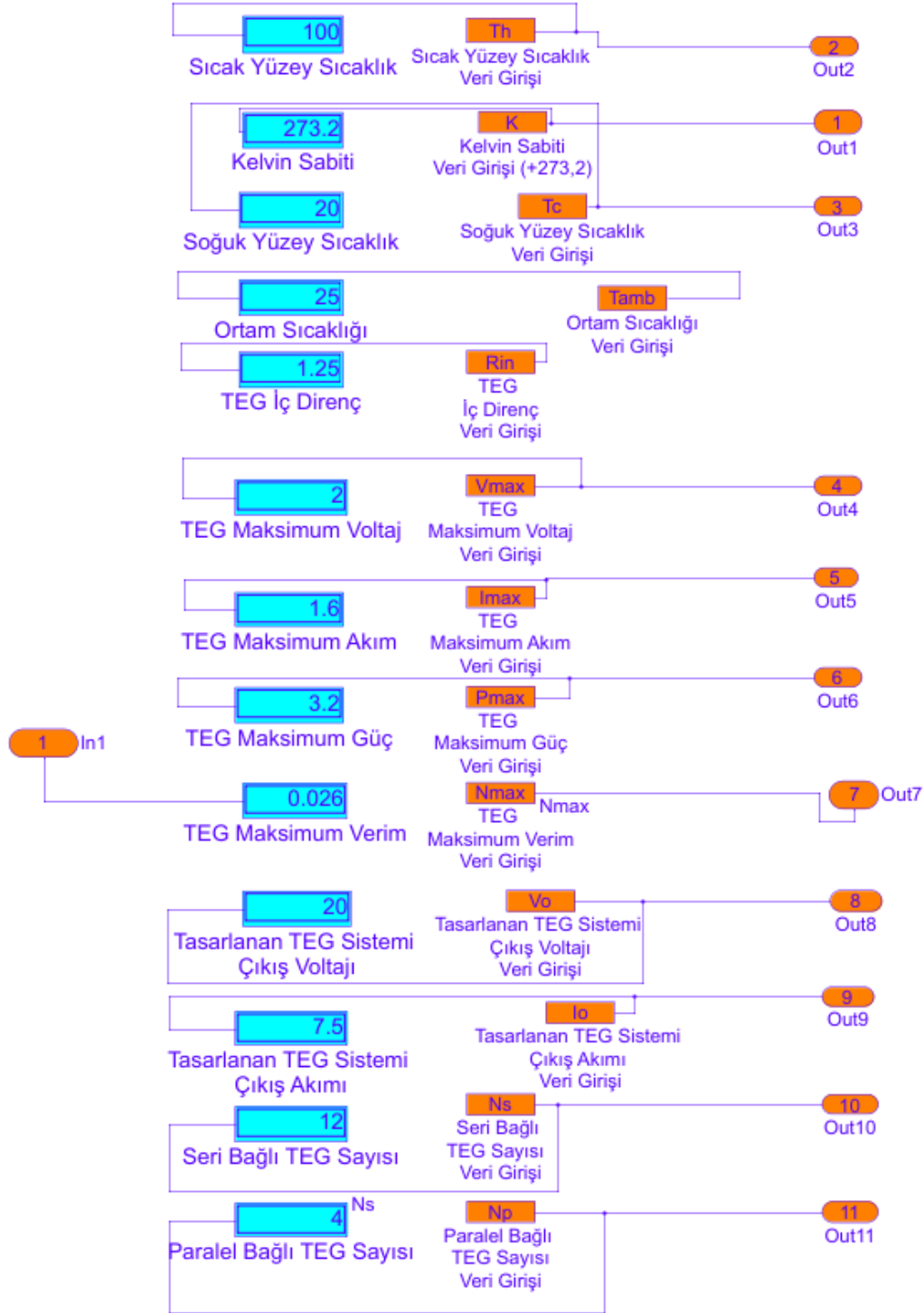


Şekil 3.9: TEG sistemi için Matlab & Simulink benzetimi alt sistem gösterimi.

Şekil 3.9’daki veri girişi ve takibi bölmesine çift tıklandığında, Şekil 3.10’da görülen benzetimin veri girişlerinin yapıldığı alan ve benzetim çalıştırıldıktan sonra veri girişlerinin izlenebildiği alan görülebilmektedir. Alt sistemde turuncu butonlara çift tıklanarak tasarım ve TEG katalog bilgileri sırasıyla girilip, benzetim çalıştırıldıktan sonra mavi kutucuklarda bu girilen tasarım ve katalog verileri izlenebilmektedir. Tasarım ve katalog verilerinde sık değişiklik yapılması halinde bu izleme ekranının veri takibi açısından oldukça faydalı olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3.9’da görülen TEG sistem matematiksel modeli kutucuğuna çift tıklanarak Şekil 3.11’de görülen TEG sistemi hesaplamalar alt sistemine ulaşılabilir. Bu alt sistemde matematiksel modele, formüllere ve bağlantılara yönelik değişiklik yapılabilir. Benzetim çalıştırıldıktan sonra ise sarı bölmelerde kırmızı yazıyla hesaplama sonuçları izlenebilmektedir. Yapılan çalışmada, Matlab & Simulink benzetimindeki sonuçlarla matematiksel formüllere göre yapılan hesaplardan elde edilen sonuçların aynı olduğu görülmüştür. İlk karşılaştırma sonuçlarından sonra Matlab & Simulink benzetimine farklı tasarım ve TEG katalog verileri girilerek hızlı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Simulink matematiksel modelinde elde edilen TEG sistemi gerilim değeri U_{GEN} ’in, Matlab & Simulink yazılımında Sim Power Sistem bloklarında bulunan elektriksel ekipmanlara bağlantısının yapılması gerekmektedir. Bunun için, Kontrollü Gerilim Kaynağı (KGK) bloğu kullanılır. Şekil 3.9’da görülen Sim Power Sistem Bağlantısı kutucuğuna çift tıklanarak, benzetimin çalıştırılmasında çok önemli olan KGK’ye erişilebilir. KGK bloğu bağlantı şekli Şekil 3.12’de görülmektedir. Bu bağlantı modülü sayesinde, matematiksel benzetim verisi elektriksel sinyale dönüştürülüp, Sim Power Sistem’de bulunan elektriksel ekipman ve malzemelere bağlantı yapılabilir. Matlab & Simulink kütüphanesinde bulunan KGK’nin kullanılmaya başlanmasıyla, neredeyse tüm elektriksel malzemelerin modellemesini içeriğinde barındıran “Sim Power Sistem” bloklarına bağlantı sağlanmıştır. KGK bloğu, Simulink giriş sinyalini eşdeğer bir gerilim kaynağına dönüştürür. Üretilen gerilim, bloğun giriş sinyali tarafından yönlendirilir. Devre, belirli bir AC veya DC gerilimle çalıştırılabilir. Benzetimi kararlı durumda başlatmak için, Simulink girişi, başlangıç değerlerine karşılık gelen sinüzoidal veya DC dalga formu olarak başlayan bir sinyale bağlanmalıdır (Mathworks 2021). Bu Simulink modellemesinde, TEG modülerinin seri-paralel bağlantıları ile modellenen TEG sistemi çıkışındaki matematiksel gerilim değeri, bu blok ile aynı özellikteki DC dalga formu ile belirlenen sinyale bağlanmıştır. Bu bağlantıdan sonra, matematiksel modeldeki DC işaretin Sim Power Sistem bloklarına bağlantısı yapılarak benzetim gerçekleştirilmiştir.



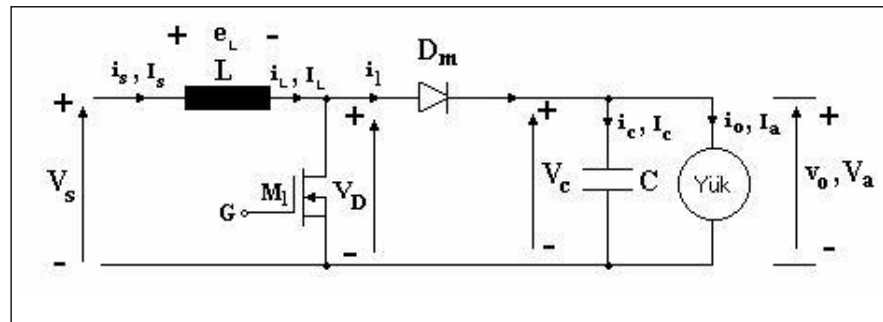
Şekil 3.10: TEG sistem benzetimi veri girişi ve takibi alt sistemi.



Şekil 3.12: Kontrollü gerilim kaynağı bloğu alt sistemi.

3.3.2 Boost Konvertör

Çıkış gerilimini transformatör kullanmadan yükseltebilme özelliğine sahip boost konvertör, DC transformatöre benzetilebilir. Çıkış gerilimi giriş geriliminden daha büyük olan boost konvertörler yükselten tip konvertörler olarak da bilinirler (Şekil 3.13). Bir Boost konvertör devresi iki modda çalışır. 1. Modda M_1 transistörü $t = 0$ anında ilettime geçer. Transistör iletimdeyken D_m diyodu üzerinden çıkış katına enerji akışı olmaz, bu şekilde çıkış izole edilir (Mohan 1989). Endüktans, V_s kaynağı tarafından beslenerek enerji seviyesi yükselir. Yükselen giriş akımı, L bobini ve M_1 transistörü üzerinden akar. M_1 transistörünün $t=t_1$ anında yalıtıma geçmesiyle başlayan 2. Modda, enerjili olan endüktansın ürettiği Elektromotor Kuvveti (EMK) ile D_m diyodu ilettime geçer. Yük, V_s kaynağı ve endüktansta biriken enerji ile beslenir. Yalıtım durumundaki M_1 transistörü tekrar iletim durumuna geçinceye kadar indüktör akımı düşecektir. L indüktansında depolanan enerjinin yüke aktarılması ile giriş gerilimi yükseltilir (Cetin 2002).



Şekil 3.13: Boost konvertör devresi (Mohan 1989).

Kayıpsız bir boost konvertör devresinde çıkış gerilimi ve giriş akımı parametreleri, eşitlik (3.22) ve (3.23)'te gösterildiği gibidir (Cetin 2002).

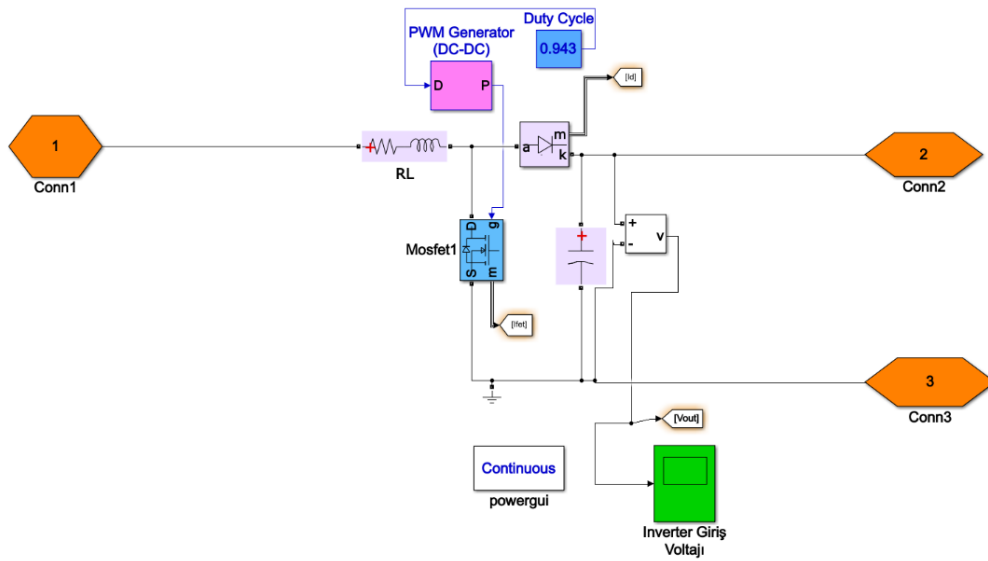
$$V_a = \frac{V_s}{1-D} \quad (3.22)$$

$$I_s = \frac{I_a}{1-D} \quad (3.23)$$

Çıkış gerilimi, Duty Cycle (D) olarak bilinen değişimlere karşı hassas olduğu için boost konvertörü kararlı halde tutmak zordur. (Cetin 2002). Matlab & Simulink modellemesinde tasarlanan DC/DC boost konvertör devresinde de D değerinin etkisi görülmüştür.

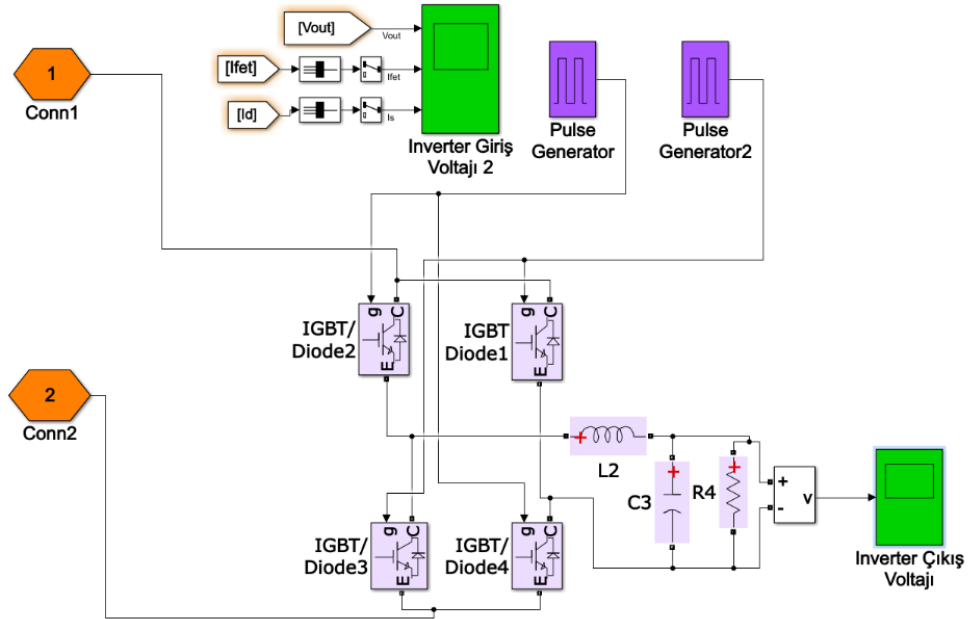
Konfigürasyonda matematiksel modellemeye göre, U_{GEN} değeri 19,95 V DC olarak elde edilmiştir. U_{GEN} değeri, KGK ile Sim Power Sistem'e bağlantı yapılabilir duruma getirilmiştir. Bu TEG sistemi benzetiminde kullanılan DC/DC boost konvertör ve DC/AC invertör, Matlab & Simulink kütüphanelerinde bulunan hazır cihaz modellerinden seçilmemiş, güç elektroniği elemanları kullanılarak tasarlanmıştır.

TEG sistemi modellemesinde elde edilen U_{GEN} değerinin yükseltilmesi için kullanılan DC/DC boost konvertör devresinin bulunduğu alt sisteme, Şekil 3.9'daki DC/DC boost konvertör kutucuğuna çift tıklanarak erişilebilir. DC/DC boost konvertör devre detayları Şekil 3.14'te görülmektedir. Devrede kullanılan güç elektroniği yarı iletkenlerinin seçimleri ve parametre ayarları, PWM ayarlamaları, Duty Cycle veri girişi, TEG sistemi çıkış değerine ve DC/AC invertörden elde edilmesi gereken çıkış gerilim değerine göre ayarlanabilir. DC/AC invertör çıkışında kullanılan gerilim değeri, şebeke gerilim ve frekans değerlerini sağlamalıdır. Bu nedenle DC/DC boost konvertör çıkışı da buna göre ayarlanmalıdır.



Şekil 3.14: DC/DC boost konvertör alt sistemi.

DC/AC invertör devresinin detaylarına ulaşmak için, Şekil 3.9'daki DC/AC invertör alt sistemine giriş yapılmalıdır. DC/AC invertör alt sistemi Şekil 3.15'te görülmektedir.



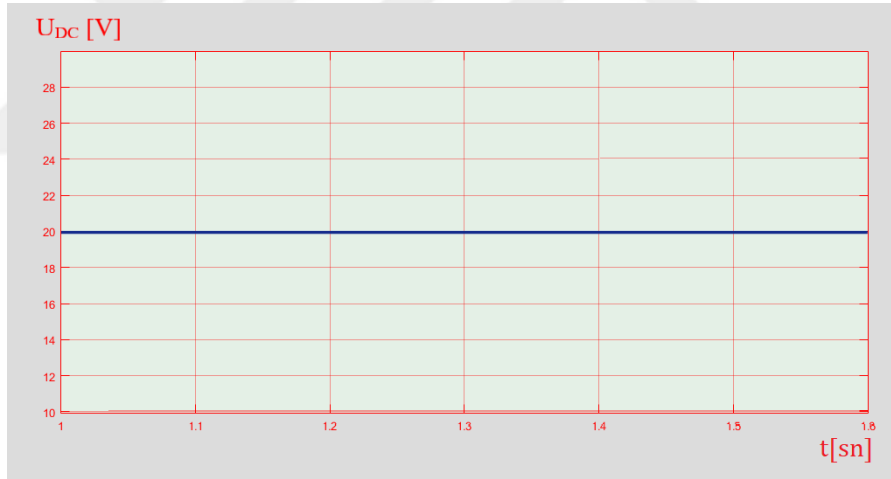
Şekil 3.15: DC/AC invertör alt sistemi.

Oluşturulan yapıda, DC/DC boost konvertör çıkışı DC/AC invertör girişine irtibatlandırılmış, sonrasında boost konvertör ile yükseltile TEG sistemi çıkış gerilim değeri DC/AC invertör ile AC gerilime dönüştürülmüştür. Alt sistemde IGBT'lerin anahtarlama için Pulse Generatorler kullanılmış, Pulse Generatorlerin anahtarlama

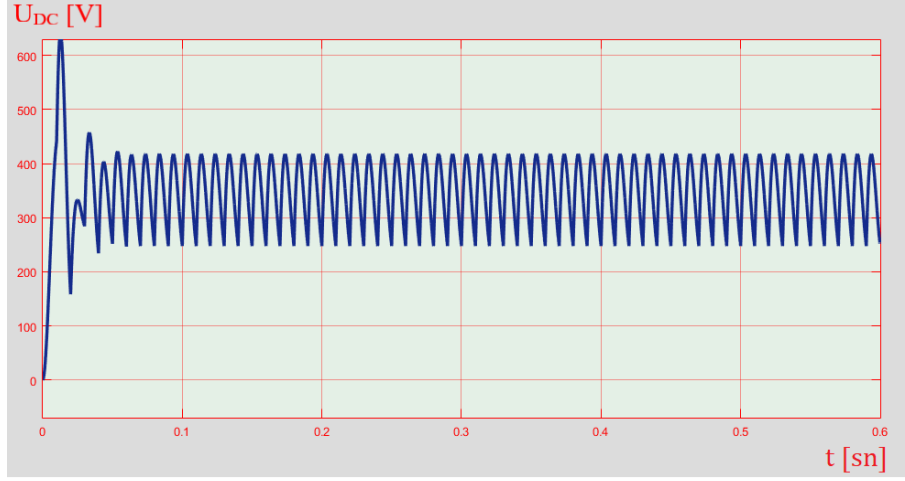
frekansları 50 Hz şebeke gerilimi elde edilebilmesi için ayarlanmıştır. AC gerilim dalga şeklinin sinüsoidal formda olması için filtre devreleri kullanılmıştır.

Bu modellemede U_{GEN} , Şekil 3.14'te görüldüğü gibi tasarlanan DC/DC boost konvertör devresine giriş sinyali olarak bağlanmış ve U_{GEN} değeri yükseltilmiştir. Yükseltile DC gerilim yine Şekil 3.15'te görüldüğü gibi tasarlanan DC/AC invertör devresi ile AC gerilime dönüştürülmüştür. Benzetim modeli çalıştırıldığında, DC/AC invertör çıkışında frekansı 50 Hz, periyodu 20ms, tepe değeri 323 V AC, etkin değeri ise 228 V AC olan dalga işareti elde edilmiştir.

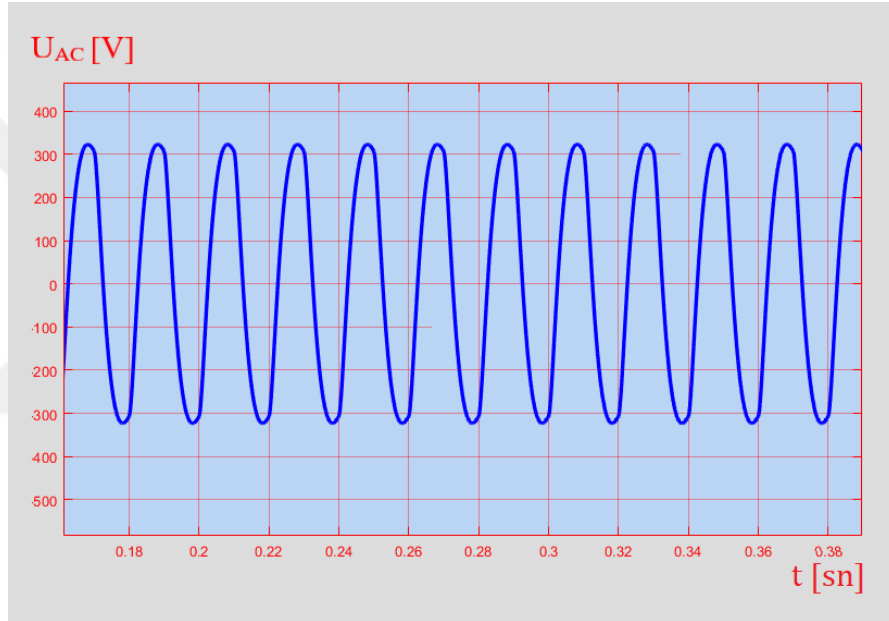
Benzetim sonucunda elde edilen TEG sistemi çıkış gerilimi dalga şekli Şekil 3.16'da, DC/AC invertör giriş gerilimi dalga şekli Şekil 3.17'de, DC/AC invertör çıkış gerilimi dalga şekli ise Şekil 3.18'de verilmiştir. Çıkış verileri ve grafikleri incelendiğinde TEG sisteminin, TEG sistemi çıkışındaki DC/DC konvertör ve DC/AC invertör devrelerinin benzetim çalışmalarının uygun olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.16: TEG sistemi çıkış gerilimi dalga şekli.



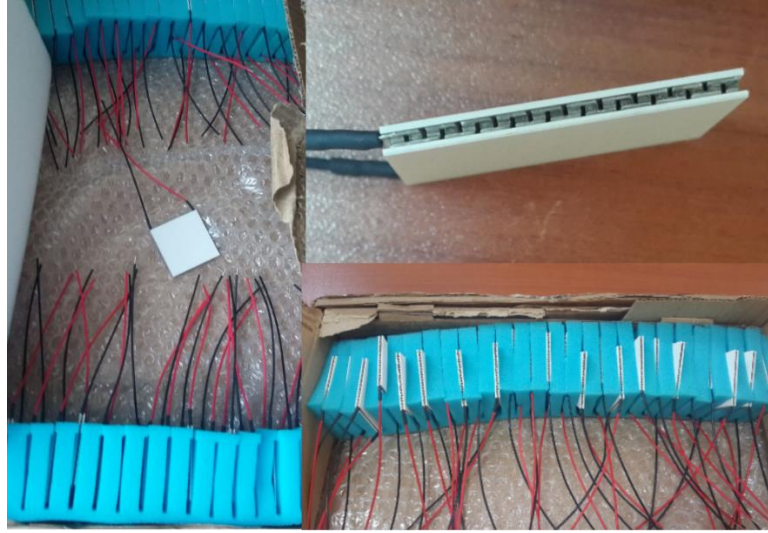
Şekil 3.17: DC/AC invertör giriş gerilimi dalga şekli.



Şekil 3.18: DC/AC invertör çıkış gerilimi dalga şekli.

3.4 Deney Düzeneği

TEG sisteminde Şekil 3.19’da görülen Kryotherm marka TGM-199-1.4-0.8 model TEG modülleri kullanılmıştır. Sistemden maksimum verimliliği elde edebilmek için, TEG’lerin bağlantı konfigürasyonları ve sirkülasyon sistemindeki sıcak/soğuk yüzey seçimleri, yüzeye maksimum ısı transferi gibi hususlar göz önüne alınarak montaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcak ve soğuk yüzey için iletkenlik, montaj kolaylığı, malzemenin kolay temin edilebilmesi, kaynak kriterleri ve maliyet kıstaslarına göre seçimler yapılmıştır.



Şekil 3.19: Temin edilen Kryotherm marka TGM-199-1.4-0.8 model TEG modülleri.

Sistem, operatör tarafından, PLC tabanlı izleme ve kontrol sistemi üzerinden otomatik olarak devreye alınabilmektedir. Ayrıca, yine operatörün girdiği değerlere göre, sistemdeki akışkan sıcaklıkları (soğuk hat ve sıcak hat) ve hat basınçları izlenebilmekte ve ayarlanabilmektedir. TEG sisteminden veri toplama süreci, sistem dahilindeki basınç ve sıcaklık sensörleri vasıtasıyla yapılmaktadır. Sensörlerden ölçülen veriler, PLC ünitesinin analog modüllerine gelmekte, sonrasında alınan veriler PLC ünitesi tarafından değerlendirilmektedir.

Kurulumu gerçekleştirilen TEG sistemi deney seti ile bu çalışma kapsamında hedeflenen faaliyetlerin yapılmasının yanı sıra, aşağıda belirtilen eğitim çalışmalarının da yapılabilmesi mümkündür.

- Termoelektrik generatorlerin jeotermal enerji santrallerine entegrasyonu.
- Termoelektrik generatorlerden elektrik enerjisi üretimi.
- Termoelektrik generatorlerin farklı seri-paralel bağlantı konfigürasyonları için, sistemin enerji üretiminde meydana gelen değişimlerin deneyimlenmesi.
- Jeotermal kuyudan gelen akışkanın sıcaklık ve basınç değerlerindeki değişimlerin, termoelektrik generator çıkışındaki enerji üretimine etkilerinin incelenmesi.
- PLC programlamanın öğrenilmesi.
- PLC ile analog verilerin (sıcaklık, basınç v.b.) elde edilmesinin öğrenilmesi.

- PLC ile bir sistemin kontrolünün öğrenilmesi (Örneğin; sistem basıncının limit değeri aşmayacak şekilde kontrol edilmesi).
- PLC kullanılarak jeotermal-termoelektrik sistemlerden akışkan sıcaklık, debi ve basınç verilerinin izlenmesi çalışmalarının yapılması.

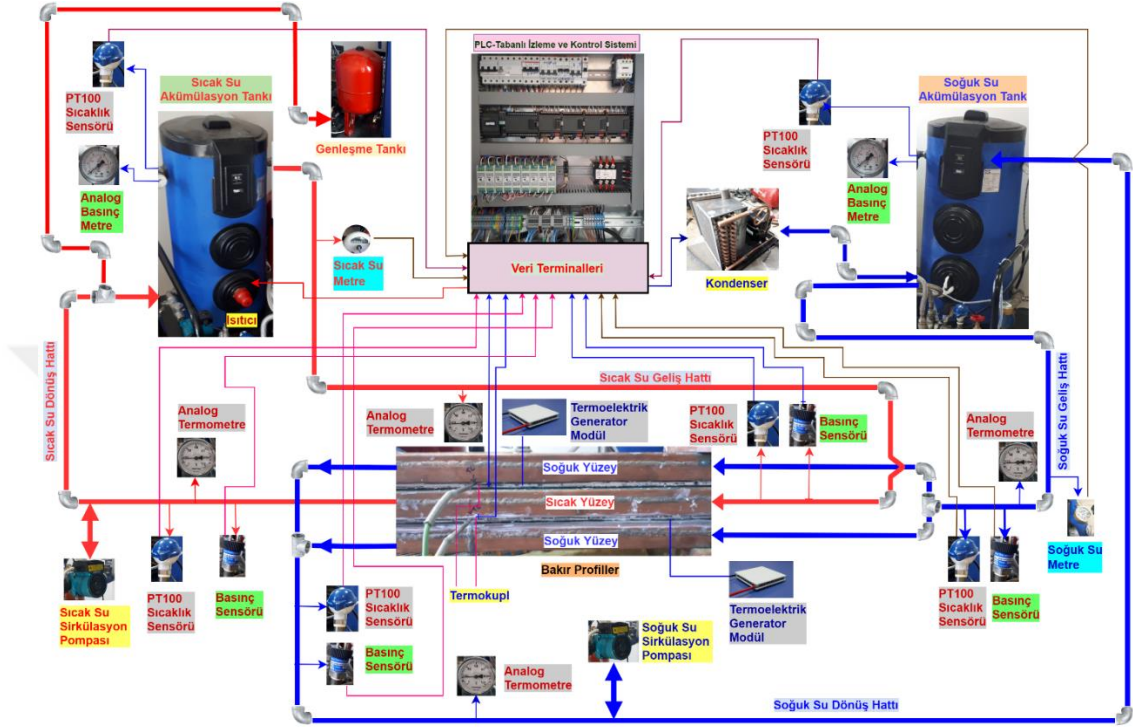
Oluşturulan TEG sistemi, modüler yapıda olup, üzerindeki tüm parçalar değiştirilebilir niteliktedir. Böylelikle farklı tipte ekipman kullanılarak, bu ekipmanın genel sistem üzerinde oluşturduğu farklı etkiler gözlemlenebilir. Örneğin; TEG modüllerinin tipleri, kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Bu da deney setini kullanan kişilere, farklı marka ve modeldeki TEG modülleri üzerine çalışma yapabilme ve bu modülleri karşılaştırabilme imkanını vermektedir. Ayrıca TEG sisteminin JES’lerde kullanılması durumunda da modüler yapı sayesinde verimlilik çalışmaları için alternatif denemeler yapılabilir.

TEG sistemi, kullanıcı güvenliğini ön plana çıkaran bir yapıda tasarlanmıştır. Bilindiği üzere, alçak gerilim elektrik tesislerinde dokunma gerilimi 50 V AC düzeyindedir. Herhangi bir tesiste elektriksel kaçak oluşması halinde, bu arızanın 30 ms’de temizlenmesi gerekir. Tasarlanan TEG sistemi, 3-faz 400 V / 50 Hz AC elektrik enerjisi ile çalışmaktadır. Sistemde oluşabilecek elektriksel kaçak, PLC kontrol panosu içerisinde yer alan 40 A / 30 mA’lık Kaçak Akım Koruma Rölesi (KAR) tarafından algılanmakta ve sistemin enerjisi, bu röle tarafından otomatik olarak kesilmektedir. Sistemdeki tüm elektriksel ekipman, aşırı akım ve kısa devre durumlarına karşı, Minyatür Devre Kesicilerle (MCB-Miniature Circuit Breaker) korunmaktadır. Herhangi bir acil durumda TEG sistemini kullanan kişi kontrol panosu üzerindeki acil stop butonuna basarak tüm sistemin çalışmasını durdurabilmektedir.

3.4.1 TEG Sistemi Genel Yapısı

TEG Sistemi’nin çalışma prensibinin daha iyi anlaşılması için, Şekil 3.20’de görülen akış şeması oluşturulmuştur. Bu akış şemasında sıcak ve soğuk su tankları, sıcak su tankında ısıtıcı ile ısıtılan sıcak suyun sıcak yüzeyden geçerek, tekrar sıcak su tankına dönmesi, soğuk su tankında soğutma sistemi ile soğutulan soğuk suyun alt ve üst soğuk yüzeylerden geçerek, tekrar soğuk su tankına dönmesi gösterilmiştir. 2 adet soğuk yüzey ve bunların arasındaki sıcak yüzey arasına yerleştirilen 48 adet TEG

modülü, yine ilgili akış şemasında verilmiştir. Şemada, PLC Tabanlı Veri İzleme ve Kontrol Sistemi (PVKS) ile birlikte, sıcaklık sensörlerinin, basınç sensörlerinin ve akış ölçerlerin TEG Sistemi'ndeki bağlantı noktaları gösterilmiştir. Bu ölçüm noktalarından PLC sistemine yapılan bağlantılar da sembolize edilmiştir.



Şekil 3.20: TEG sistemi genel prensip şeması.

Sistemde bulunan her biri 100 litre depolama kapasiteli sıcak ve soğuk su akümülayon tankları, sırasıyla bir jeotermal enerji santral sahasındaki üretim kuyuları ile santral soğutma sistemini modellemek için kullanılmıştır. Şekil 3.20'de görülen sıcak su akümülayon tankı, gerçek bir jeotermal santraldeki üretim kuyusunu temsil eder. Üretim kuyusundaki jeotermal akışkanın sıcaklığını modelleyebilmek için, Şekil 3.20'de görüldüğü üzere, akümülayon tankına bir ısıtıcı entegre edilmiştir. Isıtıcı ünite, üç fazlı bir rezistans ısıtıcı olup, elektriksel gücü 10 kW'tır. Isıtıcı, akümülayon tankı içerisindeki suyun sıcaklığını, bu çalışmada kullanılan TEG'ler için gerekli olan 100 °C'ye kadar çıkarabilmektedir. Sıcak su sistem basıncının aşırı yükselmemesi için, deney setine bir adet genleşme tankı ilave edilmiştir (Şekil 3.20). Soğuk su akümülayon tankı ise, jeotermal enerji santralinin soğutma sistemini temsil eder. Soğuk su akümülayon tankının içerisindeki suyun sıcaklığı, Şekil 3.20'de görülen kondenser kullanılarak, +3 °C'ye kadar düşürülebilmektedir. Bu şekilde üretilen sıcak

ve soğuk su, Şekil 3.20’de görülen sirkülasyon pompaları ile su hatları üzerinden bakır profillere gönderilir. Akümülayon tanklarındaki suyun sirkülasyonu, her biri 96 W gücündeki iki adet sirkülasyon pompası ile yapılmaktadır. altmış sirkülasyon pompası, dakikada 58 litre suyu sirküle edebilmektedir (LEO 2020).

Şekil 3.20’de görülen bakır profillerin içinden geçen su, ısısını profile aktarır. Bakır profiller arasında yer alan TEG’lerin sıcak ve soğuk yüzleri bakır profiller ile ısı alış-verişine girer. İki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşan TEG’ler, böylelikle DC elektrik enerjisi üretmeye başlar.

3.4.2 TEG Modüllerinin Tesisi

Portatif olarak imal edilen deney seti, mini bir enerji santrali özellikleri göstermektedir. TEG sistemi tasarım parametreleri seçilirken, sıcak/soğuk su hat ekipmanları, vanalar, hava atıcılar, TEG modül bağlantı profilleri, gerçek bir JES’te çalışabilecek nitelikte seçilmiştir. Deney seti ile birlikte kurulumu ve yazılımı yapılan PVKS ile TEG sistem verileri kontrol edilebilmektedir. Sisteme çeşitli güvenlik parametreleri de tanımlanmıştır.

3.4.2.1 TEG Montaj Detayları

TEG'den optimum performans elde etmek için, üretici firma tavsiyeleri ve araştırma verileri dikkate alınarak bazı önemli uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu hususlar aşağıda detaylandırılmıştır.

Öncelikle TEG'in monte edileceği yüzeyin mümkün olduğunca düz ve pürüzsüz olmasına çalışılmıştır. Modül, ısı kaynağı ve ısı emicisi arasında doğru şekilde (hem ısı transferini mümkün kılacak hem de TEG modüllerinin deformasyonu önleyecek şekilde) kuvvet uygulanmıştır. TEG modülleri üzerindeki yüklemeyi optimize etmek için cıvata kullanılarak baskı şiddeti ayarlanmıştır. TEG'in sıcak tarafının sıcaklığı ayarlanırken TEG modül ve tesisat elemanları sınır değerlerine dikkat edilmiştir. Sıcak yüzey profil genişliğinin TEG modülünün genişliğinden 10 mm daha fazla olmasına çalışılmıştır. Bu noktada amaçlanan, TEG'in sıcak yüzeyine

mümkün olduğ/unca daha homojen bir şekilde ısı transferi sağlayabilmektedir. Montaj cıvataları mümkün olduğunca ince, tercihen düşük ısı iletkenliğine sahip, paslanmaz elik malzemeden seçilmiştir. Yüzeyler arasında daha iyi temas ve ısı iletkenliği sağlamak, ayrıca iki yüzey arasında katı-katı teması önlemek için ince tabaka halinde ısı transfer bileşiği (termal pasta) kullanılmıştır.

3.4.2.2 Bakır Kutu Profil İmalat Aşaması

TEG sisteminden maksimum verim elde edebilmek için, TEG'lerin bağlantı konfigürasyonları ve sirkülasyon sistemindeki sıcak/soğuk yüzey seçimleri, yüzeye maksimum ısı transferi gibi hususlar göz önüne alınarak montaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney setindeki TEG'ler, akümülayon tankları, sirkülasyon pompaları, genleşme tankı, soğutucu ve sensörler piyasadan mamul mal olarak temin edilmiş ekipmandır. TEG'lerin yerleştirileceği ve TEG'lerle arasında ısı transferi oluşacak bakır kutu profillerin ise, imal edilmesi gerekmiştir. Sıcak ve soğuk yüzey için iletkenlik, montaj kolaylığı, malzemenin kolay temin edilebilmesi, iletken yüzey kaynak kriterleri ve maliyet kıstaslarına göre seçimler gerçekleştirilmiştir. Sıcak ve soğuk yüzeylerde kullanılması planlanan alüminyum soğutucudan; tek parça halinde üretimin olmaması, bu noktada birkaç parçanın kaynak yapılmasının gerekliliği ve alüminyum malzemelerin kaynak denemelerinde yaşanılan başarısızlıklar gibi nedenlerden dolayı vazgeçilmiştir. Bu noktada, bahsi geçen olumsuzlukları taşımayan bakır profil malzeme kullanılması yoluna gidilmiştir.

TEG modüllerinin boyutları, Tablo 3.1'de görüldüğü üzere 40 x 40 x 3,2 mm'dir (W x L x H). Dolayısıyla, TEG modüllerinin yerleştirileceği platformun genişliği de en az 40 mm olmalıdır. TEG modüllerinin yerleştirilmesi maksadıyla L-tip bakır profillerden dört adedinin, birbirlerine kaynaklanarak bir adet bakır kutu profil elde edilmesi planlanmıştır. Boyutları 80 x 1.050 x 40 mm (W x L x H) olan bu bakır kutu profillerden sistemde toplamda 3 adet mevcuttur. Projede ihtiyaç duyulan bakır kutu profil miktarı üretici firmaların minimum sipariş şartlarını sağlamadığı için hazır bakır kutu profil temini yapılamamıştır. Bunun yerine, bakır sacın bükülerek köşebent oluşturulması, sonrasında köşebentlerin birbirlerine kaynak yapılarak bakır kutu profil oluşturulması fikri benimsenmiştir.

İmalat için, Şekil 3.21’de görülen bakır L profiller kullanılmıştır. Şekilde görülen L profillerden dört adedi, bir dikdörtgenler prizması oluşturacak şekilde bir araya getirilerek kaynak işlemi için hazırlanmıştır.

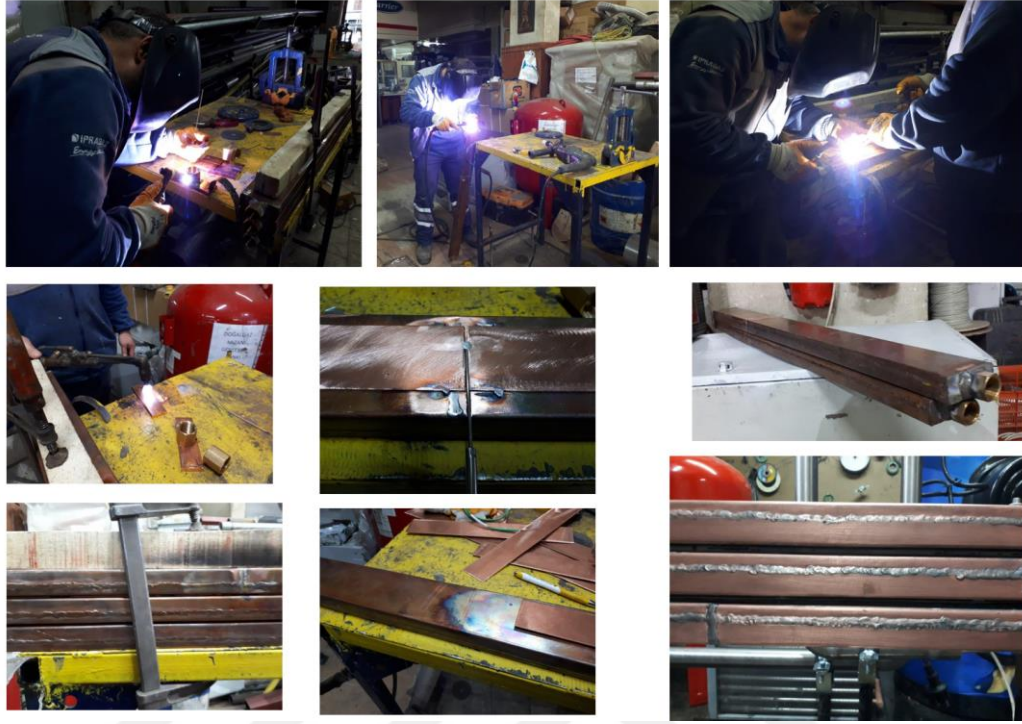


Şekil 3.21: Bakır L profiller.

TEG sisteminde kullanılan toplam 48 adet TEG modülünün profiller arasında iki sıra şeklinde dizilmesi uygun görülmüştür. İki adet soğuk yüzey, bir adet de sıcak yüzey için olmak üzere 3 adet kutu profile göre sistem tasarlanmıştır. Bir sıraya karşılık gelen 24 adet TEG modülü sıralı bir şekilde dizildiğinde, bir adet TEG modülünün 40 mm kenar uzunluğunda olması ile birlikte imal edilecek kutu profilin 105 cm uzunluğunda olması sağlanmıştır. 105 cm gibi bir uzunluktaki bakır köşebentlerden kaynak yoluyla kutu profil oluşturulurken; profilin esneme yapabileceği ve bakır kaynağının tutmama ihtimali de bir risk olarak öngörülmüştür.

Bakırın içeriğinde bulunan oksijenin kaynak için yeterli olmaması, kaynak işlemi esnasında bakır oksit oluşumuna neden olur. Bakırın bu özelliği nedeniyle kaynak işlemi uzun sürdürülemez. Yaklaşık 1.083 °C’de eriyen bakırın sıvı hale çok hızlı geçtiği bilinir. Bakırın ısı iletkenliği ve genleşmesi diğer metallerden çok daha fazladır (MEGEP 2011). Bu nedenle, bakır kaynağı sırasında hızlı soğuma gerçekleştiği için profilde esnemeler meydana gelir. Bakır çok hızlı bir şekilde ısıyı soğuduğu için, sistemde kullanılacak bakır profilin üretim prosesi esnasında tamamen oksitsiz ve ergime sıcaklığı bakırdan daha düşük olan teller kullanılmıştır. Bakır köşebentlerin kaynak işleminde bronz kaynağında da kullanılan ve boraks olarak

adlandırılan toz kullanılmış ve bu şekilde bakır kaynağı gerçekleştirilmiştir. Bakır kaynak yapım aşamaları Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22: Bakır profilin kaynak işlemi ile oluşum aşamaları.

Bakır profil oluşturulurken bakırın hızlı soğuması nedeniyle küçük miktarda esnemeler meydana gelmiştir. Bu esnemeler sonucunda, bakır kutu profillerin yüzey düzgünlüğünde bozulmalar ve profil boyunca homojen baskı şiddetinde azalmalar meydana gelmiştir. Yine bakırın hızlı ısınma ve soğutma özelliği kullanılarak, üretilen profiller ısıtılırken üzerlerine baskı uygulanarak profillerin yüzeyinin düz ve homojen olması, Şekil 3.23’te görüldüğü gibi sağlanmıştır. Kaynak prosesi ile yapılan birleştirme uzun olduğu için, punta kaynak yapılmıştır. Isınan bakır yüzeylerin düzlemselliğini kaybetmemesi ve malzeme dayanımının sağlanması için, aynı anda bakır profil hem ısıtılarak hem de tüm yüzeye eş baskı uygulanarak, bakır profillerin TEG’lere temas edeceği yüzeyin düzgün olması sağlanmıştır.



Şekil 3.23: Bakır profil yüzeyinin düzleştirilmesi.

Proses sonucunda, toplamda 12 adet bakır L profil kullanılarak 3 adet bakır kutu profil elde edilmiştir. Kutu profillerin kaynakla birleştirilmelerinden dolayı, TEG'lerin yerleştirileceği yüzeyleri düz olmamıştır. Düz bir yüzey oluşturabilmek için, kutu profillerin üzerlerine, Şekil 3.24'te görülen bakır levhalar yerleştirilmiştir.



Şekil 3.24: Bakır profil yüzeyine lama ve TEG montajı.

Kryotherm TEG montaj talimatları doğrultusunda bakır profilin TEG'lerin temas yüzeylerine TEG ölçüsünde ince lama puntalanmıştır. Bu işlemle TEG'in sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki ısı transferinin ve sıcak-soğuk profiller arasındaki mesafenin arttırılması hedeflenmiştir. TEG'lerin yüzey sıcaklıklarını ölçebilmek

amacıyla, özel üretim 2 mm kesitli termokuplların montajına yönelik olarak, TEG'lerin altına gelecek şekilde lamalarda Şekil 3.24'te görüldüğü gibi bağlantı boşluğu oluşturulmuştur.

Kutu profiller içerisinden akan suyun ısınıı daha kolay ve daha fazla miktarda TEG'lere transfer edebilmesi için, kutu profillerin içerisine, Şekil 3.25'te görüldüğü üzere, zig-zag şekli verilmiş bakır şeritler yerleştirilmiştir. İmal edilen bakır kutu profillerin imalat sonrası son hali, Şekil 3.26'da sunulmuştur.



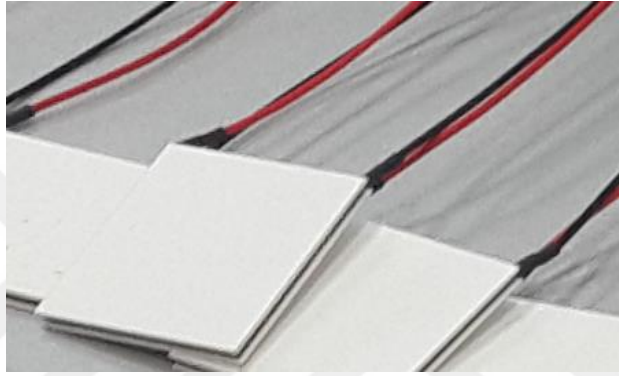
Şekil 3.25: Isı transferi için kullanılan zig-zag bakır şeritler.



Şekil 3.26: İmal edilen bakır kutu profillerin nihai görünümü.

3.4.2.3 TEG Modüllerin Bakır Kutu Profil Aralarına Yerleştirilmesi

Kutu profillerin imalatı sonrası, TEG'lerin kutu profillerin üzerine monte edilmesi aşamasına geçilmiştir. Deney setinde; iki adet soğuk su akışı için bakır kutu profil, bir adet de sıcak su akışı için bakır kutu profil mevcuttur. Öncelikle mevcut TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzeyleri tespit edilmiştir. TEG'lerin Şekil 3.27'de görülen yüzeyleri soğuk yüzey, arka yüzeyleri ise sıcak yüzeydir. TEG'ler sıcak ve soğuk bakır profillerle temas edeceğinden, doğru şekilde monte edilmeleri gerekir. Yanlış bağlantı halinde, TEG çıkış güçleri düşük olur.



Şekil 3.27: TEG modül görünüşü.

Yüzey tespitinin yapılması sonrası, sıcak ve soğuk profillerin TEG monte edilecek yüzeylerine, TEG'lerin temas yüzeyine ısı iletimini artırmak için Şekil 3.28'de görüldüğü üzere termal macun sürülmüştür. Termal macun kullanımdaki amaç, TEG ile bakır profil arasındaki ısı transferini arttırmaktır. Bu şekilde 24 adet TEG, tek bir bakır kutu profil üzerine Şekil 3.29'da görüldüğü üzere yerleştirilmiştir. Sonrasında, bu TEG'lerin üzerine, içinden sıcak su geçecek olan ikinci bakır kutu profil yerleştirilmiştir. Bu bakır kutu profilin üzerine de, Şekil 3.30'da görüldüğü üzere diğer 24 adet TEG yerleştirilmiştir. Ardından en üste, içinden soğuk su geçecek olan kutu bakır profil de yerleştirilerek, Şekil 3.31'de görüldüğü gibi işlem tamamlanmıştır.



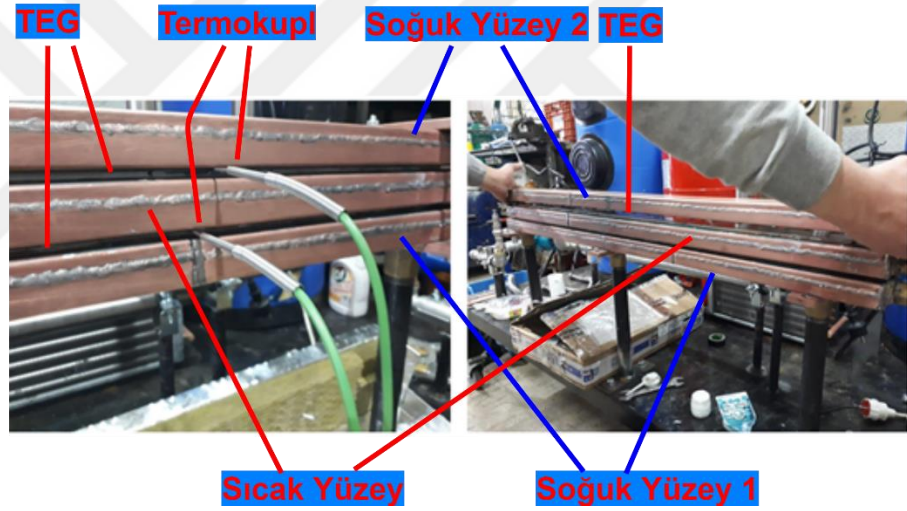
Şekil 3.28: TEG yüzeylerine termal macun sürülmesi.



Şekil 3.29: TEG'lerin soğuk su taşıyan bakır profil üzerine yerleştirilmesi.



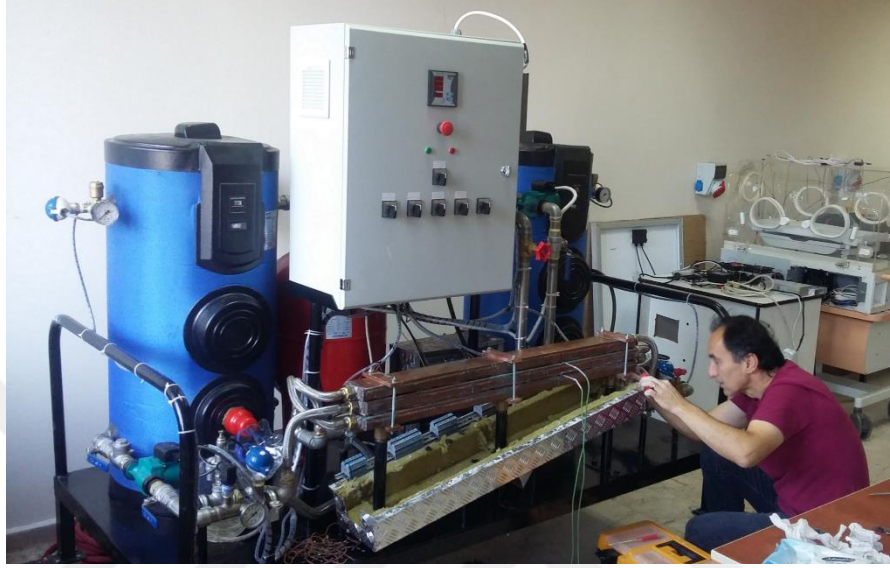
Şekil 3.30: TEG'lerin sıcak su taşıyan bakır profil üzerine yerleştirilmesi.



Şekil 3.31: TEG modül montajının tamamlanması.

Özetle; sistemde 3 adet bakır kutu profil kullanılmıştır. Ortadaki profilden sıcak su, alt ve üstteki profilden soğuk su geçecek şekilde oluşturulan yapı, sirkülasyon sistemine dahil edilmiştir. Sıcak su geçen profilin alt yüzeyi ile soğuk su geçen ilk profil arasında ve sıcak su geçen profilin üst yüzeyi ile soğuk su geçen ikinci profil arasında yirmi dörder adet TEG monte edilmiştir. Şekil 3.31'de, TEG yüzey sıcaklığı ölçümü için montaj monte edilen termokupllar görülmektedir. TEG kablolarının sıcaktan etkilenmemesi için, profil altlarına gelen kısımlar ısı ile daralma özelliğine sahip makaronla sarılmıştır.

Termokupl yerleşimi sonrasında, bakır profillerin ısıl izolasyonunu sağlayacak, TEG sisteminin bakır profil ölçülerine göre hazırlanan, içi cam yünü, dışı alüminyum özellikte imal edilen ve de Şekil 3.32’de görülen alüminyum termal izolasyon kutusu monte edilmiştir. Montaj işleminin sonunda, alüminyum kutu kapatılarak ısıl izolasyon işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.32: Alüminyum termal izolasyon kutusu montajı.

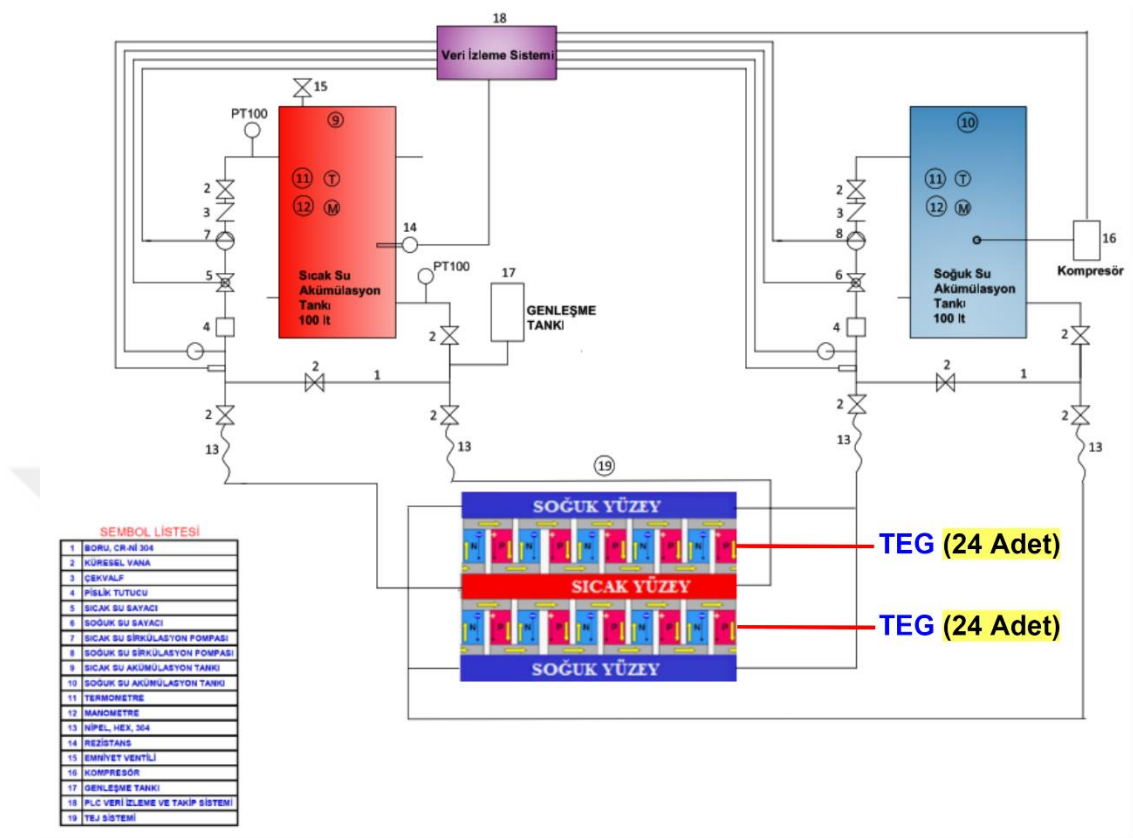


Şekil 3.33: Alüminyum termal izolasyon kutusu nihai görünümü.

3.4.3 Sıcak/Soğuk Su Sirkülasyon Sistemi

Şekil 3.34’te tek hat şeması görülen, hem gerçek bir jeotermal tesisteki jeotermal sıcak su hattına tesis edilebilecek, hem de laboratuvar ortamında sıcak su /

soğuk su hattına bağlantı yapılabilecek şekilde tasarlanan sistem, sızdırmazlık ve basınç testleri tamamlanarak devreye alınmıştır.



Şekil 3.34: Sıcak/soğuk su sirkülasyon sistemi tek hat şeması.

Sistemde bulunan her biri 100 litre depolama kapasiteli sıcak ve soğuk su akümülayon tankları, sırasıyla bir jeotermal enerji santral sahasındaki üretim kuyuları ile santral soğutma sistemini modellemek için kullanılmıştır.

TEG sisteminde verimlilik artışı için sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının artırılması gerekmektedir. Bunu sağlamak için, sıcak su akümülayon tankındaki suyun ısıtılması, soğuk su akümülayon tankındaki suyun ise soğutulması icap eder. Bu maksatla, oluşturulan PVKS düzeneği üzerinden sistem, sürekli olarak kontrol edilebilmektedir (detayları ilerleyen bölümlerde sunulmuştur).

3.4.4 TEG Sistemi Veri Toplama ve Ölçüm Ekipmanı

Deney setinde, akışkan sıcaklıklarının ölçümü için, koruyucu kılıf çapı 6 mm ve 9 mm olan iki ayrı tipte toplam 6 adet PT100 sıcaklık sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.20). Deney setindeki farklı su hattı çaplarına göre seçilen bu iki tip sensör rezistans termometre sınıfında olup, sıcaklık değişimlerine göre DIN7360 standartına uygun olarak direnç değeri vermektedir. Seçilen sensörler, $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında çalışabilmektedir. Rezistans termometreler, düşük sıcaklıklarda termokupllara göre daha doğru değer verirler (Elimko 2019). Bu sebeple, deney setinde yapılacak sıcaklık ölçümleri için bu tipte sensörler tercih edilmiştir. Kullanıcının, deney setindeki akışkan sıcaklıklarını analog olarak da takip edebilmesi için, 2 adet $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası ölçüm yapabilen analog termometre kullanılmıştır (Şekil 3.20). Toplam 6 adet PT100 sıcaklık sensorünün ikisi, akümülayon tanklarının içerisindeki suyun sıcaklık değerini, ikisi sıcak su ana hattının girişindeki ve çıkışındaki su sıcaklığını, kalan 2 adedi ise, soğuk su hattının girişindeki ve çıkışındaki su sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Sıcak ve soğuk su hatlarındaki sıcaklığı izlemek için, ayrıca iki adet analog termometre mevcuttur.

Termokupllar, Şekil 3.20 ve Şekil 3.35'te görüldüğü üzere, bakır profillerin arasındaki TEG modüllerinin yüzey sıcaklıklarını ölçmek için kullanılmıştır. Kullanılan termokupllar mineral izoleli olup, uzun süreli sıcaklık ölçümü yapılması gereken zorlu uygulamalarda, bükülebilir yapıları nedeniyle tercih edilirler. Mineral izole (sıkıştırılmış yüksek saflıkta metal oksit tozları) ekipman, ölçüm tellerinin ve metal kılıfın birbirinden izole edilmesini sağlar (Elimko 2019). Bu bağlamda, TEG yüzey sıcaklıklarının ölçülmesi için, IEC 60584 standartlarına göre üretilmiş, $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ölçüm yapabilen, yüksek doğruluk derecesine sahip Elimko termokupllar kullanılmıştır. TEG'lerin yüzey sıcaklıklarının ölçülmesi için, üç ayrı K-tipi termokupl mevcuttur. Bunlardan birincisi, Şekil 3.20'de görüldüğü üzere, üstte ve ortada yer alan bakır profiller arasındaki TEG'lerin soğuk yüzey sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. İkinci termokupl, ortada ve altta yer alan bakır profiller arasındaki TEG'lerin sıcak yüzey sıcaklığını ölçmek içindir. Bakır profillerin arkasında kaldığı için Şekil 3.35'te görülen üçüncü termokupl ise, ortada ve altta yer alan bakır profiller arasındaki TEG'lerin soğuk yüzey sıcaklığını ölçmek için tesis edilmiştir.



Şekil 3.35: TEG yüzey sıcaklığını ölçmek için kullanılan termokupl.

Deneylerde kullanılan su miktarını tespit etmek için, sıcak ve soğuk su akümüülasyon tankı çıkışlarına birer adet su sayacı bağlanmıştır. Sıcak su akümüülasyon tankına bağlı su sayacı, 0,1 °C – 130 °C su sıcaklıklarında çalışabilen ve 16 bar su basıncına dayanabilen bir cihazdır (Aparator Powogaz 2018). Soğuk su akümüülasyon tankı çıkışındaki su sayacı ise, 30 °C çalışma sıcaklığına ve 16 bar maksimum basınç dayanımına sahiptir (Maddalena 2020). Her iki cihaz da, sistemdeki maksimum su basıncı (4 bar) ve maksimum su sıcaklığı (sıcak su için 100 °C, soğuk su için 20 °C) değerlerini sağlayacak özellikte oldukları için tercih edilmiştir.

Deney setindeki sıcak ve soğuk su akışkan basınç değerlerini ölçmek için, 4 adet basınç sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.20). Bu sensörler, sıcak su hattının bakır profillere girdiği bölüme, soğuk su ana hattının bakır profillere girdiği bölüme, sıcak su hattının bakır profillerden çıktığı bölüme ve soğuk su ana hattının bakır profil çıkışındaki bölümüne monte edilmiştir. Böylelikle, sıcak ve soğuk su hatlarındaki basınç sürekli olarak ölçülmektedir. Seçilen ekipman, deney setindeki üst limit değer olan 4 bar basınç değerine kadar ölçüm yapabilen, 0 - 10 V DC çıkış verebilen, piezoresistive tiptedir (Atek 2019). Sistemdeki PVKS, basınç sensörlerinden gelen anlık bilgileri sürekli izleyerek, basıncın tehlikeli bir şekilde limit değere kadar yükselmesi halinde, sistemi devre dışı bırakmaktadır. PLC sistemine veri gönderebilen bu basınç sensörlerinin yanı sıra, kullanıcının deney seti üzerinden gözlem yapabilmesi için, Şekil 3.20’de görülen ve 0 - 10 bar arası ölçüm yapabilen 2 adet analog basınç sensörü de kullanılmıştır.

Sistemdeki tüm sensörlerden gelen bilgiler, Şekil 3.20’de görüldüğü üzere veri terminallerine girmektedir. Veri terminalleri, PVKS’nin giriş terminalleridir. PVKS, sistemdeki tüm basınç ve sıcaklık sensörlerinden gelen verileri, bünyesindeki data

konvertörleri vasıtasıyla alır. Alınan bu bilgiler, PLC tarafından on-line olarak değerlendirilir. Gerekirse PVKS, basıncı ve sıcaklığı ayarlayacak şekilde sisteme müdahale eder.

3.4.5 Soğutma Sistemi

Soğuk su akümülayon tankının içindeki suyun soğutulması için düzenekteki su sirkülayon sistemine, Şekil 3.36’da görülen soğutma tertibatı montajı yapılmıştır.



Şekil 3.36: Soğutma sisteminin montajı.

Soğutma sistemi; kompresör, kondenser, drayer ve kapiler borudan oluşmaktadır. Montaj sırasında kompresöre R22 gazı dolumu yapılmıştır. R22 gazının kompresörde sıkıştırılarak sıcaklık ve basınç artışı gerçekleşir. R22 gazı kondensere transfer edilir. Ortam sıcaklığı fazla olduğu için, R22 gazı kondenser borusundan geçerken dışarıya ısı atılır. Gazın sıcaklığı düşmesine rağmen basıncı yüksek olduğu için, gaz sıvı hale döner. Kapiler boru ile de kondenserden çıkan sıvı hâldeki akışkanın basıncı düşürülerek, akümülayon tankı içerisindeki serpantine ulaştırılması ile tankın içindeki suyun soğutulması sağlanır. Drayer kısmında ise, sistemin içine su ve asitlerin girmesi engellenir ve katı maddelerin süzülmesi sağlanır.

Soğutucu sistemde kullanılan düşük sıcaklıktaki R22 gazı, basınç değişimiyle sıcaklığı düşürülerek akümülayon tankı içerisinde kılcal borularla gezdirilmektedir. Soğuyan kılcal borular, akümülayon tankı içerisinde ısı transferi yaparak ortamı soğutur. Bu sistemde, kılcal boruların içerisinde kompresöre dolumu yapılan R22 gazı dolaştırılmaktadır.

Akümülayon tankındaki suyu soğutmak için, akümülayon tankının içerisine spin şeklinde sarılan serpantin monte edilmiş, sonrasında serpantin, soğutma sistemi kılcal borusu ile kaynak yapılarak birleştirilmiştir. Bu şekilde kılcal boruda sıvı hale gelen soğutulmuş gaz, akümülayon tankı içerisindeki serpantinden dolaşarak suyun soğutulmasını sağlamaktadır. Her biri 30 cm uzunluğundaki 39 adet spin şeklindeki bakır boru sarılarak serpantin yapısı elde edilmiştir. Soğutma sistemi motor gücü 0,5 HP ve fan motoru gücü 13 W'tır. Kılcal borunun akümülayon tankının metal kapağına montajı için asetilen kaynak yapılmıştır. Ayrıca, soğuk su akümülayon tankındaki suyun sıcaklığını, 20 °C'de sabit tutabilmek için, 2.350 kcal değerinde bir kondenser kullanılmıştır.

3.4.6 Isıtma Sistemi Rezistans Seçimi

Sıcak su akümülayon tankındaki 100 litrelik (100 kg) suyun sıcaklığını, 20 °C'den 100 °C'ye çıkarabilmek için, aşağıdaki hesaplama ile bir ısıtıcı rezistans seçimi yapılmıştır.

$$Q_w = m \times c \times \Delta T \quad (3.24)$$

Eşitlik (3.24)' göre;

$$Q_w = 100 \times 4.186 \times 80 = 33.488.000 \text{ J}$$

olarak elde edilir. 1 kWh elektrik enerjisi, 3,6 MJ'e eşit olduğundan, 100 litre suyun sıcaklığını 1 saatte 80 °C arttırabilmek için gerekli enerji, 9,30 kWh olur. Bu durumda, en az 9,30 kW gücünde bir ısıtıcıya ihtiyaç vardır. Bu nedenle, Şekil 3.20'de görülen 10 kW gücündeki ısıtıcı rezistans seçilmiştir. Sıcaklık artışı ile birlikte, sistemde oluşabilecek ani basınç artışı önlemek için de, yine Şekil 3.20'de görülen 50 litre / 10 bar değerinde bir genleşme tankı kullanılmıştır. Genleşme tankının işletme basınç

değeri 10 bar, ön şarj basınç değeri ise 4 bar olduğundan (Wates 2014), sistemin maksimum basınç değeri (4 bar) geçilmeyecek şekilde ısıtıcı çalışma ayarı yapılmıştır.

3.4.7 Sıcak ve Soğuk Su Hatları

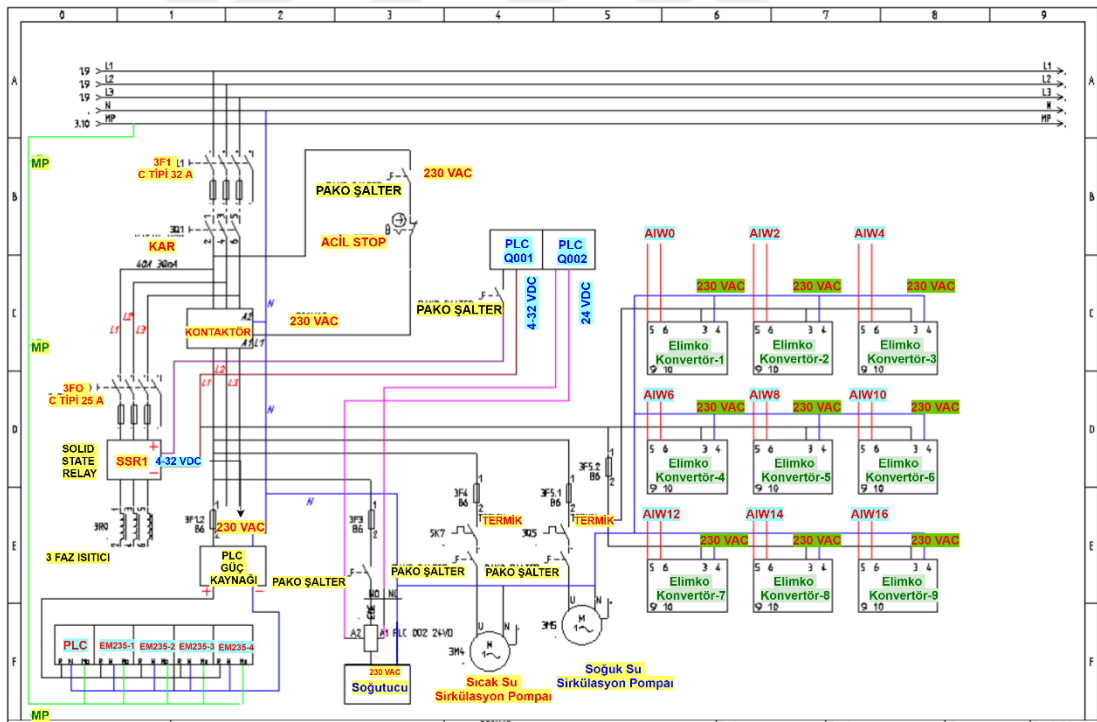
Sıcak/Soğuk Su Sirkülasyon Sistemi'nde sıcak yüzeyden geçen sıcak su hatları kesiti DN25 ve 304 kalite olan paslanmaz çelik malzeme ile oluşturulmuştur. TEG sisteminde sıcak su ve soğuk su hatlarında akış kontrolü için tek yönlü akış sağlayan 304 kalite paslanmaz malzemeden imal edilen, DN 25 ölçüsünde, PN16 basınç sınıfında, 150 °C sıcaklığa kadar çalışabilen tek yönlü vanalar (çekvalf) kullanılmıştır. Sıcak yüzeyden geçen sıcak su hatları kesiti için, DN 25 ve 304 kalite paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Hat girişlerinde 304 kalite paslanmaz malzemeden imal edilen, DN 25 ölçüsünde, PN 16 basınç sınıfında, 150 °C sıcaklığa kadar çalışabilen pislik tutucu kullanılmıştır. Yine akışın kontrol altına alınması için, sıcak su ve soğuk su hatlarına DN 25 ölçüsünde, PN 16 basınç sınıfında, 150 °C sıcaklığa kadar çalışabilen küresel vana bağlantısı yapılmıştır. Akışkan miktarını ölçmek için, sıcak su hattına ve soğuk su hattına akış ölçer (su sayacı) bağlantısı yapılmıştır. Sıcak su ve soğuk su tankına monte edilen pompalarla akışkan çevrimi sağlanmaktadır. Sıcak/Soğuk Su Sirkülasyon Sistemi montaj aşamaları ve sistem ekipmanı Şekil 3.37'de gösterilmiştir.



Şekil 3.37: Sıcak/Soğuk su sirkülasyon sistemi montaj aşamaları.

3.4.8 Elektrik Sisteminin Tesisi

Elektrik şalt sisteminin otomasyon, kumanda, veri izleme bağlantılarının hatasız gerçekleştirilmesi için, TEG sistemi bağlantı şemaları oluşturulmuştur. Bağlantılar, oluşturulan şemalara göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.38’de TEG sistemi kontrol ve kumanda panosu bağlantı şeması verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, TEG sisteminin kontrol ve kumanda panosuna, trifaze besleme hattı tesis edilmiştir. Bu trifaze giriş, KAR üzerinden panoyu beslemektedir. Pano kapağında bulunan acil stop butonu ile tüm panonun enerjisi kesilebilmektedir. Sistem, 25 A’lık MCB ile korunmaktadır. Sistem, acil bir durumda, pano kapağında bulunan pako şalterle veya acil stop butonuyla devreden manuel olarak çıkarılabilmektedir. Sistemde yer alan ve sıcak suyu sağlayan 10 kW’lık ısıtıcı ünite PLC ile kumanda edilmekte, PLC ünitesinin Q0.1 DO (Dijital Output) çıkışındaki 24 V DC enerji ile de tetiklenebilmektedir. Panoda yer alan diğer sistemler, L1 fazından enerjilendirilmiştir.

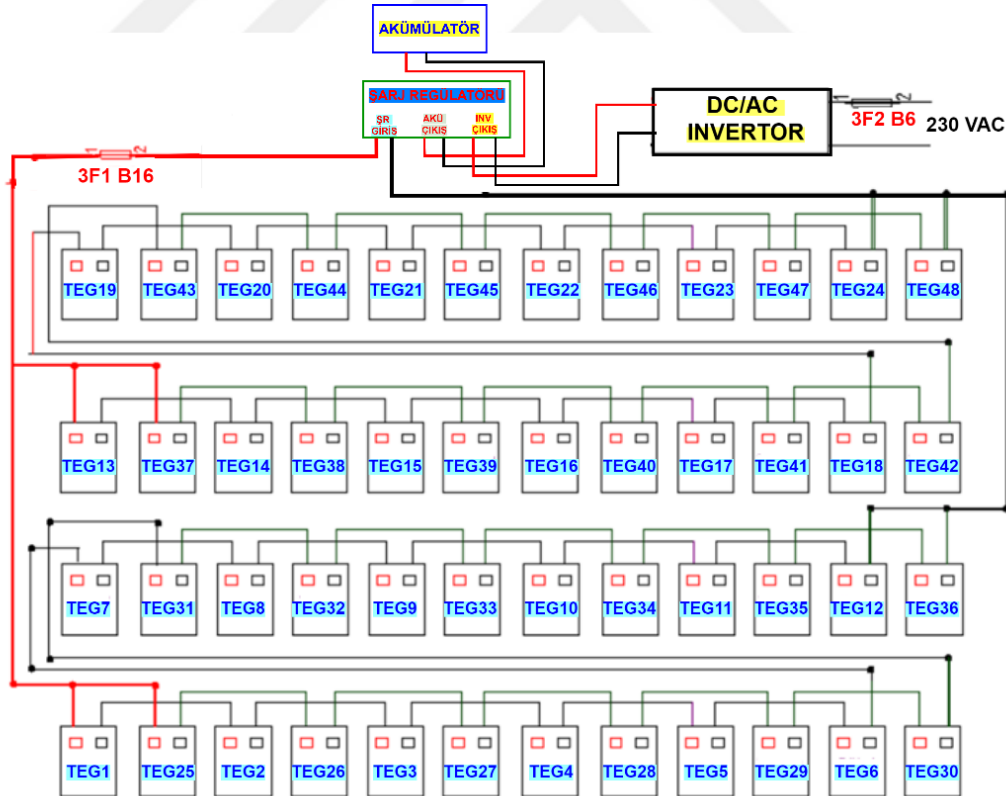


Şekil 3.38: TEG Sistemi kontrol ve kumanda panosu bağlantı şeması.

L1 fazı çıkışında PLC güç kaynağı B 6A MCB ile korunurken, 9 adet Elimko konvertör, grup halinde yine B6 tip bir MCB ile korunmuştur. Sıcak ve soğuk su sirkülasyon pompaları ayrı ayrı pano kapağında bulunan pako şalterlerle kumanda edilmekte ve B 6A tip MCB’ler ile korunmaktadır. Soğutucunun devrede olma

durumu, sıcaklık bilgisine göre PLC'den kumanda edilebileceği için, PLC DO Q0.2 çıkışındaki 24 V DC çıkışla tetiklenen rölenin devreye girmesi ve pano kapağında bulunan pako şalterin kumandasıyla soğutucunun çalışması söz konusudur. Bu yapı da yine, B 6A MCB ile korunmaktadır.

Şekil 3.39'da bağlantı şeması verilen konfigürasyonda, sistemde kullanılan 48 adet TEG, her bir kolda 12 adet TEG'in seri bağlı olduğu toplam 4 adet paralel koldan meydana gelmektedir. Sunulan sistemde, TEG sistemi çıkışının doğrudan invertöre bağlantısının yapılmasıyla birlikte, invertör ve yükler devreye alınırken, TEG sistemi çıkış geriliminde yaşanan ani düşüş nedeniyle, invertör devreden çıkmaktadır. Bu durumu önlemek ve invertör girişinde gerilim stabilitesini sağlamak amacıyla, TEG sisteminin çıkışına, 12 V / 12 Ah değerlikli bir batarya, 10 A değerli bir şarj regülatörü üzerinden entegre edilmiştir (Şekil 3.39). Böylelikle invertör girişinde gerilim stabilitesi sağlanarak, invertörün devreye girme ve yük alma esnasında yaşanan gerilim düşümünün de önüne geçilmiştir.



Şekil 3.39: 12 adet seri, 4 adet paralel kol bağlantısı ile oluşturulan TEG sistemi.

3.4.9 Solid State Relay ile Isıtıcı Kontrolü

Isıtma sisteminin devreye alınması için kullanılacak olan ısıtıcı rezistans, 100 litre kapasiteli akümülayon tankında bulunan 20 °C sıcaklıktaki suyu yaklaşık 1 saat içerisinde 96 °C sıcaklık değerine kadar ısıtıp, sistem devrede iken suyun soğumasını engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu durumun gerçekleştirilebilmesi için, sistemde sıcak su akümülayon tankı içerisinde 3 fazlı, 10 kW gücünde ısıtıcı rezistans kullanılmıştır. Isıtıcı rezistansın her bir fazının yaklaşık 15 A akım çekeceği hesaplanmıştır. Tank içi sıcaklık, ayarlanan sıcaklık değerine ulaştıktan sonra rezistansın devreden çıkması gerekmektedir.

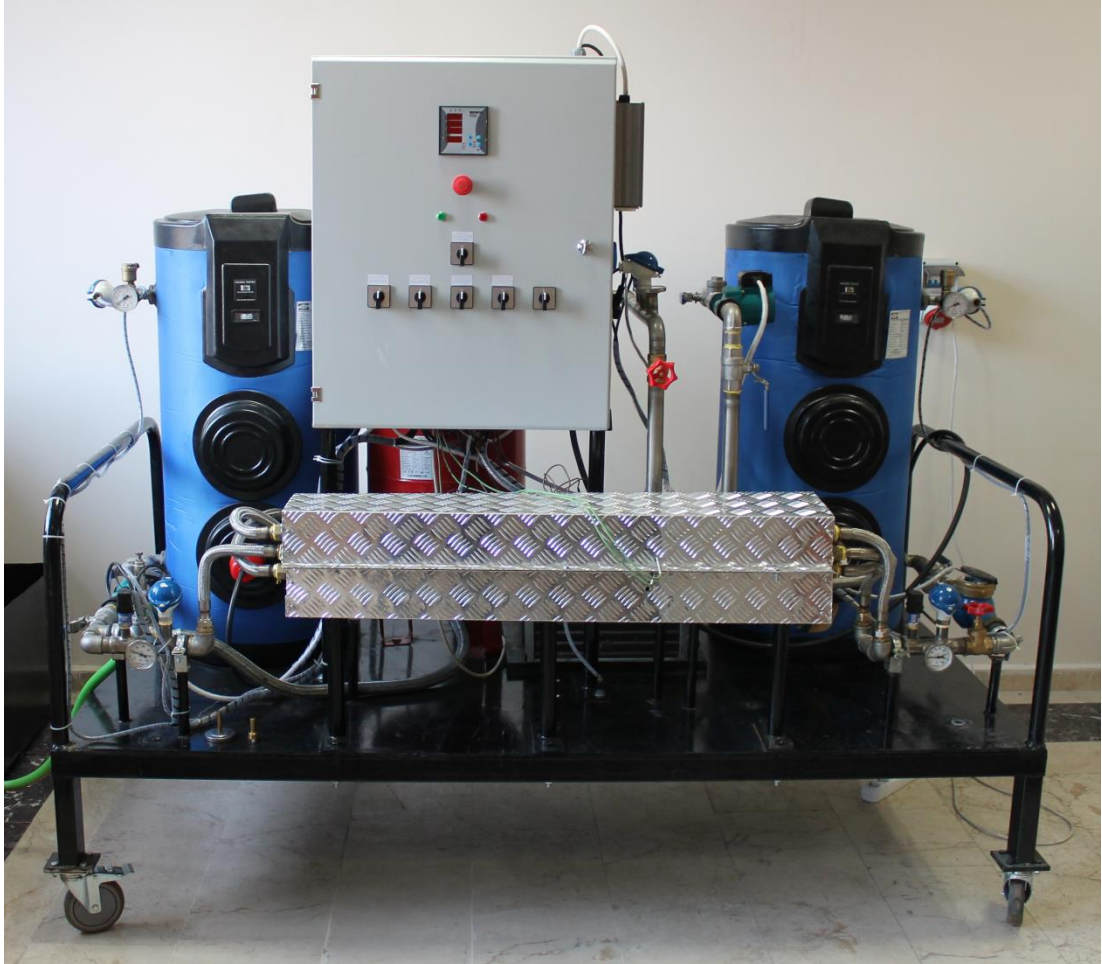
Kontaktör kullanımı durumunda; kontaktör ile yapılan anahtarlama, çekilen akımın yüksek olması, ısıtıcının sık sık devreye girip çıkmak zorunda kalması nedeniyle, kontaktör kontaklarında yapışma ve ark olasılığı artabilir. Bu nedenle, sistemdeki ısıtıcı rezistansı kumanda etmek için, elektronik devreler yoluyla yüksek güçlü devreleri kumanda etmeye yarayan Solid State Relay (SSR) kullanılmasına karar verilmiştir. SSR'ler, tamamen elektronik donanımdan oluşmuş anahtarlama düzenekleridir. SSR'ler, klasik röle ve kontaktörler gibi güç devrelerinin anahtarlamasında kullanılırlar. Özellikle rezistans, ısıtıcı devreleri gibi yüksek anahtarlama gerektiren tetikleme devrelerinde ve birçok otomasyon uygulamasında SSR'ler kullanılmaktadır. Yarı iletken devreden oluşan SSR'ler, uzun ömürlü olmaları ve daha güvenli çalışabilmeleri nedeniyle tercih edilmiştir. Sistemde kullanılan SSR (Şekil 3.40); 3 fazlı, 25 A akıma dayanıklı ve 4-32 V DC tetikleme gerilimi ile çalışmaktadır.



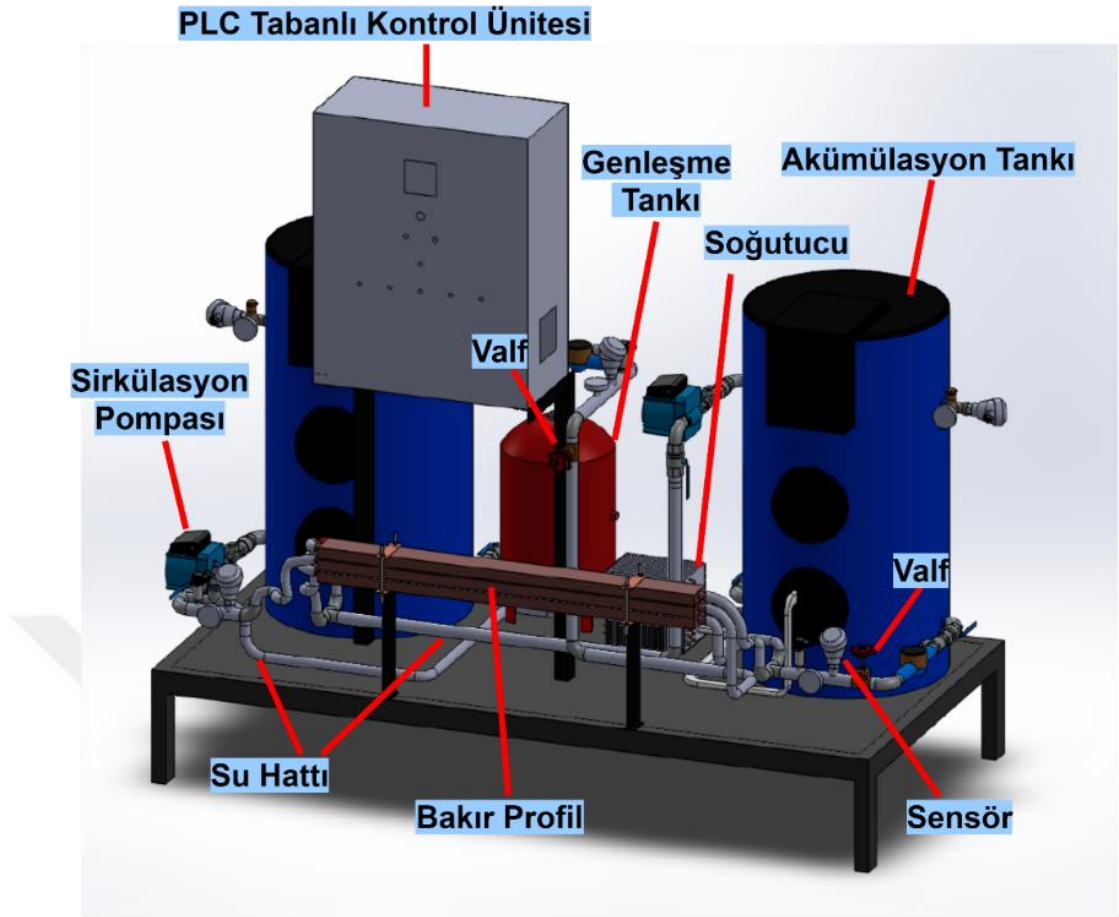
Şekil 3.40: Isıtıcı anahtarlamasında kullanılan SSR.

Şekil 3.38’de görüldüğü gibi SSR, PLC dijital çıkışından gelen 24 V DC enerji ile tetiklenerek çalışmaktadır. Sıcak su tank sıcaklığı belirlenen set değerine ulaştığında, SSR’nin tetikleme çıkış gerilimi PLC tarafından kesilerek SSR kesim durumuna geçirilmektedir. Montaj faaliyetleri sonrası elde edilen nihai deney düzeneği Şekil 3.41’de görülmektedir.

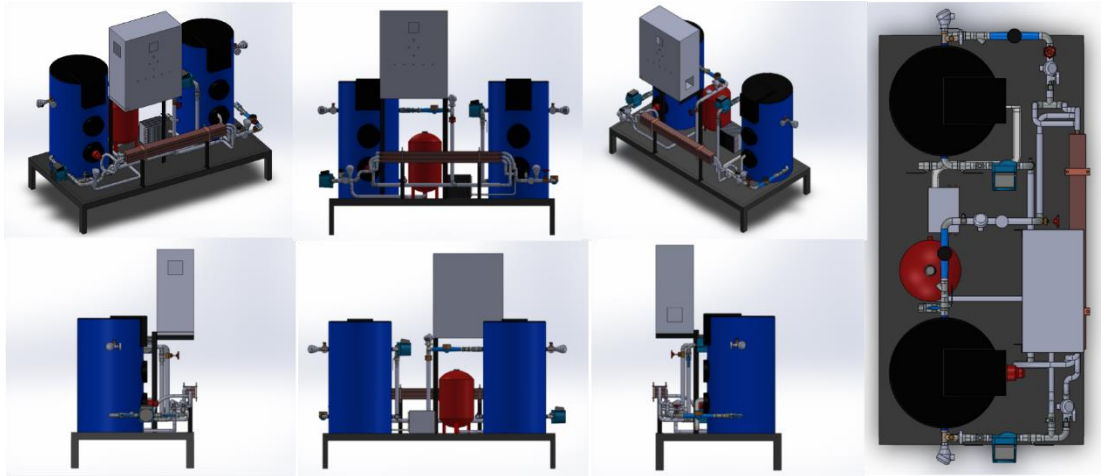
Deney düzeneğinin 3 boyutlu görünümü, Şekil 3.42 ve Şekil 3.43’te sunulmuştur. Üç boyutlu görünümde de görüldüğü üzere, düzenek, toplamda yedi ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar; sirkülasyon pompaları, PLC tabanlı kontrol ünitesi, genişleme tankı, soğutucu, akümülayon tankı, sensör ve bakır profil şeklindedir. Su hatları ana sistem parçalarına birbirine bağlar. Valfler ise, suyun debisinin ayarlamak için kullanılır.



Şekil 3.41: JES-TEG hibrit sistem modeli.



Şekil 3.42: JES-TEG deney düzeneği ana ekipmanı.



Şekil 3.43: JES-TEG deney düzeneği için farklı açılardan 3 boyutlu görünüm.

3.4.10 PLC Tabanlı Veri Toplama ve Kontrol Sistemi

PLC, herhangi bir sistemden elde ettiği dijital verileri işleyip, o sistemi kontrol etmek için yine dijital komutlar gönderen bir cihazdır. PLC kullanarak, her türlü dijital

ve analog veriyi toplamak ve işlemek mümkündür. PLC tabanlı bir kontrol sistemi, dijital verileri doğrudan değerlendirebilir. Sıcaklık ve basınç gibi analog verileri ise, analog – dijital konvertörler üzerinden dönüştürerek değerlendirir. Gerçekleştirilen deney setinde, sistemde ölçülen sıcaklık ve basınç verileri, PVKS tarafından izlenmekte ve elde edilen veriler yine bu birim tarafından kaydedilmektedir. Kaydedilen verilere göre PLC, sistemdeki ısıtıcı ve soğutucu üniteleri kontrol etmektedir. Sistemdeki veri izleme ve kontrol işlemleri şu şekildedir;

- TEG modülü yüzey sıcaklıklarının, termokupllar üzerinden gelen verilere göre PLC yazılımı ara yüzünde kullanıcının bilgisine sunulması.
- TEG modülünün iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının, PLC yazılımı ara yüzünde kullanıcının bilgisine sunulması.
- Deney düzeneğindeki su sıcaklıklarının PT100 sıcaklık sensörlerince okunması. Okunan değerlerin PLC yazılımı kullanıcı ara yüzünde gözlemlenmesi.
- PT100 sıcaklık sensörlerince okunan sıcaklık değerlerine göre; sıcak su sıcaklık değerinin, kullanıcı tarafından girilen üst limit değerini (100 °C) aşması halinde, PLC tarafından ısıtıcı ünitesine devreden çıkma talimatının gönderilmesi.
- PT100 sıcaklık sensörlerince okunan sıcaklık değerlerine göre; sıcak su sıcaklık değerinin, kullanıcı tarafından girilen alt limit değerinin (95 °C) altına düşmesi halinde, PLC tarafından ısıtıcı ünitesine devreye girme talimatının gönderilmesi.
- PT100 sıcaklık sensörlerince okunan sıcaklık değerlerine göre; soğuk su sıcaklık değerinin, kullanıcı tarafından girilen alt limit değerine (2 °C) eşit olması veya bu değer in üzerine çıkması halinde, PLC tarafından soğutucu ünitesine devreye girme komutunun gönderilmesi.
- PT100 sıcaklık sensörlerince okunan sıcaklık değerlerine göre; soğuk su sıcaklık değerinin, kullanıcı tarafından girilen alt limit değerinin (2 °C) altına inmesi halinde, PLC tarafından soğutucu ünitesine devreden çıkma talimatının gönderilmesi.
- Sıcak ve soğuk su hatları üzerindeki basınç sensörlerinden PLC'ye gönderilen verilerin, PLC tarafından değerlendirilmesi, bu verilerden, TEG sistemi tasarım basınç değeri üst limitini (4 bar) aşan bir verinin tespiti halinde, sistem enerjisinin otomatik olarak kesilmesi için, PLC tarafından SSR'ye komut gönderilmesi.

Tüm bu işlemlerin yapılmasını sağlayan PVKS'ye ait detaylar, aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

3.4.10.1 PVKS Genel Yapısı

Deney setindeki PVKS panosu kapak görünümü, Şekil 3.44'te verilmiştir. Kapak üzerinde, toplamda 10 adet elektriksel ekipman bulunmaktadır. Elektriksel ekipmana dair detaylar, Tablo 3.4'te verilmiştir. Pano üzerinde bulunan sinyal lambaları kullanılarak, pano enerji besleme durumu gözlemlenebilmektedir. Sistemdeki elektriksel veriler (gerilim, akım, güç v.b.) dijital multimetre ile ölçülebilmekte, acil bir durumda acil stop butonu kullanılarak sistemin enerjisi kesilebilmektedir. Deney setinin ana enerji hattı, sirkülasyon pompası, ısıtıcı ve soğutucu üniteleri pako şalterler kullanılarak devreye alınabilmektedir.

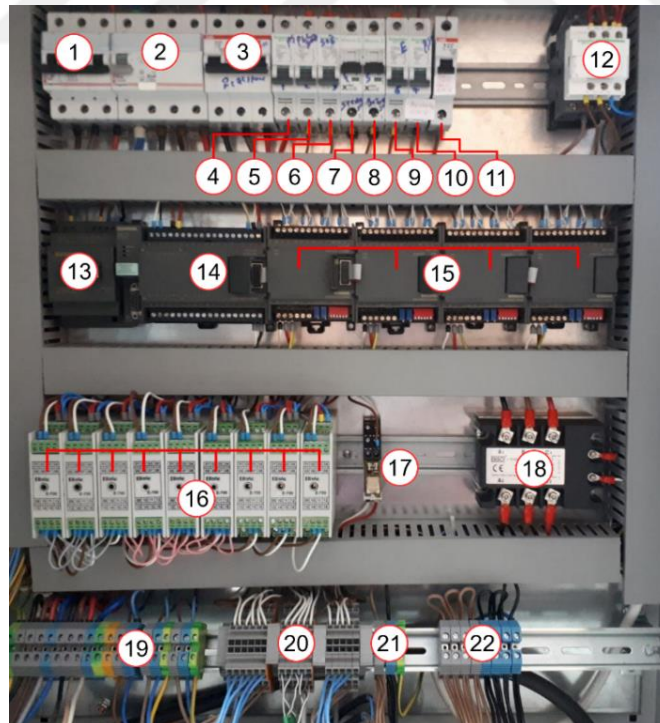


Şekil 3.44: PVKS pano kapağı.

Tablo 3.4: PVKS pano kapağında görülen ekipmana dair detaylar.

Cihaz No	Cihaz Tipi/Modeli	Cihazın Fonksiyonu	Cihaz Sayısı
1	Enerji Analizörü (Entes-V,I, Cos Ø)	Deney setinin AC akım, gerilim değerlerinin takip edilmesini sağlar	1
2	Acil Stop Butonu	Acil durumda enerjiyi kesmek için kullanılır	1
3	Sinyal Lambası (Yeşil)	Panonun enerjilendirildiğini gösterir	1
4	Sinyal Lambası (Kırmızı)	Pano enerjisinin kesildiğini gösterir	1
5	Pako Şalter-1	Pano enerjisinin kesilmesini / panoya enerji verilmesini sağlar	1
6	Pako Şalter-2	Isıtıcının manuel devreye girip çıkmasını sağlar	1
7	Pako Şalter-3	Soğutma sisteminin manuel devreye girip çıkması sağlar	1
8	Pako Şalter-4	Sıcak su sirkülasyon sisteminin manuel devreye girip çıkmasını sağlar	1
9	Pako Şalter-5	Soğuk su sirkülasyon sisteminin devreye manuel girip çıkmasını sağlar	1
10	Pako Şalter-6	PLC üzerinden sıcak ve soğuk su sayaçlarının resetlenmesini sağlar	1

PVKS panosu iç görünümü Şekil 3.45'te, ekipman listesi ise Tablo 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.45: PVKS pano içeriği.

Tablo 3.5: PVKS pano içi ekipmanı.

No	Cihaz Tipi / Modeli	Cihaz Fonksiyonu	Cihaz Adedi
1	Minyatür Devre Kesici (Legrand C-tip, 32 A, 3 Kutup)	Aşırı yük/kısa devre halinde devrenin enerjisinin kesilmesi için	1
2	Kaçak Akım Koruma Rölesi (Legrand 30 mA, 25 A, 4 Kutup)	Enerji kablosundaki faz ve topraklama hattı arasında temas halinde devre enerjisini otomatik olarak kesmek için	1
3	Minyatür Devre Kesici (ABB, C-tip, 25 A, 3 Kutup)	Aşırı yük/kısa devre halinde sıcak su tankında bulunan ısıtıcının enerjisinin kesilmesi için	1
4	Minyatür Devre Kesici (Schneider Electric, B-tip, 6 A, 1 Kutup)	Pano kapağında bulunan pako şalter hattında aşırı yük/kısa devre olması halinde enerjisinin kesilmesi için	1
5	Minyatür Devre Kesici (Schneider Electric, B-tip, 6 A, 1 Kutup)	PLC Güç Kaynağı hattının enerjisinin aşırı yük/kısa devre halinde kesilmesi için	1
6	Minyatür Devre Kesici (Schneider Electric, B-tip, 6 A, 1 Kutup)	Soğutma sisteminin enerjisinin aşırı yük/kısa devre halinde kesilmesi için	1
7	Minyatür Devre Kesici (Moeller, C-tip, 2 A, 1 Kutup)	Sıcak Su Sirkülasyon Pompası'nın enerjisinin aşırı yük/kısa devre halinde kesilmesi için	1
8	Minyatür Devre Kesici (Moeller, C-tip, 2 A, 1 Kutup)	Soğuk Su Sirkülasyon Pompası'nın enerjisinin aşırı yük/kısa devre halinde kesilmesi için.	1
9	Minyatür Devre Kesici (Schneider Electric, B-tip, 6 A, 1 Kutup)	Elimko sıcaklık/gerilim dönüştürücülerinin enerjisinin aşırı yük/kısa devre halinde kesilmesi için	1
10	Minyatür Devre Kesici (Schneider Electric, B-tip, 16 A, 1 Kutup)	TEG sisteminde üretilen enerjinin, invertör girişinde oluşabilecek aşırı yük/kısa devre halinde kesilmesi için	1
11	Minyatür Devre Kesici (ABB, B-tip, 6 A, 1 Kutup)	İnvertör çıkışındaki enerjinin aşırı yük/kısa devre halinde kesilmesi için	1
12	Kontaktör (Schneider Electric, 3 Kutup, 4kW, 9A, 230V AC)	Acil stop butonuna basılması durumunda tüm sistemin enerjisinin kesilmesi için	1
13	LOGO GK, 6EP1331-1SH02, 100-240 V AC, 24 V/1,3 A DC)	PLC, EM 235 analog giriş modülleri ve basınç transmitterlerinin enerjilendirilmesi için	1
14	PLC (Siemens, S7 200, CPU 224 DC/DC/DC, 214-1AD23-0XB0)	JES-TEG sisteminin kumanda, kontrol, devreye alma, veri izleme ve takip işlemlerinin yapılması için	1
15	Analog Giriş Modülü (EM 235-4Analog Input 235-0KD22-0XA0, AI4/AO1 x12bit)	TEG sistemindeki 9 adet sıcaklık analog verisi ile 4 adet basınç analog verisinin ölçülmesi için	4
16	Sıcaklık Gerilim Konvertörü (Elimko E-700, 0-200 °C giriş, 0-10 V DC çıkış)	TEG sistemindeki 9 adet sıcaklık analog verisinin, 0-10 V DC arasındaki gerilim verisine dönüştürülmesi için	9
17	DC Röle (Iddec, 24 V DC, 250 V AC, 8 A)	PLC çıkışındaki 24 V DC enerji ile kumanda edilerek, soğutma sisteminin devreye girmesini sağlar.	1
18	Solid State Relay (Isiso, 3SS-25-1, 25A, 3 – 32 V DC, 24 – 380 V AC)	PLC çıkışındaki 24 V DC enerji ile kumanda edilmek suretiyle rezistansın devreye alınması için	1
19	Klemens Grubu-1 (Wago)	Panoya güç hattı bağlantısı ile yük bağlantısı için	1
20	Klemens Grubu-2 (Wago)	PLC ile ölçülen sıcaklık ve analog verilerin aktarımı için	1
21	Klemens Grubu-3 (Wago)	Basınç transmitterlerinin çalışması için gerekli olan 24 V DC gerilim hat kablosunun bağlantısı için	1
22	Klemens Grubu-4 (Wago)	TEG'ler tarafından üretilen DC enerjinin aktarımı için	1

Sistem ana ekipmanı, PLC ünitesidir. PLC ünitesi; sistemdeki termokupllardan, sıcaklık sensörlerinden ve basınç transmittterlerinden aldığı verileri değerlendirir. Yapılan değerlendirme sonucunda, eğer gerekiyorsa soğutucu ve ısıtıcı ünitelerine yine PLC tarafından komut gönderilerek müdahale edilir. Örneğin, sıcak su hattı üzerindeki basınç sensörlerinden ölçülen basınç bilgisi 4 bar'lık limit değerin üzerindeyse, PLC ısıtıcı ünitesine derhal durdurma komutu gönderir. Bu şekilde, sıcak su hattı iç basıncı, tehlikeli seviyeye ulaşp sisteme zarar vermeden evvel gerekli müdahale yapılmış olunur. Sistemde oluşabilecek tüm tehlike durumları ve bu durumlara karşı PLC'nin yapabileceği müdahaleler, Tablo 3.6'da verilmiştir.

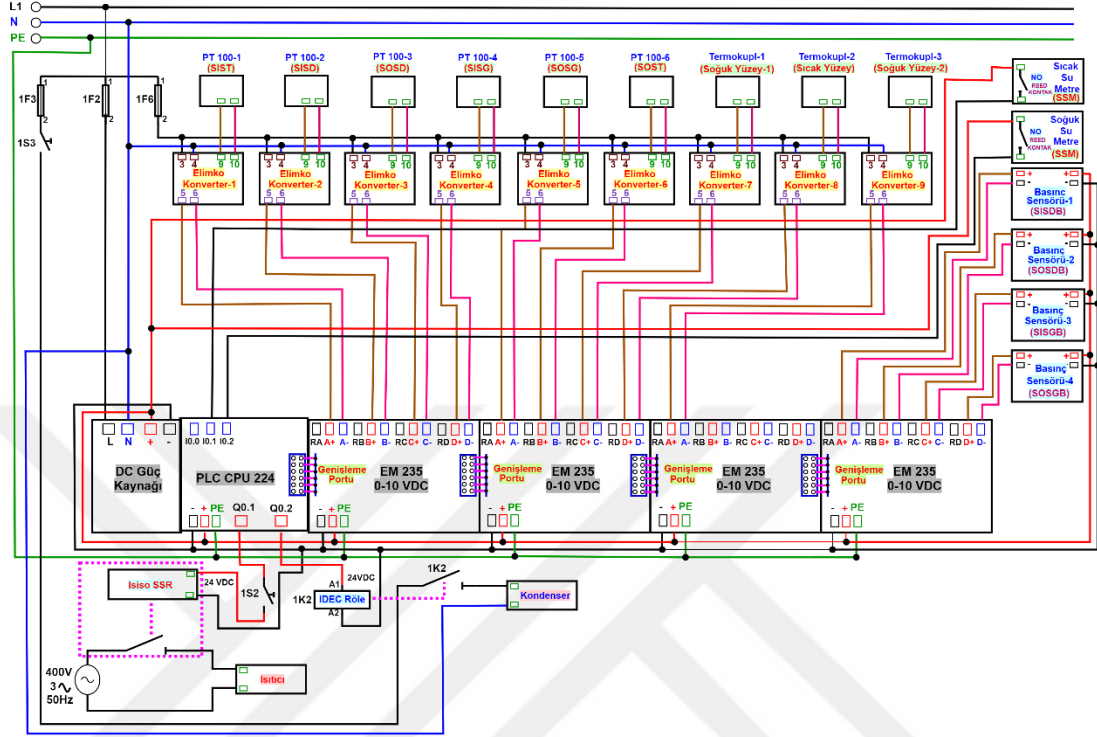
Tablo 3.6: Sistemde dahilinde gelişebilecek olası olaylar ve PLC müdahale komutları.

Senaryo No	Senaryo Detayı	PLC reaksiyonu
1	Soğuk su sıcaklığı limit değere (2 °C) eşitse veya bu değeri aşarsa	Kondenser ünitesini etkinleştirmek için Idec rölesine aktifleşme komutu gönderir
2	Soğuk su sıcaklığı limit değerin (2 °C) altında ise	Kondenser ünitesini devre dışı bırakmak için Idec rölesine açma komutu gönderir
3	Sıcak su hattındaki suyun sıcaklığı limit değerin (95 °C) altında ise	Isıtıcı ünitesini etkinleştirmek için Isiso SSR'ye aktifleşme komutu gönderir
4	Sıcak su hattındaki suyun sıcaklığı limit değeri (100 °C) aşıyor ise	Isıtıcı ünitesini devre dışı bırakmak için Isiso SSR'ye açma komutu gönderir
5	TEG sistemi tasarım basıncı limit değeri (4 bar) aşıyor ise	Isıtıcı ünitesini devre dışı bırakmak için Isiso SSR'ye açma komutu gönderir

PVKS, Şekil 3.46'da görülen şemaya göre monte edilmiştir. Sistemdeki sinyal konvertörleri (Elimko), PT100 sıcaklık sensörlerinden gelen sıcaklık verilerini (0 °C – 200 °C), 0 – 10 V DC sinyale dönüştürerek, Siemens EM 235 analog modüllerine gönderir. EM 235 modülleri, 0 – 10 V DC analog sinyalleri, dijital sinyallere dönüştürerek, kendi genişleme portları üzerinden PLC'ye gönderir. 6 adet PT100 sıcaklık sensörü ve 3 adet termokupldan gelen sıcaklık bilgilerinin PLC'ye aktarılması için, toplamda 9 adet sinyal konvertörü kullanılmıştır. Deney setinde yer alan 4 adet basınç sensörü 0 – 10 V DC analog işaret üretebildiğinden, bunların çıkışları, Şekil 3.46'da görüldüğü üzere, doğrudan EM 235 Analog Giriş Modüllerine irtibatlanmıştır.

Deney setindeki toplam on beş adet 0 – 10 V DC analog sinyal için, her biri dört adet girişe sahip toplamda dört ayrı EM 235 analog giriş modülü kullanılmıştır.

Şekil 3.46’da görülen ısıtıcıyı devreye alan Isiso SSR ile soğutucuyu devreye alan Idec Rölesi, PLC ünitesinin 24 V DC çıkış terminaleri üzerinden kontrol edilir. Şekil 3.46’da görülen sensörlerin elde ettikleri analog veri türleri, Tablo 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.46: PLC’nin analog giriş ve dijital çıkış bağlantı şeması.

Tablo 3.7: Sensörler ve sayaçlardan ölçülen analog veri türleri.

Sensör / Sayaç	Kısaltma	Veri Tipi
PT 100 Sıcaklık Sensörü-1	SIST	Sıcak Su Tank Sıcaklığı
PT 100 Sıcaklık Sensörü-2	SIRD	Sıcak Su Dönüş Sıcaklığı
PT 100 Sıcaklık Sensörü-3	SOSD	Soğuk Su Dönüş Sıcaklığı
PT 100 Sıcaklık Sensörü-4	SISO	Sıcak Su Geliş Sıcaklığı
PT 100 Sıcaklık Sensörü-5	SOSO	Soğuk Su Geliş Sıcaklığı
PT 100 Sıcaklık Sensörü-6	SOST	Soğuk Su Tank Sıcaklığı
Termokupl (No:1)	SOYS-1	TEG Modül Soğuk Yüzey Sıcaklığı
Termokupl (No:2)	SIYS	TEG Modül Sıcak Yüzey Sıcaklığı
Termokupl (No:3)	SOYS-2	TEG Modül Soğuk Yüzey Sıcaklığı
Sıcak Su Sayacı	SISM	Sıcak Su Akış Miktarı
Soğuk Su Sayacı	SOSM	Soğuk Su Akış Miktarı
Basınç Sensörü (No:1)	SISDB	Sıcak Su Dönüş Basıncı
Basınç Sensörü (No:2)	SOSDB	Soğuk Su Dönüş Basıncı
Basınç Sensörü (No:3)	SISGB	Sıcak Su Geliş Basıncı
Basınç Sensörü (No:4)	SOSGB	Soğuk Su Geliş Basıncı

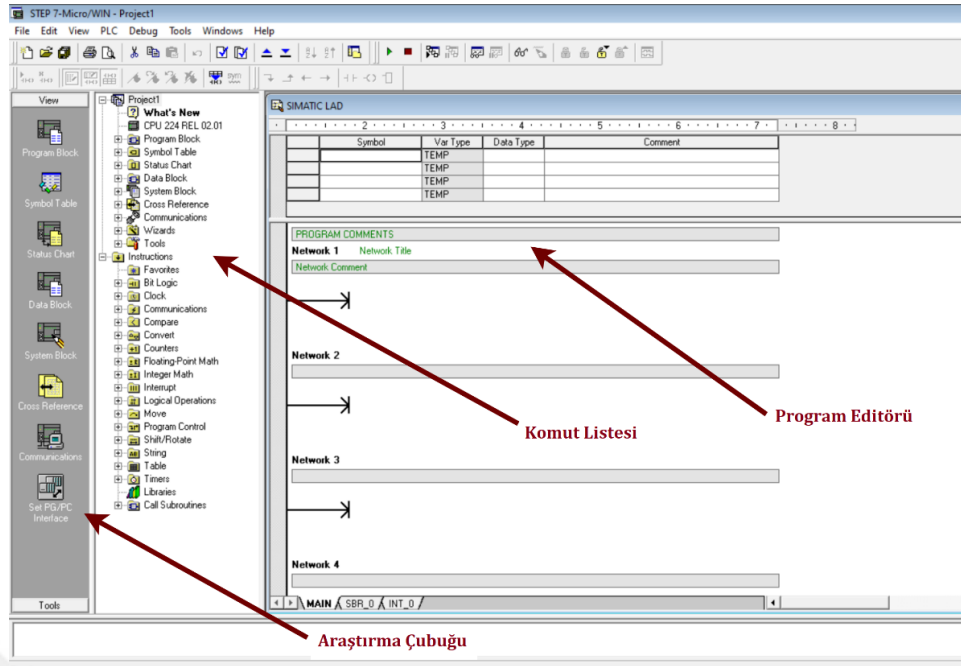
3.4.10.2 PLC Ünitesi ve STEP7 MicroWIN Yazılımı

Deney setindeki veri izleme ve kontrol işlemlerini gerçekleştirebilmek için, Şekil 3.47’de görülen Siemens S7-200 CPU 224 DC/DC/DC 6ES7214-1AD23-0XB0 model PLC kullanılmıştır. Bu PLC ünitesi, Siemens LOGO Power 24 V DC güç kaynağı tarafından beslenir. PLC ünitesi, toplamda 14 adet dijital girişe ve 10 adet dijital çıkışa sahiptir. PLC’nin analog girişleri olmadığından, deney setindeki sıcaklık ve basınç gibi toplam 15 adet analog verinin okunabilmesi için, her biri 4 adet analog girişe sahip olan toplamda 4 adet Siemens EM 235 analog genişleme modülü kullanılmıştır. PLC’nin bilgisayar ile olan bağlantısı, USB/PPI kablosu üzerinden yapılır (Siemens 2020).



Şekil 3.47: Siemens S7-200 CPU 224 6ES7214-1AD23-0XB0 PLC (RS Components -2020).

PLC’nin programlanması için, Şekil 3.48’de ara yüz görüntüsü verilen STEP7 MicroWIN yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım kullanılarak; PLC ile on-line bağlantı kurulması, PC’de yazılan PLC MicroWIN yazılımının PLC’ye aktarımı, deney setindeki on-line veri izleme ve kontrol işlemlerine dair faaliyetleri gerçekleştirmek amacıyla yazılım oluşturulması mümkündür. Yazılımın mantığı, Ladder Diagram (LAD) adı verilen özel bir şematik programlama yöntemine dayanmaktadır.



Şekil 3.48: Step 7 MicroWIN programı arayüzü.

Step7 MicroWIN yazılımı kullanıcı ara yüzü, Şekil 3.48’de görüldüğü üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, değişik özelliklerde programlama ikonlarına sahip Araştırma Çubuğu bölümüdür. Araştırma Çubuğu kullanılarak, Step7 MicroWIN yazılımı içerisindeki değişik programlama fonksiyonlarına (Program Block, Symbol Table, Status Chart, Data Block, System Block, Cross Reference, Communications ve Set PG/PC Interface) erişilebilir. Kullanıcı ara yüzünde görülen ikinci bölüm, Komut Listesi bölümüdür. Komut Listesi bölümünde, kullanıcının istediği yazılımı gerçekleştirebilmesi için gerekli olan proje objeleri (Program Bloğu, Durum Çubuğu, Data Bloğu, vs.) ve LAD komutları (Bit Logic, Clock, Move, vs.) yer alır. Kullanıcı ara yüzünde yer alan üçüncü bölüm ise, Program Editör bölümüdür. Program Editör bölümünde, program lojik ve yerel değişkenler tablosu yer alır. Yerel değişkenler tablosu kullanılarak, geçici yerel değişkenler için sembolik isimler tanımlanabilir. Program Editor bölümünde, subroutines ve interrupt routines, sekmeler şeklinde (en alt bölümünde) konumlanmıştır (Siemens 2007).

Çalışma kapsamında oluşturulan yazılım sayesinde; PLC ile on-line bağlantı kurulması, PC’de yazılan Step7 MicroWIN yazılımının PLC’ye aktarımı, aktarılan yazılımın çalıştırılması, çalışan programın on-line takibi, analog verilerin trend şeklinde izlenmesi ve tanımlı analog verilerin istenilen periyotlarda kaydedilerek PC’ye MS Excel dosyası halinde aktarımı mümkün olmaktadır.

3.4.10.3 PLC Programlama Prosedürü

S7-200 PLC ile ölçümün doğru yapılabilmesi için, EM 235 analog giriş modülünün giriş aralığının ayarlanması gereklidir. Bunun için Tablo 3.8'deki gibi dip switch ayarları yapılmalıdır (Siemens 2007). Mevcut EM 235 analog giriş modülü üzerinde bulunan 6 adet dip switch, giriş tipine göre on-off pozisyonuna getirilerek ayarlanır. TEG Sistemi'nde kullanılan giriş tipleri 0 - 10 V DC aralığında olduğu için, EM 235 dip switch bağlantıları, Tablo 3.8'den tam ölçekli veri aralığı 0 – 10 V DC olan satıra göre ayarlanmıştır.

Tablo 3.8: EM 235 için tek yönlü tam skala giriş çözünürlük tablosu (S7200 Otomasyon 2009).

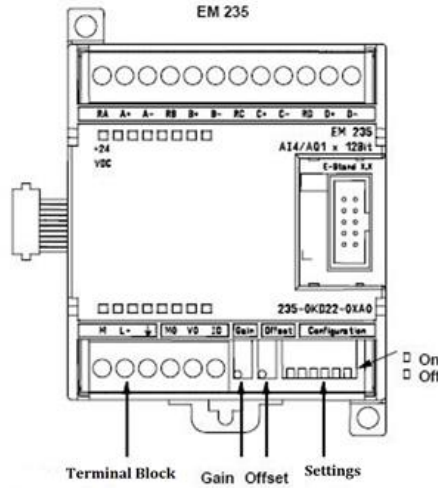
Dip Switch 1	Dip Switch 2	Dip Switch 3	Dip Switch 4	Dip Switch 5	Dip Switch 6	Tam Ölçekli Veri Aralığı
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	0 - 50 mV
OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	0 - 100 mV
ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	0 - 500mV
OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	0 - 1 V
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0 – 20 mA
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0 – 10 V

Elimko konvertörlerin, 0 - 200 °C giriş ve 0 - 10 V DC tanımlı olması demek, konvertörlerin 0 °C için 0 V DC, 200 °C için ise 10 V DC çıkış vermesi demektir. Bu durumda, ara sıcaklık değerlerinde konvertörün vermesi gereken çıkış değeri, orantısal sonuçla elde edilen veri olmalıdır. Sistemdeki EM 235 modülleri, 0 - 10 V DC giriş için ayarlanmıştır. Elimko konvertörden gelen 0 - 10 V DC aralığındaki DC gerilim, EM 235 modülünün 4 adet girişinden birisine girilir.

Konvertörden gelen DC gerilim bilgisi için, MicroWIN programı ile izleme yapılırken, konvertöre sensörden gelen sıcaklık verisi ile orantılı olarak, yazılım ekranında 0 - 32000 arasında bir değer görülür. Ölçülen değerlerin salınım yapmaması için, analog giriş modülündeki analog girişlerin negatif işaretleri köprülenmelidir. TEG sisteminde izleme yapılırken bu sorun yaşanmış ve negatif girişler köprülenerek salınım sorunu giderilmiştir.

Sistemdeki analog ölçüm değerlerine göre orantısal işlemler yapılarak verilerin PLC ile ölçülmesi sağlanmıştır. PLC ile ölçülen verilerin termometre ve manometre ile ölçülen verilerle karşılaştırılması yapılmıştır. 0 - 32000 arasında olması gereken

değerin doğrulanması için, Şekil 3.49’da görüldüğü üzere, EM 235 modülündeki Offset ve Gain ayarları kullanılarak gerekli ayarlamalar yapılır. Sistemde analog bilgilerin ölçülmesi noktasında; ilk başta 0 V DC giriş için PLC’de “0” analog değeri, 10 V DC giriş için PLC’de “32000” analog değeri görülmelidir.



Şekil 3.49: EM 235 dip switch, gain ve offset ayar noktaları (S7200 Otomasyon 2009).

Bu belirtilen analog değerlerin doğru bir şekilde ölçülmesi için öncelikle EM 235 analog giriş modülünün giriş kalibrasyonu, harici DC gerilim kaynağı kullanılarak yapılır. Sistemde kullanılan Elimko konvertörlerin tamamı sıcaklık bilgisini direnç değeri olarak değerlendirerek, giriş sıcaklık değeri ile orantılı olarak 0 - 10 V DC aralıkta çıkış verecek şekilde programlanmıştır. Elimko konvertörlerin çıkış değeri olan 0 V DC ve 10 V DC değerleri güç kaynağı ile ayarlanır. EM 235 analog modüllerinin minimum ve maksimum değerler için de ayarlama yapılmalıdır.

Siemens STEP7 MicroWIN yazılımı kullanılarak, deney setindeki tüm veri izleme, veri toplama ve kontrol fonksiyonları yerine getirilebilmektedir. PLC ünitesinde veri işleme ve depolama; 8 bitlik (Byte: VB), 16 bitlik (Word: VW) ve 32 bitlik (Double Word: VD) veri paketleri şeklinde olmaktadır. Sahadaki analog veriler, EM 235 analog modülü kullanılarak analog giriş eklenen PLC ünitesinin, AIW0 ile başlayan girişlerinden okunur. PLC tarafından okunan analog veriler, matematiksel işlemlere tabi tutulur ve veri kapasitesi byte olarak artırılır. Bu şekilde yapılan artırım ile, 32 bitlik double word şeklinde veri elde edilir. Double word şeklindeki veri, ondalıklı işlemlerin yapılabilmesi için reel sayıya dönüştürülür. İşlemin tamamlanmasından sonra reel sayıya dönüştürülen veri; on-line izleme, veri toplama

ve kayıt işlemleri için 16 bitlik word formatına dönüştürülür. Analog girişlerden temin edilen ve son hali word uzunluğunda olan bilgiye erişmek için, analog giriş adresleri kullanılır. Analog girişler AIW0, AIW2, AIW4, AIW6 şeklinde adreslenir. Bu adreslerdeki bilgiye sadece word uzunluğunda işlem yapan komutlar ile erişilebilir. STEP7 MicroWIN programı çalıştırıldığında, Şekil 3.48’de görülen ekran elde edilir. Yazılımın “Komut Listesi” bölümündeki “Sembol Tablosu” açılarak analog girişler, belirlenen adreslere Şekil 3.50’de görüldüğü gibi tanımlanır. Her analog giriş, bir kısaltma ile (örneğin sıcak su tank sıcaklığı için AIW0: SIST_SIC) tanımlanır. Ölçümü gerçekleştirilen gerçek değerler sürekli izleme ve kayıt için; VW0, VW2, VW4 gibi adreslere Move taşıma komutuyla aktarılır. Sembol tablosundaki bu tanımlamalar, tablonun Comment sütununda açık olarak ifade edilir.

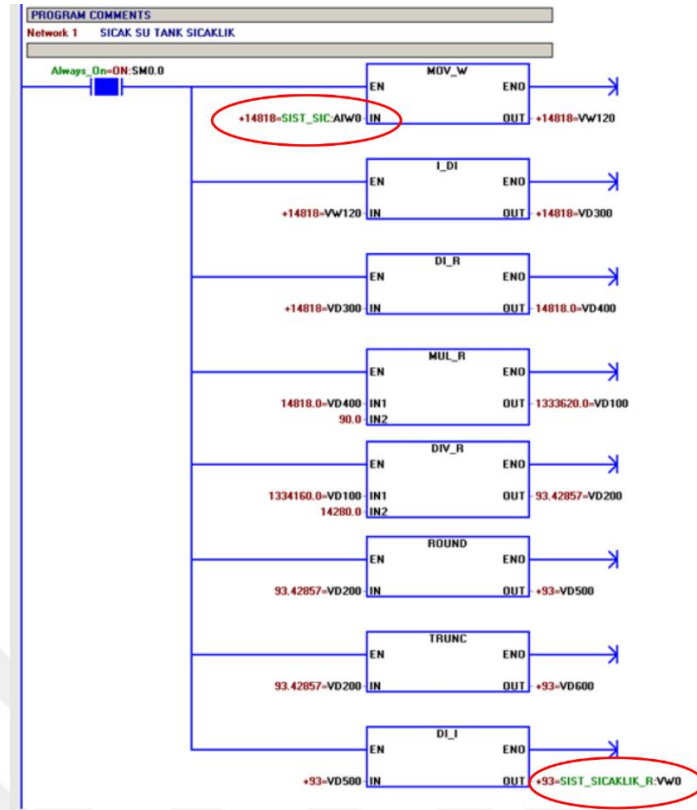
Symbol	Address	Comment
SIST_SIC	AIW0	SICAK SU TANK SICAKLIK ANIN
SISD_SIC	AIW2	SICAK SU DONUS SICAKLIK
SOSD_SIC	AIW4	SOGUK SU DONUS SICAKLIK
SIGS_SIC	AIW6	SICAK SU GELIS SICAKLIK
SOGS_SIC	AIW8	SOGUK SU GELIS SICAKLIK
SOST_SIC	AIW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK
SOYUZ_UST_SIC	AIW12	SOGUK YUZEY UST SICAKLIK
SIYUZ_SIC	AIW14	SICAK YUZEY SICAKLIK
SOYUZ_ALT_SIC	AIW16	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK
SICAK_SU_AKIS	AIW18	SICAK SU AKIS MIKTARI
SOGUK_SU_AKIS	AIW20	SOGUK SU AKIS MIKTARI
SISD_BAS	AIW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC
SOSD_BAS	AIW26	SOGUK SU DONUS HAT BASINC
SIGS_BAS	AIW28	SICAK SU GELIS HAT BASINC
SOGS_BAS	AIW30	SOGUK SU GELIS HAT BASINC
	AIW32	
	AIW34	
SIST_SICAKLIK_R	VW0	SICAK SU TANK SICAKLIK R
SISD_SICAKLIK_R	VW2	SICAK SU DONUS SICAKLIK R
SOSD_SICAKLIK_R	VW4	SOGUK SU DONUS SICAKLIK R
SIGS_SICAKLIK_R	VW6	SICAK SU GELIS SICAKLIK R
SOGS_SICAKLIK_R	VW8	SOGUK SU GELIS SICAKLIK R
SOST_SICAKLIK_R	VW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK R
SOYUZ_UST_SICAKLIK_R	VW12	SOGUK YUZEY UST SICAKLIK R
SIYUZ_SICAKLIK_R	VW14	SICAK YUZEY SICAKLIK R
SOYUZ_ALT_SICAKLIK_R	VW16	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK R
SICAKIS_LT_R	VW18	SICAK SU AKIS MIKTARI R
SOGAKIS_LT_R	VW20	SOGUK SU AKIS MIKTARI R
SISD_BASINC_R	VW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC R
SOSD_BASINC_R	VW26	SOGUK SU DONUS HAT BASINC R
SIGS_BASINC_R	VW28	SICAK SU GELIS HAT BASINC R
SOGS_BASINC_R	VW30	SOGUK SU GELIS HAT BASINC R
	VW32	

Şekil 3.50: Step7 MicroWIN sembol tablosu görünümü.

3.4.10.4 Sıcak Su Tank Sıcaklığı Değerinin PLC ile Ölçülmesi

TEG sisteminde 9 adet sıcaklık bilgisi ile 4 adet basınç bilgisi, MicroWIN programı ile anlık olarak benzer şekillerde izlenip kaydedilebilmektedir. Bu bölümde, bir uygulama örneği olarak, STEP7 MicroWIN yazılımı kullanılarak, deney seti

üzerinde “Sıcak Su Tank Sıcaklığı” değerinin ölçümü için, ilgili STEP7 MicroWIN yazılımının oluşturulma prosedürü anlatılmıştır (Şekil 3.51). Öncelikle, STEP7 MicroWIN yazılımı Komut Listesi’ndeki Bit Logic sekmesinden, Normalde Açık Kontak (Always_ON) seçilir. Seçilen kontak, program editörünün bulunduğu Network bölümüne taşınır. Bu kontak, yazılımda daima ON konumundadır ve SM0.0 olarak isimlendirilir. Ölçülecek analog girişe ait tüm ara bağlantılar, bu kontağın arkasından gerçekleştirilir. Üzerinde çalışılmakta olan Network’e, Şekil 3.51’de görüldüğü gibi ölçülmek istenen veri ile uyumlu olarak, “Sıcak Su Tank Sıcaklık” adı verilmiştir. Görüldüğü üzere, SM0.0 kontağının ardından, yine Komut Listesi’ndeki Move alt sekmesinde bulunan “MOV_W” komutu da Program Editörü’ne taşınmıştır. Bu komut, Program Editörü’ne taşındıktan sonra, komutun IN ve OUT kısımlarının adlandırılması gerekir. Komutun IN kısmına AIW0 adresi atanır. Bu atama sonrası, Şekil 3.50’deki tanımlamaya göre, AIW0’ın yerini, Şekil 3.51’de görüldüğü gibi Sıcak Su Tank Sıcaklığı tanımlama sembolü olan SIST_SIC alır. MOV_W komutunun çıkışı, diğer komutlarda kullanılmak üzere, VW120 şeklinde adreslenmiştir. Integer/Double Integer dönüşümü yapmak için, Komut Listesi’nde yer alan Convert alt dizinindeki I_DI komutu, Program Editor’da yer alan SM0.0 kontağından (Always_On) sonra gelecek şekilde yerleştirilir (Şekil 3.51). I_DI komutunun girişinde VW120, çıkışında ise, sonraki işlemlerde kullanılmak üzere belirlenmiş VD300 değeri tanımlanmıştır. Convert alt dizinindeki DI_R komutu, SM0.0 kontağından (Always_On) sonra gelecek şekilde, Double Integer/Reel Sayı dönüşümünün yapılabilmesi için, Program Editor bölümüne yerleştirilir. Bu komutun girişi, bir önceki komutun (I_DI) çıkışı olan VD300, çıkışı ise VD400 olarak tanımlanır. PT 100-1’den konvertere gelen Sıcak Su Tank Sıcaklık verisinin STEP7 MicroWIN yazılımındaki karşılığının tanımlanması için, bir referans değer belirlenmesi gerekmektedir. Tank sıcaklığının analog termometreden 90 °C olarak gözlemlendiği anda, Program Editörü’nde AIW0 (SIST_SIC) değeri 14280,0 olarak okunmuştur. Bu iki değer, sıcaklık ölçümü için referans alınmıştır. .



Şekil 3.51: Sıcak su tank sıcaklık değerinin görüntülenmesi.

STEP7 MicroWIN Komut Listesi'ndeki Floating Point Math alt dizininde bulunan MUL_R komutu, program editörüne, SM0.0 kontağından sonra gelecek şekilde yerleştirilir. MUL_R komutu, reel sayı çarpımı yapabilmek için kullanılır. MUL_R komutunun iki çarpan girişinden bir tanesi önceki satırda bulunan DI_R konvertörünün çıkış adresi olan VD400, diğeri ise referans değeri olarak belirlenen 90 sayısıdır. MUL_R komutunun çıkışına, sonraki satırda kullanılmak üzere VD100 değeri atanır. Komut Listesi'ndeki Floating Point Math alt dizininde bulunan DIV_R komutu, reel sayı bölme işlemi yapabilmek için, Program Editörü'ne SM0.0 kontağından sonra gelecek eklenir. DIV_R komutunun iki girişinden bir tanesi, önceki satırda bulunan MUL_R işleminin çıkış adresi olan VD100, diğeri ise, referans değeri olarak belirlenen 14280.0 sayısından oluşur. DIV_R komutunun çıkışına, sonraki satırda kullanılmak üzere VD200 değeri atanır. Convert alt dizininde bulunan ROUND komutu, Program Editörü'ne SM0.0 kontağından sonra gelecek şekilde eklenir. ROUND komutu, IN girişindeki bir reel sayıyı double integer değerine dönüştürür, elde ettiği sonucu da OUT tarafından belirtilen değişkene gönderir (Siemens 2007). Sayının ondalık kısmı 0,5'e eşit veya daha büyükse, sayı ROUND komutu tarafından yukarıya yuvarlanır. Bu uygulamada, DIV_R çıkışındaki VD200 değeri ROUND

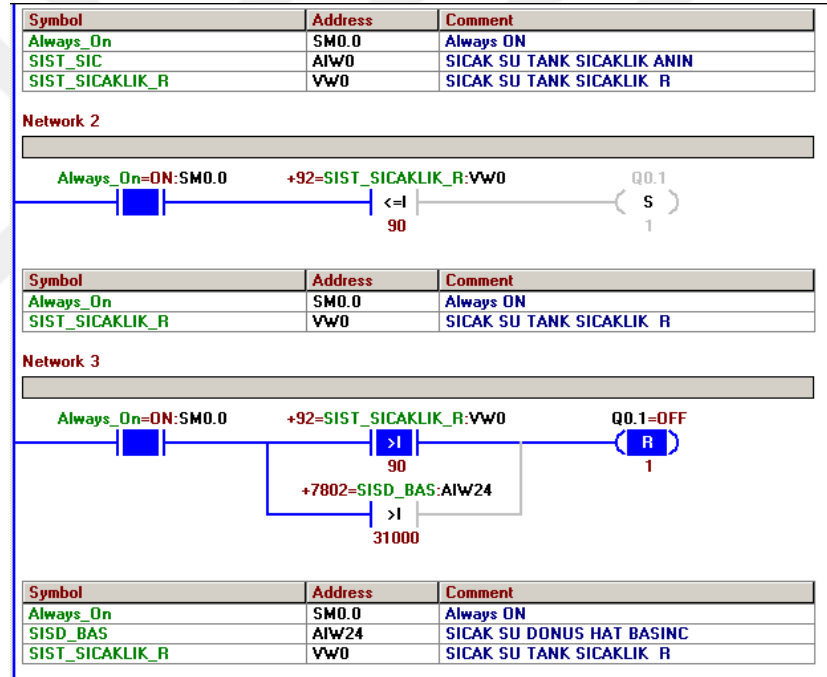
komutu girişine, VD500 ise çıkışına atanmıştır. Truncate (TRUNC) komutu, IN'deki bir reel sayıyı double integer değerine dönüştürerek sonucu, OUT tarafından belirtilen değişkene atar (Siemens 2007). Bu işlem sonucunda, reel sayının tam sayı kısmı aynen bırakılır, ondalık kısmı ise atılır. Şekil 3.51'de görüldüğü üzere TRUNC komutu, SM0.0 kontağından sonra gelecek şekilde Program Editörü'ne yerleştirilmiştir. Bu sistemde TRUNC komutu giriş adresi, ROUND komutunda olduğu gibi VD200 değeridir. Komut çıkış adresi ise VD600 olarak tanımlanmıştır. Bu komut, verinin anlık izlenmesi için kullanılmıştır. DI_I komutu, Double Integer / Integer dönüşümünü gerçekleştirmek için, Şekil 3.51'de görüldüğü üzere Program Editörü'ne yerleştirilir. Bu komutun girişi, Round komutu'nun çıkışından elde edilir. Böylelikle, tam sayı şeklinde ölçümü yapılan sıcaklık değeri, DI_I komutuyla VW0 adresine taşınır. Bu şekilde, AIW0'a adreslenen Sıcak Su Tank Sıcaklık (SIST) analog bilgisi, PLC tarafından SIST_SIC_R sıcaklık bilgisi olarak VW0 adresinde anlık olarak görüntülenebilir hale gelir.

Yukarıda açıklanan sıcaklık ölçüm prosedürü, STEP7 MicroWIN programlama mantığı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Burada, PLC'deki hafıza birimleri arasında gerekli dönüşümler yapılmak suretiyle matematiksel işlemler gerçekleştirilmiştir. Analog giriş, MOVE komutu kullanılarak word adresine taşınır, integerden double integere (I_DI), sonrasında double integerden de reel sayıya (DI_R) dönüştürülmüştür. Doğrudan reel sayıya dönüşüm imkânı olmadığı için bu işlem, birkaç aşamada gerçekleştirilmiştir. Reel sayıya dönüştürülen analog veri, basit orantı mantığıyla matematiksel işlemlere tabi tutulmuş ve sıcaklık bilgisi elde edilmiştir. Sıcaklık verisi ROUND komutu kullanılarak en yakın onluk değere yuvarlanmış, TRUNC komutu kullanılarak da ölçümü yapılan değer ondalık kısmı atılarak tam sayı elde edilmiştir. Oluşturulan yazılım çalıştırıldıktan sonra AIW0 girişine bağlı SIST anlık değeri (+93 °C), PLC izleme ekranında on-line olarak gözlemlenebilir hale gelmiştir (Şekil 3.51).

3.4.10.5 PLC ile Isıtıcı ve Soğutucu Kontrolü

Sıcak su tankı içerisinde yer alan ısıtıcının devreye gireceği ve devreden çıkacağı sıcaklık set değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için, Şekil 3.52'de görülen ladder diagram oluşturulmuştur. Şekil 3.51'de PLC ile ölçümü yapılan VW0

değerinin, set değeriyle (örneğin 90 °C) karşılaştırılması için, COMPARE komutu kullanılmıştır (Şekil 3.52). SIST değeri set değerinden düşük olduğunda, PLC ünitesinin Q0.1 çıkışı, ısıtıcıyı devreye alan rölenin (Isiso SSR) tetiklenmesi için aktif hale gelir. SIST değeri set değerinden yüksek olduğunda, PLC ünitesinin Q0.1 çıkışı, ısıtıcının devreden çıkarılması maksadıyla, rölenin tetiklenmesi ve açma yapması için reset moduna geçer (Şekil 3.52). Sistemde sıcaklık harici basınç koruması yapılması amacıyla, hava atıcının bulunduğu hat için Sıcak Su Dönüş Basıncı (SISDB) set değeri belirlenir. Bu belirlenen set değeri ile PLC'nin AIW24 SISDB analog giriş değeri Compare komutu ile karşılaştırılır. AIW24 analog giriş değeri sistemin 4.000 mbar değerine karşılık gelen 32000 değeri kritik basınç set değeridir. MicroWIN yazılımında kritik set değerine ulaşmadan 31000 değerinin üzerine çıkması halinde PLC ünitesinin Q0.1 çıkışı reset moduna geçer (Şekil 3.52).



Şekil 3.52: Isıtıcı kontrolü için MicroWIN ladder diyagramı.

Aynı şekilde, soğuk su tank sıcaklık değerinin, Compare komutu kullanılarak kullanıcı tarafından girilen alt limit değerinin (2 °C) altına inmesi durumunda, PLC tarafından soğutucu ünitesine devreden çıkma talimatı gönderilerek soğutucu kontrol kontrol edilir.

3.4.10.6 Sıcak ve Soğuk Su Hatlarının Debisinin Ölçülmesi

Akış hızlarının TEG sistemi enerji üretimine etkisini görebilmek amacıyla, sıcak ve soğuk su hatlarının debilerinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Akış verilerinin ölçümü ve takibi, PVKS tarafından gerçekleştirilmektedir.

Sıcak su sayacı 10 litre su akışında 1 pulse verirken, soğuk su sayacı 1 litre su akışında 1 pulse vermektedir. Bu pulse çıkışları, sayaçların reed kontak çıkışından gerçekleştirilmektedir. Sıcak ve soğuk su sayaçları, Şekil 3.53'te gösterilmiştir.



Şekil 3.53: Sıcak su (solda) ve soğuk su (sağda) sayaçları.

Her iki sayacın kataloglarında belirtilen pulse çıkışlarını verdiği ölçü aleti ile doğrulandıktan sonra, PLC sistemi ile ölçüme geçilmiştir. PLC sistemi ile ölçüm yapılabilmesi için, güç kaynağından elde edilen 24 V DC gerilimin, sayaçların normalde açık reed kontaklarının üzerinden dolaştırılarak PLC'deki ayrı dijital girişlere bağlantısı yapılmıştır (bkz. Şekil 3.46). Sayaç reed kontakları normalde açık kontak olup, sayaç pulse verdiği anda kontak kapalı hale gelmekte ve enerjinin PLC'ye geçişine izin vermektedir. Bu durumda, her pulse sırasında, PLC dijital girişine bir pulse iletimi olmaktadır. Şekil 3.54'te, sıcak su akış miktarının litre/s olarak ölçülmesi için yazılan program adımları, sıralı bir şekilde gösterilmiştir. Yaklaşık on iki Network yer kaplayan program yürütülürken ekran görüntüsü alınmaya çalışılmıştır. Ayrı ayrı ekran görüntüsü alınırken geçen sürede veri değişimleri olmuştur. Bu nedenle, şekiller arasındaki verilerde analog girişteki değişimlerden dolayı küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bu şekilde PLC Dijital Giriş (DI) girişine gelen Pulse'ler sayıcı girişinde kullanılarak, akış miktarı litre/s olarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerde sayacın kaç saniyede pulse verdiği verisinden hareketle, sıcak su debisi litre/s olarak

hesaplanmıştır. Hesaplanan debinin, PLC programı ile yapılan debi hesabı ile aynı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.54: Sıcak su akış ölçüm prosesi MicroWIN arayüzü.

PLC’de sayaçtan gelen pulse’ler, her pulse için sayıcı değeri 1 artacak şekilde program girişi olup, zamanlayıcı girişi ilk gelen pulse’ten sonra saymaya başlayacak şekilde aktif edilmiştir. Zamanlayıcı değeri sayıcı değerine bölünerek sıcak su sayacından geçen su miktarı Şekil 3.54’te görüldüğü gibi 250 mililitre/s olarak elde edilmiştir. Sayıcının ilk pulse’i vermesi için 10 litre su akışına gerek duyulmaktadır. Burada sayıcı ve zamanlayıcının aynı anda saymaya başlaması ile ilk ölçümün hatalı olmasını engellemek için, sayıcının değeri 1 düşürülerek doğru ölçüm yapılması amaçlanmıştır.

Zamanlayıcı S7-200 PLC’de maksimum 32767 değerine kadar sayabilir. Bu değerden sonra tekrar baştan saymaya başlar. Bu sorunun çözümü için, karşılaştırma

komutu ile sayıcı ve zamanlayıcının resetlenmesi sağlanmıştır. Bu resetleme işlemini manuel yapmak için pano kapağındaki 10 no'lu pako şalter kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.44). Güç kaynağından elde edilen 24 V DC gerilim pako şalter kontağından dolaştırılarak PLC I0.4 girişine bağlanmıştır. Pako şalter on/off yapılarak sayıcı ve zamanlayıcı resetlenebilmektedir.

Ölçümü yapılan akış miktarı verisinin matematiksel işlem yapılarak dato write ile kaydedilebilmesi için, integer sayılar ilk önce reel sayıya çevrilerek matematiksel işlemler yapılmış, Round komutu ile tam sayıya çevrildikten sonra tekrar integer formuna dönüştürülmüştür. Debi bilgisi tanımlanan adresten on-line olarak izlenebilmekte ve dato write uygulaması ile kayıt altına alınabilmektedir. Litre/s olarak ölçülen sıcak su ve soğuk su debi verisi, dato write uygulaması ile bilgisayara aktarılmadan önce mililitre/s birimine çevrilerek ölçüm hassasiyeti artırılmıştır.

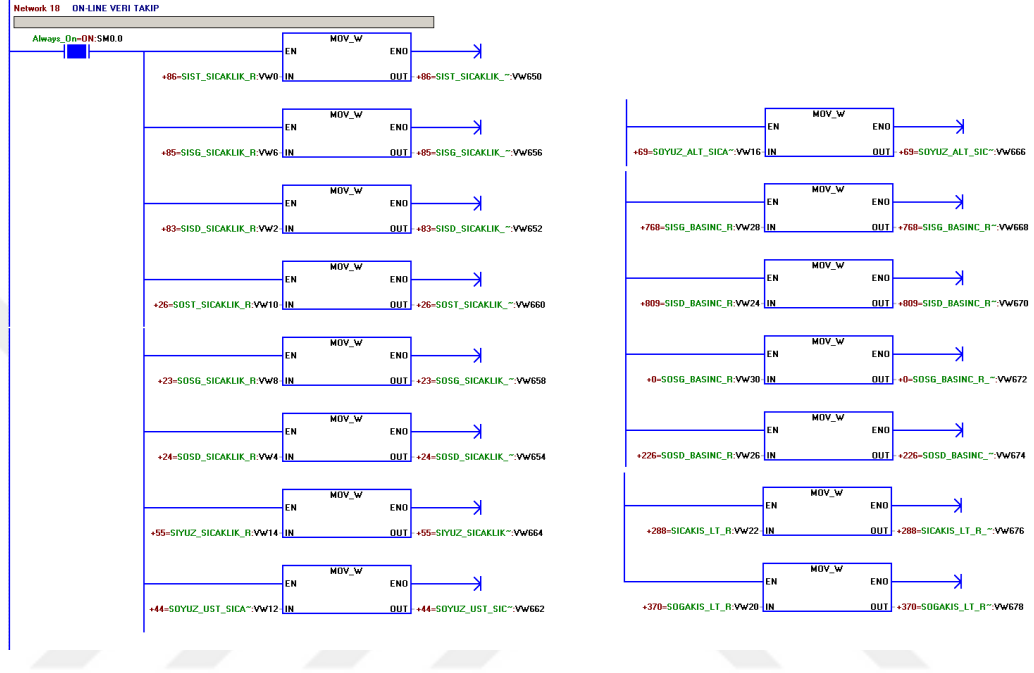
3.4.10.7 TEG Sistemi Verilerinin Anlık Takibi

PVKS için hazırlanan MicroWIN yazılımında, her bir analog veri ölçümü ayrı ayrı Networklerde yapılmıştır. Analog verilerin ölçülmesinin dışında, ölçülen verilerin toplu halde görülebildiği program adımı da oluşturulmuştur. Şekil 3.55'te TEG sisteminin işleyişini takip edebilmek için gerekli olan sıcaklık, basınç ve akış miktarı verileri aynı izleme ekranında görülebilmektedir. Sıcaklık ve basınç değerleri, sisteme montajı yapılan analog termometreler ve manometreler ile karşılaştırılarak ölçülmüştür. Program yazımı sırasında atanan dijital ve analog adreslerin birbiri ile çakışmamasına dikkat edilmiştir.

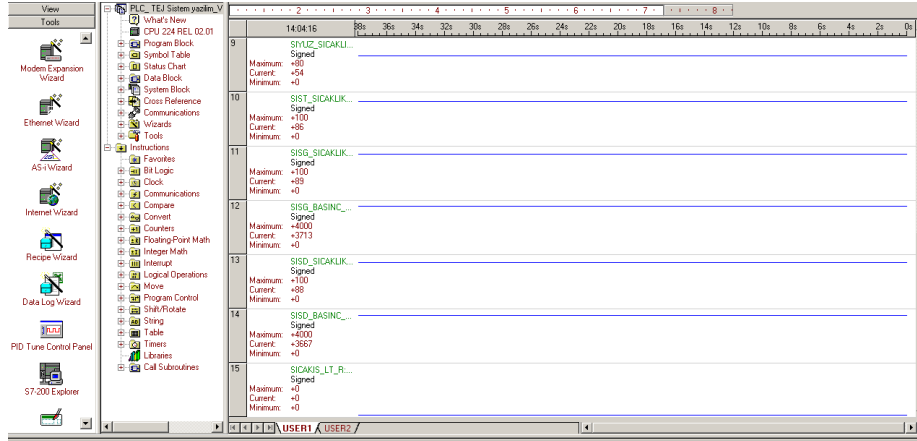
Şekil 3.56'daki trend izleme ekranı üzerinden, sistemden elde edilen tüm analog verilerin zamana bağlı değişimleri aynı anda görülebilmektedir. Tanımlanan diğer verilerle beraber anlık olarak veri takibi yapılabilir.

Deney setinden elde edilip PLC'de işleminden geçen tüm veriler, Şekil 3.57'de görüldüğü gibi Excel dosyası halinde, tarih ve saat bilgileri ile birlikte kaydedilebilmektedir. Tarih ve saat bilgilerinin doğru kaydedilmesi için, PLC saati PC ile senkronize edilmelidir. Hafıza kartına kaydedilen verilerin PC'ye Excel dosyası olarak kaydedilmesi için, S7 200 Explorer MicroWIN V4.0 uygulaması kullanılmıştır.

Bu şekilde, S7 200 hafıza kartında yer alan data logları, .CSV (Comma Separated Value) file formatında okunabilir (Siemens 2004). Veriler MS Excel programı ile açılıp kaydedilebilir, grafikler ve analizler gerçekleştirilebilir. Ayrıca, yine PLC MicroWIN yazılımı ile ölçümü gerçekleştirilen tüm veriler, Şekil 3.58’de görüldüğü üzere, kullanıcı tarafından, ana ekranda veri olarak izlenebilmektedir.



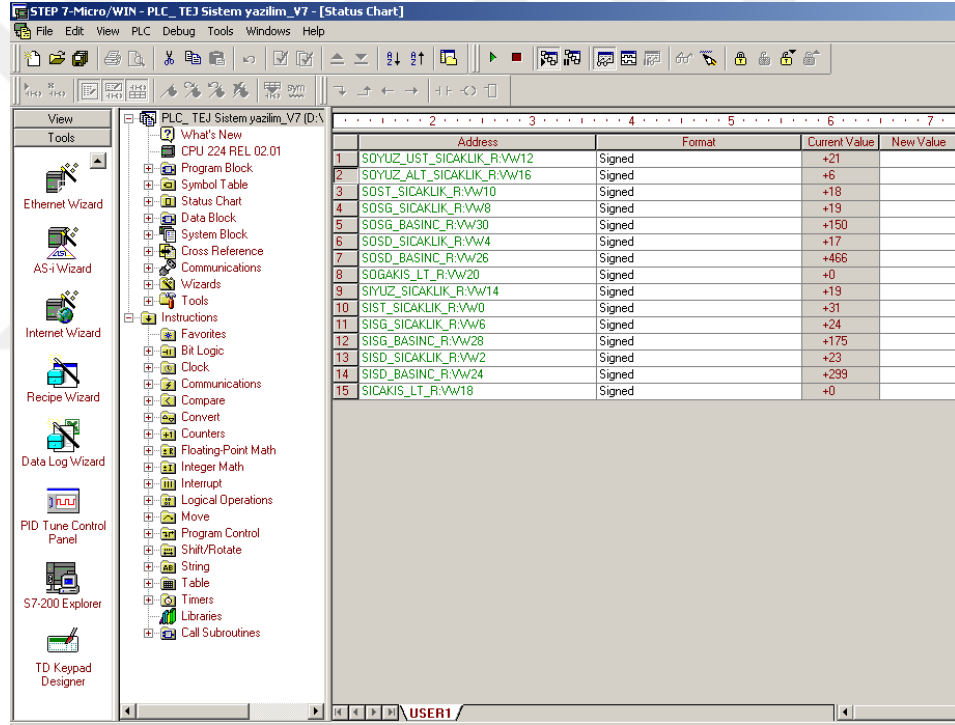
Şekil 3.55: MicroWIN programı ile analog verilerin anlık izlenmesi.



Şekil 3.56: MicroWIN programı ile analog verilerin trend olarak izlenmesi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
	DATE	TIME	SIST_ SICALIK_R_DR	SISD_ SICALIK_R_DR	SOSD_ SICALIK_R_DR	SISG_ SICALIK_R_DR	SOSG_ SICALIK_R_DR	SOST_ SICALIK_R_DR	SOYUZ_ UST_SICALIK_R_DR	SIYUZ_ SICALIK_R_DR	SOYUZ_ ALT_SICALIK_R_DR	SISG_ BASINC_R_DR	SISD_ BASINC_R_DR	SOSG_ BASINC_R_DR	SOSD_ BASINC_R_DR	SICAKIS_ LT_R_DR	SOGAKIS_ LT_R_D
1																	
2	15.01.2021	17:11:43	97	97	94	33	29	30	64	51	80	1805	1834	163	438	272	1000
3	15.01.2021	17:09:42	98	98	94	33	29	30	64	51	80	1847	1871	156	430	275	1276
4	15.01.2021	17:07:41	99	100	96	32	28	30	65	51	82	1874	1898	147	423	279	1993
5	15.01.2021	17:05:40	99	100	96	32	28	30	65	51	82	1902	1926	139	413	269	8500
6	15.01.2021	17:03:33	98	98	94	32	28	29	64	50	80	1865	1885	130	404	274	382
7	15.01.2021	17:01:32	100	100	96	32	28	29	65	51	82	1886	1905	120	392	282	383
8	15.01.2021	16:59:31	99	100	96	31	28	29	65	50	82	1914	1932	111	383	262	384
9	15.01.2021	16:57:30	98	97	94	31	27	29	63	50	80	1868	1888	105	378	272	386
10	15.01.2021	16:55:29	100	100	96	31	27	28	65	50	82	1876	1898	93	366	317	381
11	15.01.2021	16:53:28	100	100	96	31	27	28	64	50	81	1974	2036	174	468	202	297
12	15.01.2021	16:51:27	98	99	94	31	26	28	63	50	80	1953	2019	172	467	196	298
13	15.01.2021	16:49:26	99	98	94	30	26	28	63	50	80	1925	1991	159	454	201	298
14	15.01.2021	16:47:25	100	100	95	30	26	28	64	50	81	1951	2014	152	446	191	298
15	15.01.2021	16:45:24	100	100	96	30	26	28	64	50	81	1975	2038	144	437	198	298
16	15.01.2021	16:43:23	98	98	93	30	26	27	63	49	79	1942	2007	139	434	182	301
17	15.01.2021	16:41:22	99	98	95	29	25	27	63	49	80	1914	1982	127	420	189	303
18	15.01.2021	16:39:21	100	100	95	29	25	27	63	49	80	1941	2010	117	410	210	308
19	15.01.2021	16:37:20	99	100	95	29	24	26	63	49	80	1965	2034	110	402	0	333
20	15.01.2021	16:35:19	97	98	93	28	25	27	63	50	79	1929	2001	189	501	227	205
21	15.01.2021	16:33:18	98	96	92	28	25	26	61	48	78	1900	1972	97	389	137	241
22	15.01.2021	16:31:17	100	100	94	28	24	26	63	49	79	1973	2078	178	489	117	200
23	15.01.2021	16:29:16	100	100	94	28	23	26	62	49	79	1994	2099	172	484	0	204
24	15.01.2021	16:27:15	100	100	94	28	23	26	63	49	79	2016	2123	168	478	169	197
25	15.01.2021	16:25:14	99	100	93	27	23	25	62	48	78	2039	2146	160	471	170	197
26	15.01.2021	16:23:13	97	97	90	27	23	25	61	48	76	1948	2054	156	468	170	197
27	15.01.2021	16:21:12	100	99	93	27	23	25	62	48	78	1955	2059	149	459	174	197

Şekil 3.57: PLC’de kaydedilen verilerin, Excel dosyası halinde elde edilmesi.



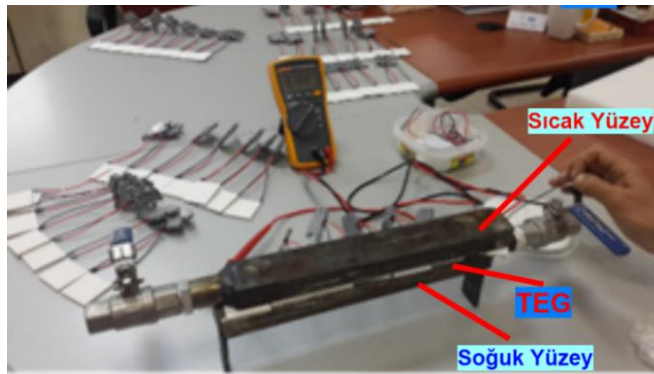
Şekil 3.58: Tanımlı analog verilerin ana ekranda izlenmesi.

4. JES-TEG SİSTEM DENEYLERİ

JES-TEG modelinde ilk olarak, TEG'lerin testleri yapılmıştır. Her bir TEG çıkış gerilimi belirli bir sıcaklık farkı için ölçülerek, ölçüm sonuçları katalog değerleri ile karşılaştırılmıştır. Burada amaçlanan, mikro bazda hasarlı olabilecek TEG varlığının araştırılması ve tespiti halinde kullanım dışı tutulmasıdır. Ayrıca TEG'ler, montaj işlemi doğrulama prosedürlerine de (polarite testi ve baskı ayar kontrolü) tabi tutulmuştur. Sonrasında, TEG modül konfigürasyonları; $N_S = 6 / N_P = 8$, $N_S = 8 / N_P = 6$ ve $N_S = 12 / N_P = 4$ olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Yukarıda bahsi geçen benzetim faaliyetleri ile yürütülen deneysel çalışma süreçleri neticesinde, en uygun konfigürasyon olarak $N_S = 12 / N_P = 4$ yapılanması belirlenmiştir. Bu bölümde de, ilgili konfigürasyon kapsamında yürütülen deneysel faaliyetler yer almaktadır.

4.1 TEG Modüllerinin Test Edilmesi

Temin edilen TEG modüllerinin sağlamlık testleri Şekil 4.1'de görülen düzeneğe kullanılarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan alüminyum profillerin birisinin içerisine sıcak su, diğerinin içerisine soğuk su doldurularak sıcaklık farkı oluşturulmuş, bu sıcaklık farkıyla oluşan ΔT değerine göre tüm TEG'lerin gerilim değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçüm işlemi sonucunda, temin edilen tüm TEG'lerin gerilim ürettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1: TEG modül test düzeneği.

TEG'lerin bağlantı yönleri kontrol edildikten sonra, TEG sistemi bir bütün olarak devreye alınmıştır. Devreye alma çalışmaları, değişik sıcaklık farklarında TEG çıkış gerilim değerlerinin ayrı ayrı ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. İlk

denemelerde Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, TEG’ler seri veya paralel bağlanmadan, bağımsız bir şekilde (ayrı ayrı) ölçümler yapılmıştır.



Şekil 4.2: TEG sisteminde modül çıkışlarının ölçülmesi.

Oluşturulan konfigürasyonlara göre, TEG modüllerinden en fazla gerilimin elde edildiği yapılandırmalar üzerinde deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, 48 adet TEG’in Tablo 4.1’de görülen parametrelerde çıkış gerilimleri ölçülüp, ölçüm sonuçları Tablo 4.2’de görüldüğü şekilde elde edilmiştir. Yapılan ölçümlerin sonucunda, TEG’lerin çıkış gerilimleri arasında farklar meydana geldiği görülmüştür. Oluşan bu durumun en büyük nedeni olarak; bakır profiller ile her bir TEG arasında homojen nitelikte temas yüzeyinin sağlanamaması ve neticede ısı transferinde meydana gelen farklılıklar gösterilebilir.

Tablo 4.1: TEG modüllerine dair gerilim ölçümleri esnasındaki sıcaklık parametreleri.

Parametre	Değer (°C)
Sıcak Su Tank Sıcaklığı (SIST)	81
Sıcak Su Dönüş Sıcaklığı (SISD)	79
Sıcak Su Geliş Sıcaklığı (SISG)	80
Soğuk Su Tank Sıcaklığı (SOST)	12
Soğuk Su Dönüş Sıcaklığı (SOSD)	13
Soğuk Su Geliş Sıcaklığı (SOSG)	11
Sıcaklık Farkı (ΔT)	69

Tablo 4.2: TEG’lerin bireysel gerilim ölçüm değerleri.

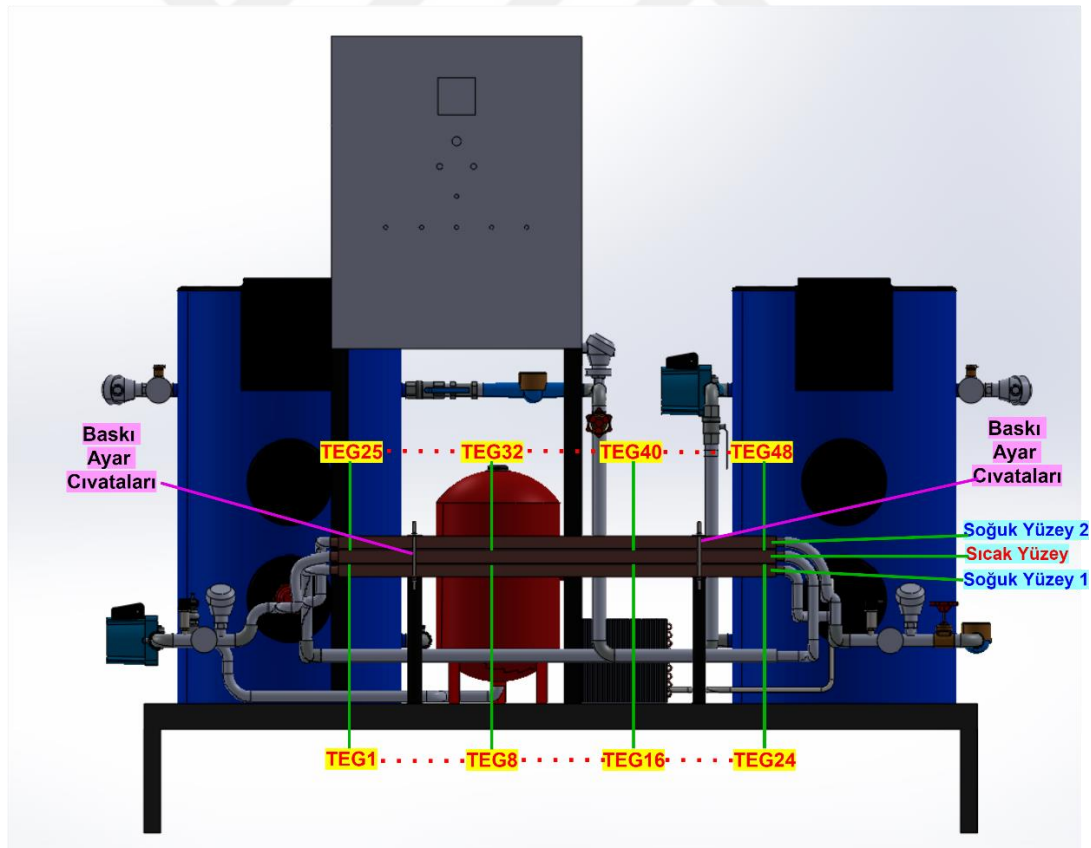
TEG No.	Gerilim Değeri (V)	TEG No.	Gerilim Değeri (V)
TEG 1	1,932	TEG 25	2,223
TEG 2	1,889	TEG 26	1,911
TEG 3	2,134	TEG 27	2,063
TEG 4	1,851	TEG 28	2,079
TEG 5	1,878	TEG 29	2,096
TEG 6	1,857	TEG 30	2,008
TEG 7	1,900	TEG 31	2,134
TEG 8	1,101	TEG 32	1,807
TEG 9	1,453	TEG 33	1,348
TEG 10	1,585	TEG 34	1,607
TEG 11	1,319	TEG 35	1,600
TEG 12	1,486	TEG 36	1,630
TEG 13	1,657	TEG 37	1,558
TEG 14	1,810	TEG 38	1,614
TEG 15	1,885	TEG 39	1,210
TEG 16	1,771	TEG 40	1,174
TEG 17	0,964	TEG 41	1,197
TEG 18	1,009	TEG 42	1,984
TEG 19	1,693	TEG 43	1,669
TEG 20	1,668	TEG 44	1,930
TEG 21	1,598	TEG 45	1,876
TEG 22	1,605	TEG 46	1,723
TEG 23	0,918	TEG 47	2,064
TEG 24	1,911	TEG 48	2,757

TEG sisteminde, belirtilen sıcaklık farkında gerilim değerleri ölçülürken, ölçüm sonuçlarının daha iyi değerlendirilebilmesi için TEG modüllerinin bakır profiller arasındaki yerleşim yerlerinin bilinmesi faydalı olacaktır. TEG modülleri; TEG1’den TEG 24’e kadar Sıcak Yüzey ve Soğuk Yüzey-1 arasında, TEG 25’ten TEG 48’e kadar ise Sıcak Yüzey ve Soğuk Yüzey-2 arasında, sırasıyla yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.31).

Tablo 4.1’de verilen TEG sistemi parametrelerinde yapılan ölçümler değerlendirildiğinde, TEG ortalama çıkış gerilim değeri 1,71 V DC, 12 adet TEG’den oluşan dizilerin ortalama gerilim değeri 20,53 V DC’dir. En düşük üretim 0,918 V DC ile 23 no’lu TEG’ten, en yüksek üretim 2,757 V DC ile 48 no’lu TEG’ten elde edilmiştir. Ölçülen TEG modül gerilim değerlerine göre oluşturulacak dizilerden elde edilecek gerilim değerlerinin hesaplanması da, bu şekilde mümkün olmuştur.

4.2 Montaj İşlemi Doğrulama Prosedürleri

Şekil 4.3'teki TEG Sistemi yerleşim düzeninde görüldüğü gibi, sıcak yüzey olarak bir adet, soğuk yüzey olarak iki adet bakır profil montajı yapılmıştır. TEG sisteminde kullanılan toplam 48 adet TEG'den ilk 24 adedi Sıcak Yüzey ile Soğuk Yüzey-1 arasında olacak şekilde, kalan 24 adedi de Sıcak Yüzey ile Soğuk Yüzey-2 arasında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu noktada önemli bir husus, TEG modüllerinin sıcak ve soğuk yüzeylerinin doğru bir şekilde tespit edilmesi zorunluluğudur. Aksi takdirde TEG modüllerinin çıkış güçleri, düşük olacaktır. Yüzey tespitinin yapılması sonrası, ısı transferinin artırılması amacıyla, TEG modüllerinin her iki yüzeyine termal macun sürülür ve bakır profillere TEG montajı bu şekilde yapılır. Sonrasında, bakır profillerden TEG modüllerine ısı transferinin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için, ürün katalog verilerine göre Şekil 4.3'te görülen baskı ayar cıvataları kullanılarak baskı ayarı yapılır.



Şekil 4.3: TEG'lerin yerleşim düzeni.

Sistemin kurulumunun ardından tüm TEG'ler seri bağlanarak TEG sistemi çıkış gerilimi U_{TEG} 'in ölçülmesi ile ilk deney yapılmıştır. Yapılan deneyde, soğutulan

su bakır profilin soğuk yüzeylerinden, ısıtılan su ise sıcak yüzeylerinden geçirilerek test modunda yaklaşık 50 °C'lik sıcaklık farkı (ΔT) elde edilmiş ve sistem tarafından üretilen DC gerilim değeri olması gereken değerden çok düşük olarak 2 V DC ölçülmüştür. Bu noktada, TEG'lerin bağlantıları gözden geçirilmiştir. TEG'lerin bireysel çıkış gerilimleri ölçülmüştür. Tekli ölçümlerde Şekil 4.3'te yerleşimi görülen Sıcak Yüzey ile Soğuk Yüzey-1 arasında bulunan TEG'lerin negatif gerilim ürettikleri tespit edilmiştir. TEG katalogları tekrar incelenmiş, katalog bilgilerine göre TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzeylerinin mevcut sistemdeki bakır profil üzerine; TEG sıcak yüzeyinin bakır profil soğuk yüzeyine, soğuk yüzeyinin ise sıcak yüzeyi üzerine gelecek şekilde hatalı monte edildiği tespit edilmiştir. Oluşan polarite hatasını düzeltmek amacıyla, sistemin tüm izolasyonu sökülmüş, bakır profiller aralanarak Sıcak Yüzey ile Soğuk Yüzey-1 arasında bulunan TEG'ler çıkarılmıştır. Kablo bağlantılarında TEG'lerin alt yüzeyleri sıcak, üst yüzeyleri ise soğuk yüzey olacak şekilde (kırmızı kablo/pozitif uç solda) bağlantılar değiştirildikten sonra, TEG modüllerinin bakır profillere montajı tekrar yapılmıştır. Bakır profiller izolasyon ile yeniden kaplanarak sistem, deneyler için hazır hale getirilmiştir.

Yapılan sistem kontrollerinde, alt bölümde yer alan profillerin başında ve sonunda bulunan 2 adet TEG'in kablo bağlantı noktalarında, profillerin ağırlığı nedeniyle Şekil 4.4'te görüldüğü gibi hasar oluştuğu tespit edilmiş, bu TEG'ler, yedekleriyle değiştirilmiştir. Değişim yapılmadan önce, TEG dizilerinin başına, yeni bir hasar oluşmaması için, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, birer adet ahşap tampon yerleştirilmiştir. TEG'lerin profil ağırlığına karşı direnebilmesi için konulan tamponlar basit ve işe yarar bir çözüm olmuştur.



Şekil 4.4: Profil ağırlığı ile hasar gören TEG.



Şekil 4.5: TEG koruması için kullanılan tampon malzemeler.

4.3 Farklı Konfigürasyonlarla Oluşturulan TEG Sistem Deneyleri

TEG Sistemi'ni oluşturan modüllerin ayrı ayrı ölçümleri gerçekleştirildikten sonra, TEG'lerin çeşitli konfigürasyonlarda bağlantıları yapıp, tüm sistem çıkışındaki gerilim değerleri ölçülmüştür. TEG sisteminin çıkışındaki AC yükleri enerjilendirmek için DC/AC invertör kullanılmaktadır (bkz. Şekil 3.39). Sistemde kullanılan invertörün giriş gerilim aralığı 10,5 - 15 V DC arasındadır. TEG Sistemi'nde üretilen DC gerilim, invertörün devreye girmesiyle birlikte yaklaşık 1V düşmektedir. Dolayısıyla sistem çıkış geriliminin, yaklaşık 14-15 V DC olması gerekir.

TEG Sistemi'nin, altılı seri kol/sekizli paralel kol şeklindeki bağlantı ile her bir kolda ortalama 10,265 V DC çıkış verdiği hesaplanmıştır. Bu değerle invertör devreye giremeyeceği için, TEG'lerin sekizli seri kol/altılı paralel kol ve on ikili seri kol/dörtlü paralel kol kombinasyonu ile bağlantı yapılarak invertör giriş gerilimi ayarlanmaya çalışılmıştır.

4.3.1 Sekizli Seri / Altılı Paralel Kol TEG Bağlantı Deneyleri

TEG'ler üzerinde, Tablo 4.1'de belirtilen parametrelere göre yapılan gerilim ölçümleri, Tablo 4.2'de verilmişti. Bu ölçüm sonuçlarına göre TEG modülleri sekizerli gruplarda bağlantı yapılacak olursa, dizilerden elde edilecek gerilim değerleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Sekizli seri altılı paralel kol TEG bağlantısı için hesaplama sonucu elde edilen gerilim değerleri.

Sekizli TEG Dizini	Gerilim Değeri [V]
TEG 1-TEG 8	14,542
TEG 9-TEG 16	12,966
TEG 17-TEG 24	11,366
TEG 25-TEG 32	16,321
TEG 33-TEG 40	11,741
TEG 41-TEG 48	15,180
Ortalama	13,686

Sekizli grupların gerilimleri cebirsel olarak toplanmış, bu gerilim değerlerinin ortalaması alınarak 13,686 V DC değeri elde edilmiştir. İkinci ölçümde de sonuçlar benzer şekilde oluşmuştur. Bu ölçülen ve hesaplanan değerlere göre, sekizli seri ve altılı paralel dizin konfigürasyonunun invertörü devreye sokabileceği düşünülerek deney aşamasına geçilmiştir. TEG modül bağlantıları $N_S=8$ ve $N_P=6$ olacak şekilde düzenlenerek TEG sistemi oluşturulmuştur.

TEG'lerin sekizli seri kol/altılı paralel kol şeklinde bağlantısı yapılarak TEG sistemi çıkışındaki DC gerilim değeri sıcaklık değişimleri ile birlikte iki farklı zamanda ölçülmüş, ölçüm sonuçları Tablo 4.4'te sunulmuştur. Bu konfigürasyonda yapılan ölçümde; SIST (Sıcak Su Tank Sıcaklığı) 90 °C, SOST (Soğuk Su Tank Sıcaklığı) 11 °C ve $\Delta T= 79$ °C için TEG sistemi çıkış gerilimi $U_{TEG} = 12,48$ V DC olarak invertör giriş aralığında enerji üretilmiştir. Üretilen bu U_{TEG} gerilimi, invertör giriş gerilim aralığında olmasına rağmen, invertörü devreye alma anında yaşanan gerilim düşümünden dolayı invertör devreye alınamamıştır.

Tablo 4.4: Sekizli seri altılı paralel kol TEG bağlantısı için ölçülen gerilim değerleri.

Parametre	Ölçüm #1	Ölçüm #2	Ölçüm #3	Ölçüm #4	Ölçüm #5
SIST	70 °C	75 °C	80 °C	85 °C	90 °C
SISD	69 °C	74 °C	74 °C	84 °C	89 °C
SISG	70 °C	75 °C	75 °C	85 °C	90 °C
SOST	9 °C	9 °C	9 °C	9 °C	11 °C
SOSD	8 °C	9 °C	10 °C	11 °C	10 °C
SOSG	9 °C	8 °C	8 °C	9 °C	11 °C
ΔT	61 °C	69 °C	71 °C	76 °C	79 °C
U_{TEG}	9,36 V	10,11 V	10,98 V	11,74 V	12,48 V

4.3.2 On İkili Seri / Dörtlü Paralel Kol Doğrudan İnvörtör Bağlantılı Sistem

İnvörtörü devreye alabilmek için, on ikili seri kol / dörtlü paralel kol kombinasyonu ile TEG'lerin bağlantısı yapılmıştır. Ölçümlere ait veriler, Tablo 4.5'te sunulmuştur. Tablo 4.5 incelendiğinde; hem sistemin sıcak su hattının ısınma süresine bağlı olarak, hem de sıcak su hattının ısınırken soğutucu devrede olmasına rağmen soğuk su hattında da ısı transferi nedeniyle sıcaklık artışı meydana geldiği görülmektedir. Tablo 4.5'teki veriler, rezistans devrede iken ve sıcak yüzey ısınma aşamasındayken belirli aralıklarla yapılan ölçümleri kapsamaktadır. Multimetre ile yapılan ölçümlerde ise, $\Delta T = 71^{\circ}\text{C}$ için U_{TEG} geriliminin 22 V DC değerine kadar yükseldiği görülmüştür.

Tablo 4.5: TEG'lerin on iki seri / dört paralel kol konfigürasyonu için rezistans devredeyken elde edilen ölçüm verileri.

Ölçüm Noktası	Sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$] (Başlangıç anı)	Sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$] (Başlangıç anı + 13 dk)	Sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$] (Başlangıç anı + 65 dk)
SIST	42	52	86
SISG	44	54	89
SISD	43	53	88
SOST	6	7	15
SOSG	6	7	14
SOSD	7	8	16
ΔT	36	45	71
U_{TEG} (V DC)	9,63	12,44	22,00

Üretilen gerilim değerinin invörtörün çalışma aralığından yüksek olması nedeniyle sıcak su hattı sirkülasyon sistemindeki şıbel vana açıklık oranı kısılarak U_{TEG} 'in invörtör giriş aralığına düşürülmesi sağlanmış, invörtör çıkışında 230 V AC gerilim değeri elde edilmiştir. Vana tekrar tam açık pozisyona getirilerek sisteme yük bağlanmış ve deneyde bir sonraki aşamaya geçilmiştir. İnvörtör devreye girdiği anda TEG sistemi çıkış geriliminde, yaklaşık 1 V DC gerilim düşümü gerçekleşmektedir. Yüke invörtör üzerinden enerji verildiğinde, gerilim düşümü devam etmektedir. Yük olarak LED lambalar kullanılarak deney tamamlanmıştır. Bu kombinasyon için, Şekil 4.6'da görülen deney düzeneğinde, invörtör çıkışına tesis edilen 4 adet her biri 8 W gücünde LED lamba devreye alınarak, deneyde ilk aşama sonuçları elde edilmiştir. LED lambalar devredeyken TEG sistemi çıkış gerilimi, 11,54 V DC olarak ölçülmüştür.

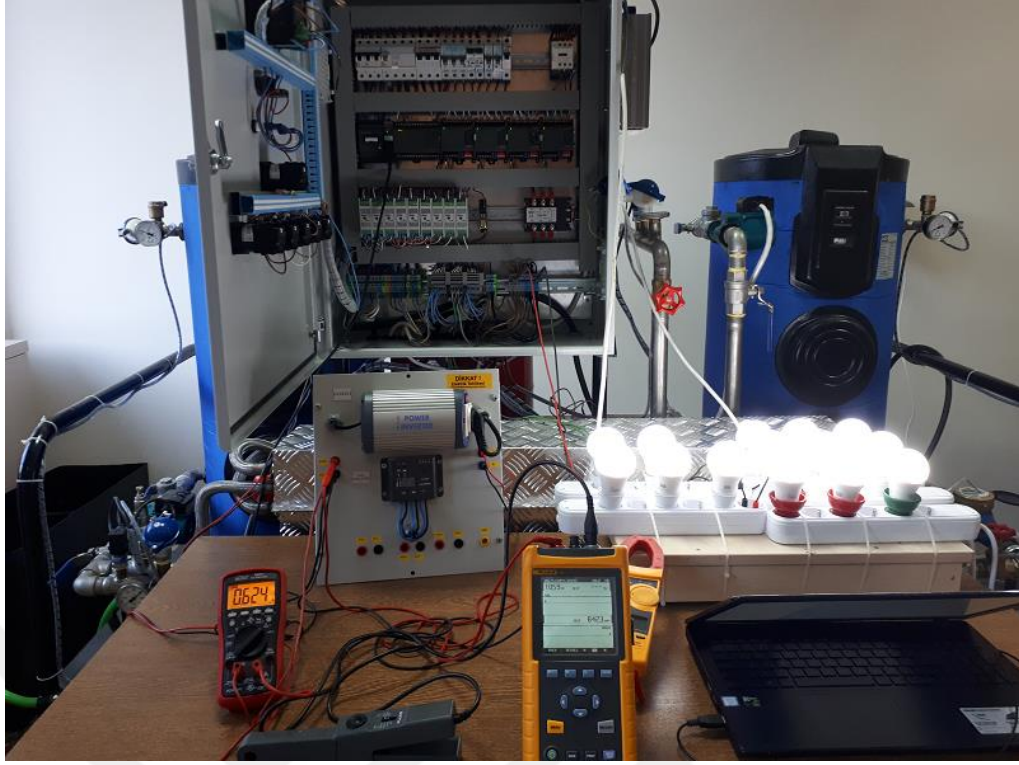


Şekil 4.6: TEG sisteminin LED lambalar ile yüklenmesi.

4.3.3 On İkili Seri / Dörtlü Paralel Kol Şarj Regülatörü ve Akülü Sistem

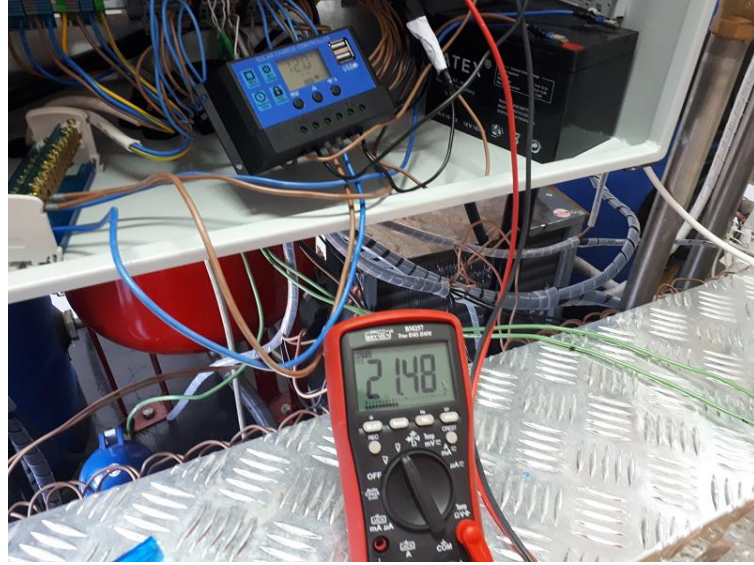
İnvertör giriş aralığında DC gerilim üretmek için sistemde denenen çeşitli bağlantı konfigürasyonları arasında en uygun konfigürasyon olarak, on iki seri ve dört paralel kol bağlantılı sistemde karar kılınmıştır. Bu konfigürasyon, matematiksel hesaplamalar ve Matlab & Simulink benzetim çalışmaları da dahil olmak üzere, çalışmanın tüm aşamalarında kullanılmıştır.

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi, TEG sistemince üretilen gerilim değeri, sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) arttıkça artmaktadır. Üretilen gerilim değeri, 22 V DC'ye kadar yükselip, invertör giriş gerilim aralığı olan 10,5 - 15 V DC aralığı dışına çıkmaktadır. Sistemde sıcak ve soğuk su sirkülasyonunun durması, U_{TEG} gerilimini hızlı bir şekilde düşürmektedir. Deney esnasında su sirkülasyonu geçici bir süre yavaşlatılarak U_{TEG} gerilimi invertör giriş aralığına çekilmiş, 12 adet 8 W LED ve 2 adet 10 W LED'ten oluşan AC yükler kademeli olarak Şekil 4.7'deki gibi devreye alınmıştır. Böylelikle invertörün kesinti yaşanmadan çalışmaya başlaması sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra sirkülasyon tekrar tam olarak devreye alınmıştır. Bu deneyde, doğrudan invertör bağlantısı ile yapılan bir önceki deneyden farklı olarak, LED lambalardan oluşan yükler kademeli devreye alınarak deneyler tamamlanmıştır.



Şekil 4.7: TEG sistem çıkışının doğrudan invertöre bağlanması.

TEG sistem çıkışının doğrudan invertöre bağlandığı yapılanmada, invertörün devreye alınması için vana açıklık oranının değiştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, invertörün sağlıklı bir şekilde yük altında (LED yükler) devreye alınabilmesi için, TEG sistemi çıkışının akü ve şarj regülatörü üzerinden invertöre bağlanması yoluna gidilmiştir. Burada düşünülen, TEG sistem çıkışı ve dolayısıyla invertör giriş geriliminin, tesis edilecek küçük kapasiteli bir akü ile (12 V / 12 Ah) sabit tutulmasıdır. TEG sistem çıkışı, temin edilen akü ve 10 A şarj regülatöründen oluşan baraya, Şekil 3.39'da görülen şemaya uygun olarak, Şekil 4.8'de görüldüğü gibi bağlanmış ve başarılı bir şekilde deneme üretimi yapılmıştır.



Şekil 4.8: TEG çıkışının şarj regülatörü ve akü üzerinden invertöre bağlantısı.

Deneysel çalışma esnasında ortam sıcaklığı, Şekil 4.9’da görülen Airflow Anemometre/Termometre ile ölçülmüştür.



Şekil 4.9: Airflow anemometre / termometre.

Ölçüm sonuçları deneysel çalışma kayıtlarına eklenmiş ve elde edilen tüm veriler, Tablo 4.6’da sunulmuştur. Tablo 4.6’da logları görülen deney süresince anemometre/termometre ile ortam sıcaklığı ölçümleri yapılmıştır. Sistem deneyleri, yaklaşık 30 °C’lik ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Soğutma işlemi sırasında sıcak su sirkülasyon pompası çalıştırılmamış ve bu şekilde soğutma süresi kısalmıştır. Şarj regülatörü devreye alınıp U_{TEG} değeri 12 V DC’nin üzerine çıktığında, sisteme entegre edilen akü şarj olmaya başlamıştır. SIST değeri 95 °C’ye çıkarıldığında AC yükler devreye girmeden önce, $\Delta T = 80$ °C iken, şarj regülatörü devreden çıkarılmış ve U_{TEG} değeri 22,34 V DC olarak ölçülmüştür. Yükler devreye alınırken, şarj regülatörü çalışır pozisyonda tutulmuştur. AC yüklerin (12 adet 8 W LED ve 2 adet 10 W LED) Tablo 4.6’da görülen 8 no’lu ölçüm anında devreye alınmasıyla birlikte, 195

dakikalık süre içerisinde 15 dakikalık aralıklarla 14 kez ölçüm yapılmıştır. Yükler devreye girdikten sonra U_{TEG} değeri 12,35 V DC, U_{SR} değeri 12,2 V DC olarak ölçülmüştür. Soğuk su hattı 6 °C'ye kadar soğutulduktan sonra, sıcak su ısıtma sistemi devreye alınmıştır. Sıcak su hattının ısıtılmaya başlanmasından deneyin sonuna kadar geçen 255 dakikalık sürede, soğuk su sıcaklığı 41 °C'ye kadar yükselmiştir. Deney sırasında SIST ve SOST arasında maksimum sıcaklık farkı 80 °C, minimum sıcaklık farkı ise 55 °C olarak ölçülmüştür. TEG deneyleri sıcak su hat basıncının 2,2 bar olduğu durumda gerçekleştirilmiştir (sistem hat basıncı maksimum limit değeri 4 bar). TEG sistemi deneyleri sırasında Şekil 4.10'da görüldüğü gibi tüm yükler, tasarlanan yük seti ile birlikte aynı anda devreye alınmıştır.

Tablo 4.6: TEG sistemi enerji üretim logları.

Ölçüm No	Saat	SIST (°C)	SISG (°C)	SISD (°C)	SOST (°C)	SOSG (°C)	SOSD (°C)	ΔT (°C)	T_{amb} (°C)	U_{TEG} (DC, V)	U_{SR} (DC, V)	U_{Inv} (DC, V)	U_{Inv} (AC, V)	SISDB (bar)
1	09:55	40	33	29	28	25	24	12	28	-	-	-	-	-
2	11:00	39	33	38	18	16	16	21	28	-	-	-	-	-
3	12:00	39	32	26	10	9	9	29	29	-	-	-	-	-
4	12:40	39	32	26	6	5	6	33	29	-	-	-	-	-
5	13:00	62	63	61	8	6	8	54	30	13,19	-	13,19	-	1,0
6	13:30	92	91	88	14	11	13	78	30	20,88	13,2	-	-	2,0
7	13:39	96	97	93	16	13	15	80	30	22,34	13	-	-	2,0
8	13:40	96	97	93	16	13	15	80	30	12,35	12,2	11,8	220,9	2,2
9	13:55	97	97	93	20	16	19	77	30	11,73	11,6	10,9	221,6	2,2
10	14:10	95	95	92	23	19	21	72	30	11,46	11,3	10,83	220,7	2,2
11	14:25	97	97	93	25	21	23	72	30	12,43	12,2	10,71	219,7	2,2
12	14:40	96	97	93	27	23	25	69	30	11,98	11,9	10,73	219,7	2,2
13	14:55	96	95	92	29	25	27	67	30	11,9	11,9	10,66	218,7	2,3
14	15:10	97	97	4	31	27	29	66	30	11,33	11,9	10,73	219,7	2,3
15	15:25	95	96	92	33	28	31	62	30	12,2	12	10,61	218,5	2,3
16	15:40	96	96	93	35	30	32	61	30	12	11,9	10,54	217,8	2,2
17	15:55	97	97	94	36	31	34	61	30	11,26	11,1	10,61	218,1	2,2
18	16:10	95	96	92	38	33	35	57	30	11,22	11,1	10,61	217,4	2,2
19	16:25	97	96	93	39	34	36	58	30	11,24	11,2	10,55	217,6	2,2
20	16:40	96	96	93	40	35	37	56	30	11,23	11,1	10,53	217,5	2,2
21	16:55	96	96	93	41	36	38	55	30	11,31	11,2	10,54	217,5	2,2

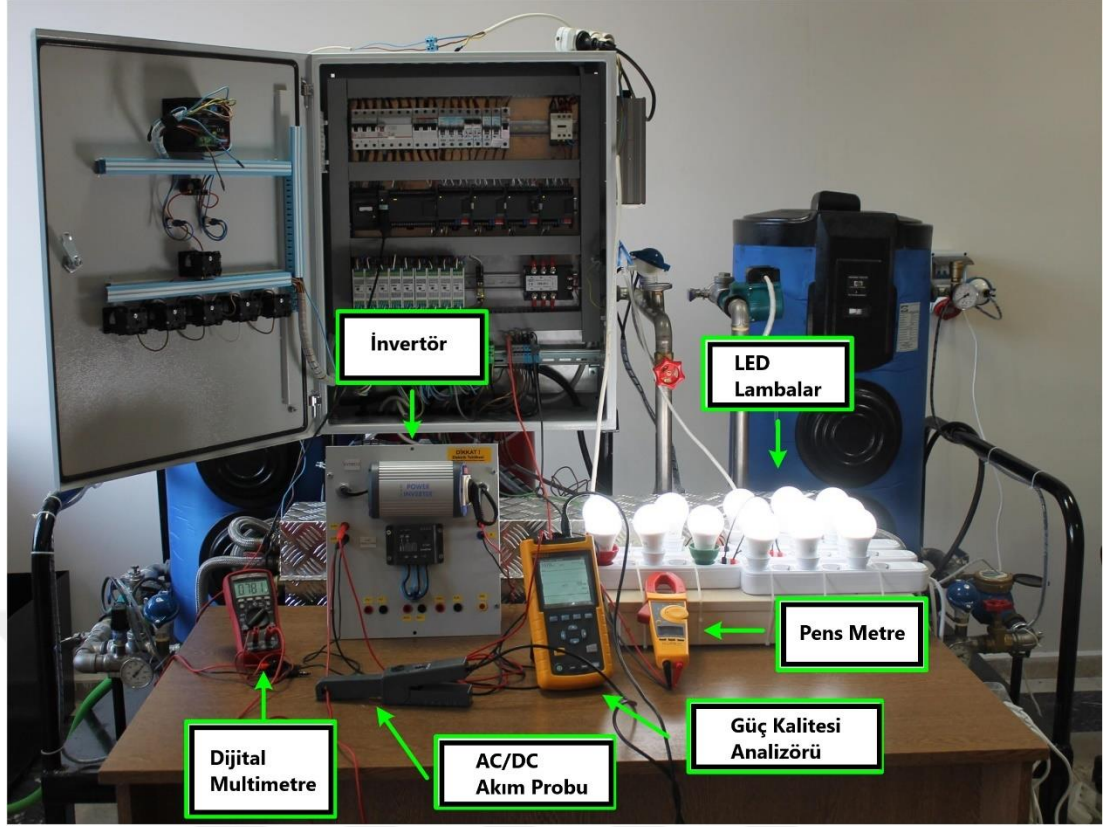


Şekil 4.10: TEG sisteminde AC yüklerin enerjilendirilmesi.

4.4 İnvörtörün Yük Altında İncelenmesi

TEG sistem çıkışında yer alan 150 W gücündeki invörtörün elektriksel yük altındaki performansının incelenebilmesi için, Şekil 4.11’de görülen düzenek kurulmuştur. Bu invörtör, 10,5 – 15 V DC gerilimi, 230 V / 50 Hz AC gerilime dönüştürür. İnvörtör çıkışındaki 230 V AC gerilim ile de her biri 8 W gücünde 12 adet LED lamba ve her biri 10 W gücünde 2 adet LED lambadan oluşan AC yük grubu enerjilendirilmiştir.

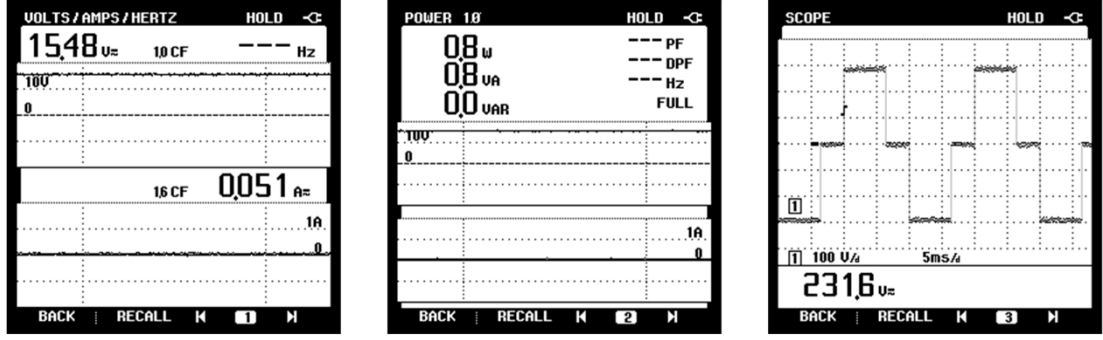
Deneyel çalışma sırasında, yine Şekil 4.11’de görülen ölçü aletleri kullanılmıştır. Fluke 43B güç analizörü, invörtör girişindeki ve çıkışındaki DC/AC gerilim, akım ve güç değerlerinin grafiksel olarak gözlemlenmesini sağlar. Fluke 43B ile bu ölçümleri yapabilmek için, Şekil 4.11’de görülen Fluke 80i-110s AC/DC Akım Probu kullanılır. Deney setinin herhangi bir noktasındaki gerilim değerinin ölçülmesi amacıyla, Brymen BM257 True RMS dijital multimetre kullanılmıştır. Şekil 4.11’de görülen Fluke 337 True RMS pensmetre ise, invörtör çıkışındaki AC akımın ölçülmesini sağlar.



Şekil 4.11: Elektriksel yük deneyleri için oluşturulan düzenek.

Deneysel çalışmada, TEG sistemi devreye alındıktan sonra (sıcak su sıcaklığı 91 °C, soğuk su sıcaklığı 11°C), sistemin ürettiği DC gerilim, invertör girişine uygulanmıştır. Sonrasında, Fluke 43B güç kalitesi analizörü ile ölçümler yapılmıştır (Şekil 4.12). Ölçüm sonuçlarına göre; TEG sistemi çıkış gerilimi 15,48 V (Şekil 4.12.a), çıkış akımı ise 0,051 A (Şekil 4.12.a) olarak elde edilmiştir. İnvertörün boşa çektiği güç 0,8 W'tır (Şekil 4.12.b). Bu durumdaki invertör çıkış gerilimi ise 231,6 V AC olarak ölçülmüştür (Şekil 4.12.c).

İnvertörün çıkışına LED lambaların bağlanması ile birlikte invertör giriş gerilimi, 12,20 V DC gerilim seviyesine inmiştir (Şekil 4.13.a). Bu durumda, Fluke 43B ile elde edilen ölçüm sonuçları; invertör giriş akımı 3,502 A (Şekil 4.13.a), invertör giriş gücü 42,6 W (Şekil 4.13.b), invertör çıkış gerilimi 221,1 V AC (Şekil 4.13.c), invertör çıkış akımı 0,222 A (Şekil 4.13.c) ve invertör çıkış gücü ise 38 W şeklindedir (Şekil 4.13.d).

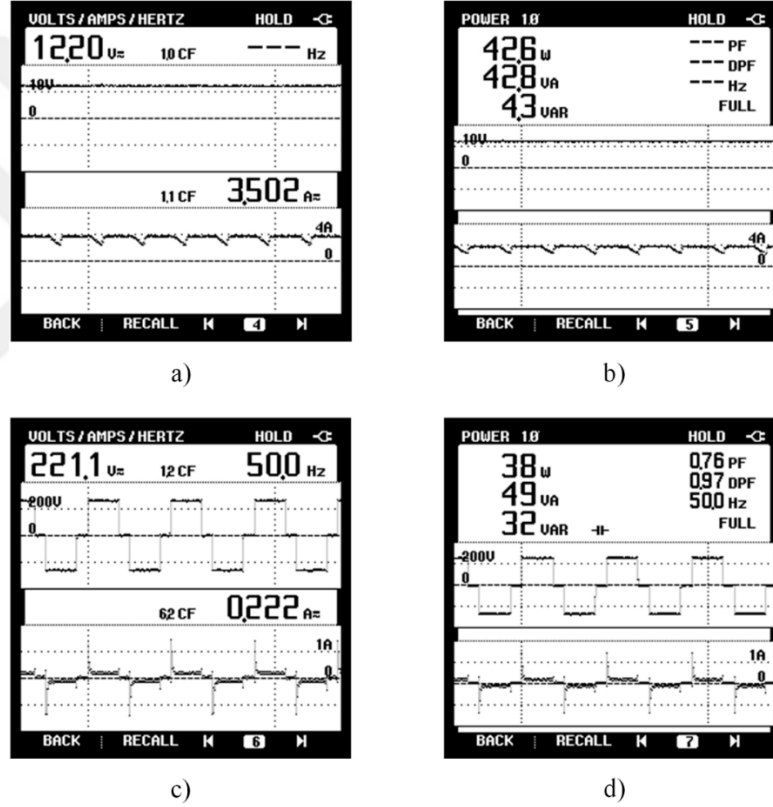


a)

b)

c)

Şekil 4.12: Boşta çalışan invertörün TEG sistemine bağlanması sonrası oluşan elektriksel dalga şekilleri (a) İnvörtör giriş gerilim ve akım grafikleri, b) İnvörtör DC giriş gücü, c) İnvörtör çıkış gerilim grafiği).



a)

b)

c)

d)

Şekil 4.13: LED lambaların devreye alınması ile birlikte oluşan invertör giriş / çıkış hattı üzerindeki elektriksel veriler (a) İnvörtör giriş DC gerilim ve akım grafikleri, b) İnvörtör DC giriş gücü, c) İnvörtör çıkış gerilim ve akım grafikleri, d) İnvörtör çıkış gücü).

4.5 Pompa Akış Hızı ve Sıcaklık Farkının TEG Sistemine Etkisi

Sıcak yüzey ile soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkının belirli bir değerdeyken pompa akış hızının ısı transferine etkisini incelemek için, bir önceki deneyin şartları muhafaza edilerek TEG sistem deneyleri yapılmıştır. Öncelikle, invertör giriş gerilim aralığında DC gerilim üretmek için, en uygun konfigürasyon olarak on iki seri bağlı TEG ve dört paralel kol bağlantılı sistem hazırlanmıştır. TEG sisteminde üretilen gerilim değeri olan U_{TEG} , invertör giriş gerilim aralığı olan 10,5 - 15 V DC aralığı dışına çıktığı için, TEG sistem çıkışı, gerilim stabilitesini sağlamak maksadıyla akü ve şarj regülatöründen oluşan baraya bağlanmıştır. Bu sistemde invertör çıkışına bağlı 12 adet 8 W LED ve 2 adet 10 W LED'ten oluşan AC yük bankı, doğrudan devreye alınmıştır.

Sıcak ve soğuk su pompa debilerinin üretime etkilerini gözlemleyebilmek için, pompaların sahip olduğu üç ayrı kademe hızında $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ için ($T_h = 70^\circ\text{C}$ ve $T_c = 20^\circ\text{C}$), $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ için ($T_h = 80^\circ\text{C}$ ve $T_c = 20^\circ\text{C}$), $\Delta T = 70^\circ\text{C}$ için ($T_h = 90^\circ\text{C}$ ve $T_c = 20^\circ\text{C}$) ve $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ için ($T_h = 100^\circ\text{C}$ ve $T_c = 20^\circ\text{C}$) ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Sıcak su ve soğuk su pompaları 3. kademede iken, 20 dakika süresince her 30 saniyede bir ölçümler alınmış, daha sonra her iki pompa sırasıyla 2. ve 1. kademede iken aynı deneyler gerçekleştirilmiştir. $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ için, pompa kademelerinin TEG sistemine etkisini görebilmek amacıyla yapılan deneye ait data log'larının bir bölümü Tablo 4.7'de verilmiştir.

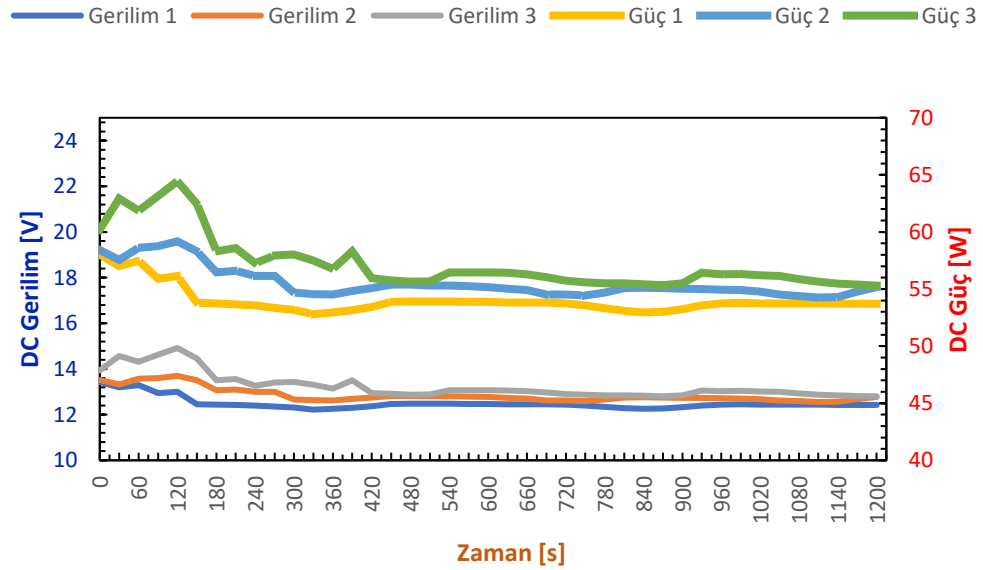
Deneyler sırasında vanalar tam açık ve pompalar kademe 3'te iken sıcak su akış miktarı ortalama 277 ml/s olarak, soğuk su akış miktarı ise ortalama 382 ml/s olarak ölçülmüştür. Pompalar kademe 2'de iken sıcak su akış miktarı ortalama 208 ml/s olarak, soğuk su akış miktarı ortalama 300 ml/s olarak, pompalar kademe 1'de iken sıcak su akış miktarı ortalama 132 ml/s olarak, soğuk su akış miktarı ise ortalama 200 ml/s olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.7: $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ için değişken pompa kademelerinde TEG sistemi veri takibi.

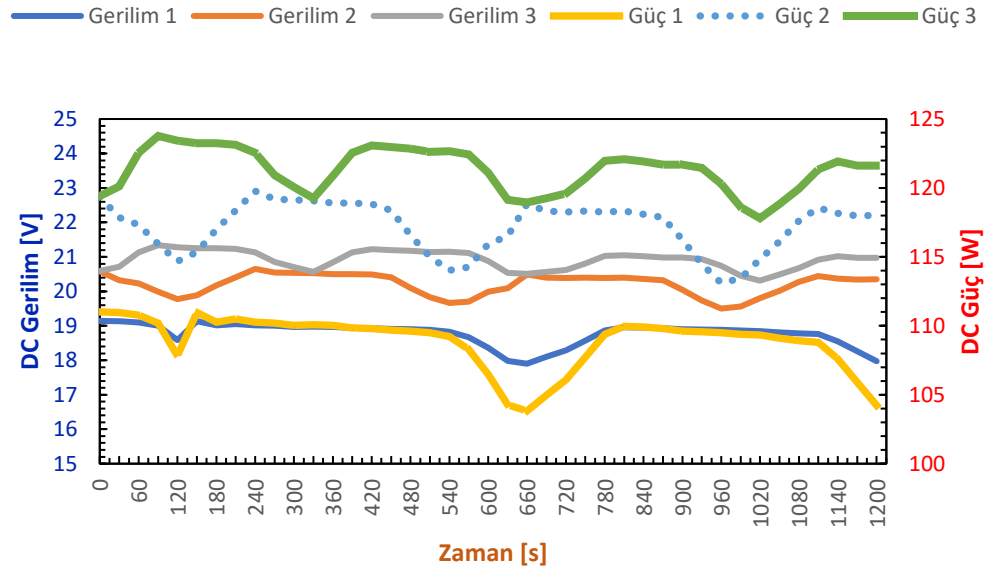
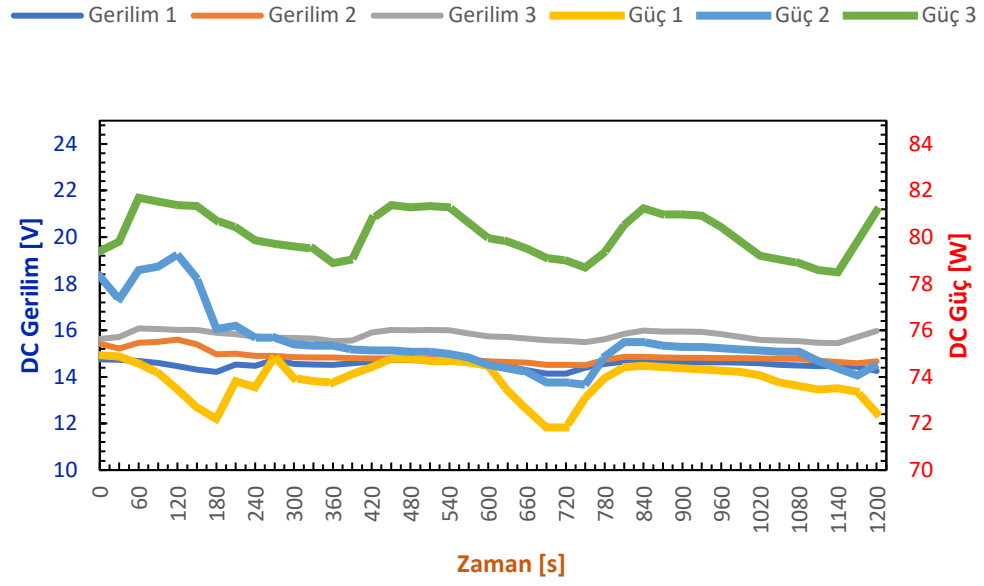
Ölçüm No	Zaman (s)	SIST ($^{\circ}\text{C}$)	SISG ($^{\circ}\text{C}$)	SISD ($^{\circ}\text{C}$)	SOST ($^{\circ}\text{C}$)	SOSG ($^{\circ}\text{C}$)	SOSD ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Tamb ($^{\circ}\text{C}$)	U_{TEG} (V)	U_{SR} (V)	$U_{\text{inv-DC}}$ (V)	$U_{\text{inv-AC}}$ (V)	Sıcak Su Debisi (ml/s)	Soğuk Su Debisi (ml/s)	Pompa Kad. No
1	0	99	100	96	13	11	12	86	21,4	12,41	12,2	11,36	220,8	277	382	3
2	30	100	100	96	13	11	13	87	21,4	12,3	12,2	11,3	222,3	277	382	3
3	60	100	100	96	13	11	13	87	21,4	12,33	12,2	11,27	221,8	277	382	3
4	90	99	99	95	13	11	13	86	21,4	12,27	12,1	11,23	221,3	277	382	3
5	120	98	98	94	13	11	13	85	21,4	12,25	12,2	11,2	222,6	277	382	3
6	150	98	98	94	13	11	13	85	21,4	12,33	12,2	11,3	222,3	277	382	3
7	180	98	98	94	13	11	13	85	21,4	12,25	12,2	11,19	222,5	277	382	3
8	210	98	99	94	14	12	13	84	21,4	12,24	12,1	11,19	222,2	277	382	3
9	240	98	98	94	14	12	13	84	21,4	12,24	12,1	11,19	222,2	277	382	3
10	270	99	100	96	14	12	13	85	21,4	12,23	12,1	11,18	222,3	277	382	3
11	300	99	100	96	14	12	13	85	21,4	12,23	12,1	11,19	222,3	277	382	3
12	0	99	98	93	17	14	16	82	22,1	11,81	11,6	10,94	221,3	227	300	2
13	30	99	98	93	17	14	16	82	22,1	11,81	11,6	10,91	221	227	300	2
14	60	98	98	93	17	14	16	81	22,1	11,4	11,6	10,96	221,3	208	300	2
15	90	98	98	93	17	14	16	81	22,1	11,77	11,6	10,96	221,3	208	300	2
16	120	99	98	93	17	14	16	82	22,1	11,79	11,6	10,93	221,3	208	300	2
17	150	99	98	94	17	14	16	82	22,1	11,82	11,7	10,96	221,6	208	300	2
18	180	99	98	93	17	14	16	82	22,1	11,84	11,7	10,96	221,6	208	300	2
19	210	99	100	95	17	15	16	82	22,1	11,84	11,7	10,95	221,5	208	300	2
20	240	99	100	95	17	15	16	82	22,1	11,84	11,7	10,95	221,5	208	300	2
21	270	100	100	95	18	15	17	82	22,1	11,83	11,7	10,95	221,5	208	300	2
22	300	100	100	95	18	15	17	82	22,1	11,88	11,7	10,95	221,4	208	300	2
23	0	100	100	95	25	21	23	75	22,8	11,58	11,5	10,79	220,3	132	200	1
24	30	100	100	95	25	21	23	75	22,8	11,53	11,4	10,79	220,3	132	200	1
25	60	100	100	95	25	21	23	75	22,8	11,51	11,4	10,79	220,2	132	200	1
26	90	100	100	94	25	21	23	75	22,8	11,53	11,4	10,79	220,3	132	200	1
27	120	100	100	95	25	21	24	75	22,8	11,51	11,4	10,79	220,2	132	200	1
28	150	100	100	94	25	21	24	75	22,8	11,51	11,4	10,79	220,2	132	200	1
29	180	99	98	95	21	17	20	78	22,8	11,51	11,4	10,79	220,2	132	200	1
30	210	100	100	94	21	17	20	79	22,8	11,51	11,5	10,79	220,3	132	200	1
31	240	100	100	94	22	18	20	78	22,8	11,5	11,4	10,77	220,8	132	200	1
32	270	100	99	93	22	18	20	78	22,8	11,47	11,5	10,79	220,3	132	200	1
33	300	100	100	94	22	18	20	78	22,8	11,44	11,38	10,79	219,3	132	200	1

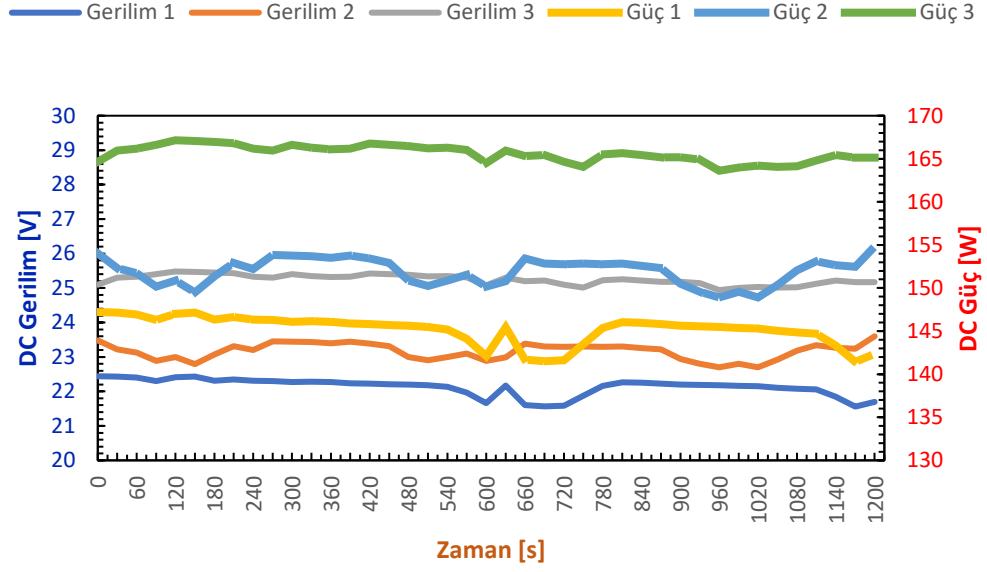
Deneyler, ΔT sıcaklık farkının; 50 °C, 60 °C, 70 °C ve 80 °C değerleri için ayrı ayrı olmak üzere, sıcak ve soğuk su pompasının 3 ayrı akış debi durumu için yapılmış ve elde edilen veriler, bu çalışmanın “Ekler” bölümünde tablolar halinde sunulmuştur. Sunulan tablolarda gerilim ve güç değerlerinde kullanılan veriler, Tablo 4.7’de bir kısmı verilen deneysel veri kayıtlarından alınmıştır. Deneysel verilerden, örnek olması için sadece $\Delta T = 80$ °C için elde edilen veriler, Tablo 4.7’de sunulmuştur.

Oluşturulan tablolardaki veriler değerlendirilerek elde edilen grafiklere göre; sıcak su ve soğuk su debilerindeki artışın, TEG sistemi üzerinde olumlu etki yaptığı gözlenmiştir. TEG sistemindeki pompaların 3 adet hız kademesinde ayrı ayrı olmak üzere, 20 dakikalık süre zarfında yapılan ölçümlerden elde edilen güç-gerilim-zaman grafikleri; $\Delta T = 50$ °C için Şekil 4.14’te, $\Delta T = 60$ °C için Şekil 4.15’te, $\Delta T = 70$ °C için Şekil 4.16’da ve $\Delta T = 80$ °C için Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Grafiklerdeki Gerilim 1 ve Güç 1 değerleri pompaların en düşük hız kademesindeki ölçümleri, Gerilim 3 ve Güç 3 değerleri ise en yüksek hız kademesindeki ölçümleri göstermektedir. Ölçüm sırasında soğuk hattın ısınmasından kaynaklı sıcaklık değişimleri gözlenmiştir.



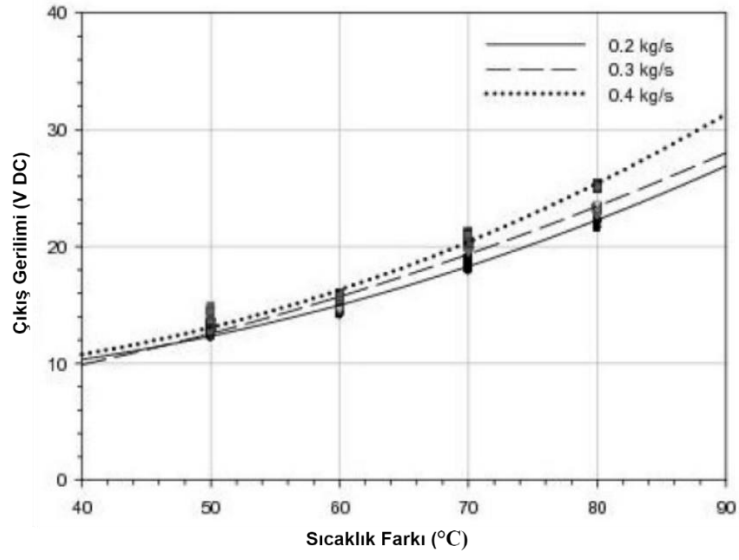
Şekil 4.14: $\Delta T = 50$ °C için zamana bağlı gerilim ve güç grafiği.



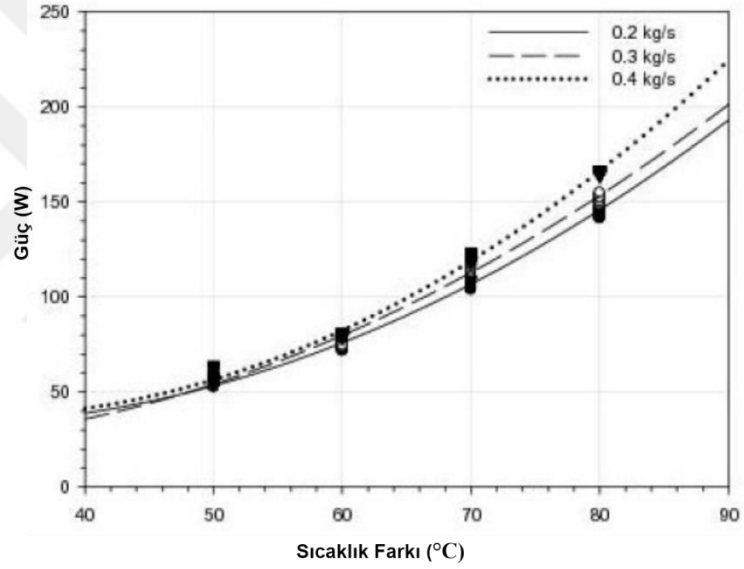


Şekil 4.17: $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ için zamana bağlı gerilim ve güç grafiği.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da sırasıyla üç durum için; yani pompanın 3 farklı hız kademesi için sıcaklık farkına göre elde edilen gerilim ve güç çıkış değerleri görülmektedir. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ölçüm verileri SigmaPlot 12.0 programı yardımıyla doğrusal olmayan regresyon analizinde kullanılarak eğri uyumlama yoluyla her bir kütleli debi için eğriler oluşturulmuştur. Böylece gerilim ve güç eğrileri, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkları arasında elde edilmiştir. Eğri uyumlamada ikinci dereceden polinom regresyon ($y=a_0+a_1x+a_2x^2$ ve $R^2\geq 0.99$), veri setleri için en küçük kareler minimizasyonu yöntemiyle uygulanmıştır. Eğrilerden görüldüğü üzere, TEG sistemi enerji üretimine sıcak ve soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkındaki artışın olumlu etkisi bulunmaktadır. Bununla birlikte, sıcak ve soğuk su pompa kütleli debilerinin artması, hem bakır profiller ile TEG modülleri arasındaki ısı transferinin artmasına hem de böylelikle TEG sistemi enerji üretiminin artmasına neden olmuştur (Hekim ve Cetin 2021).



Şekil 4.18: Farklı kütleli debiler için TEG sistemi çıkış gerilim değerleri (Hekim ve Cetin 2021).



Şekil 4.19: Farklı kütleli debiler için TEG sistemi çıkış gücü değerleri (Hekim ve Cetin 2021).

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ MEVCUT BİR SANTRALE UYARLANMASI

Çalışma kapsamında oluşturulan benzetim modeli ve deney düzeneğinden elde edilen veriler, Denizli’de kurulu ORC tabanlı Jeoden JES’in gerçek zamanlı verilerine uyarlanmıştır. Böylelikle, jeotermal santralin performansındaki iyileştirme imkanları, enerji geri kazanımı açısından araştırılmıştır.

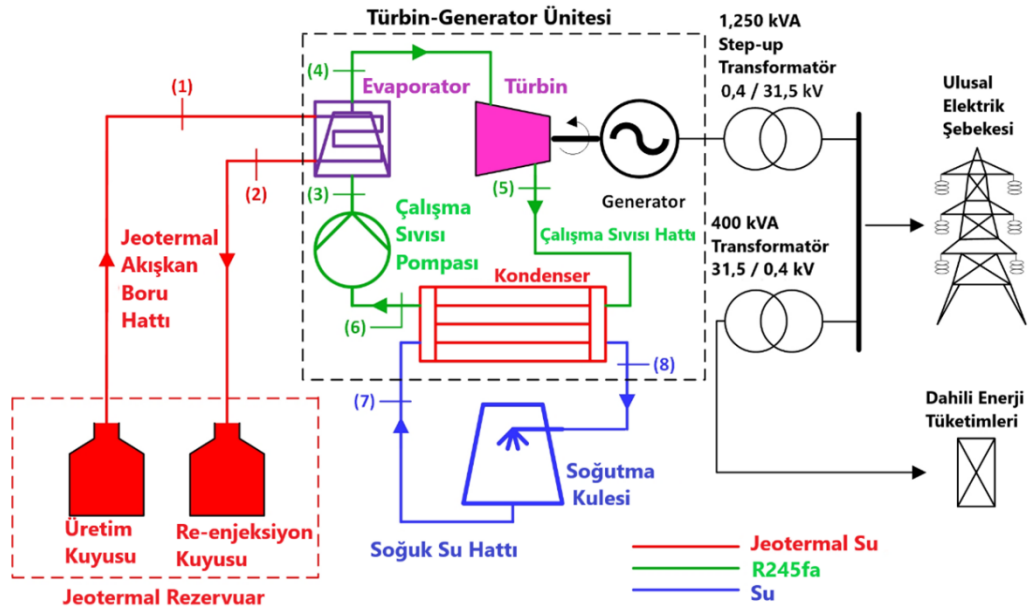
5.1 Jeoden JES

Türkiye’de 104 °C sıcaklıkta binary çevrim ORC ile üretim yapan ilk santral olma özelliği olan Jeoden JES santral alanı yerleşim planı, Şekil 5.1’de görülmektedir. Jeoden JES; ters ozmos sistemi, soğutma suyu havuzu, soğutma kuleleri, yüksek gerilim şalt panosu, dahili tüketiciler için 400 kVA transformatör kabini, soğutma suyu boru hatları, yükseltici transformatör, jeotermal akışkan boru hatları ve türbin-jeneratör modüllerinden oluşmaktadır.

Jeoden binary çevrim jeotermal santralinin şematik yerleşimi Şekil 5.2’de verilmiştir. JES’de üretim kuyusu tarafından sağlanan yaklaşık 104 °C sıcaklıktaki jeotermal akışkandan elektrik enerjisi üretilmektedir. Jeotermal santralde yüksek basınçlı buhar yerine, R245fa (1,1,1,3,3-pentafloropropan) kimyasal bileşimini içeren hidroflorokarbon bazlı organik çalışma sıvısı (ikincil sıvı) kullanılmaktadır. Santral sahasında sadece bir adet üretim kuyusu bulunmakta olup, kuyunun derinliği 2.400 m’dir. Üretim kuyusundan, saniyede yaklaşık olarak 60 kg jeotermal akışkan alınabilir. Santralde, jeotermal akışkandan elektrik enerjisi üretmek için, her biri 280 kW brüt ve 260 kW net güç üretebilen, 3 adet Pratt & Whitney Pure Cycle 280 modülü (türbin-jeneratör grubu) kullanılmaktadır. Modülün teknik özellikleri Tablo 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1: Jeoden JES santral sahası (Cetin ve diğ. 2013).



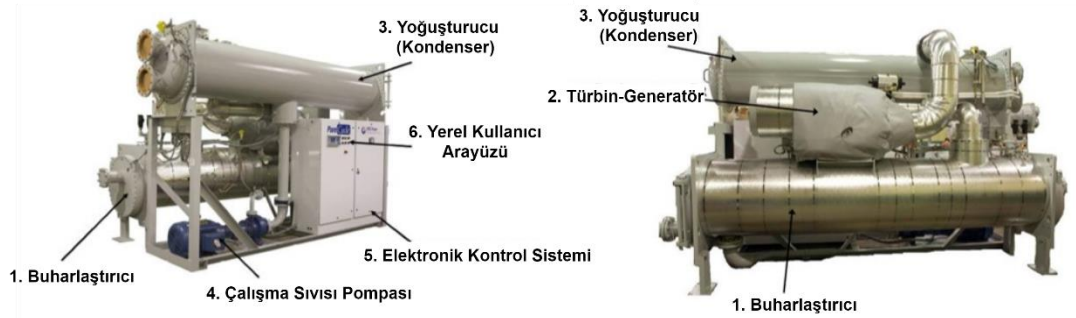
Şekil 5.2: JEODEN JES prensip şeması (Hekim and Cetin 2021).

Tablo 5.1: Pratt&Whitney Pure Cycle 280 modülünün teknik özellikleri (Pratt&Whitney 2009).

Özellikler	Değer
Çalışma Sıvısı	R245fa
Maksimum Brüt Güç, kW	280
Maksimum Net Güç, kW	260
Türbin Tipi	Radyal içeri akış
Generator Tipi	İndüksiyon
Güç Faktörü	> 0,95
Sıcak Akışkan Kaynak Sıcaklık Aralığı °C	80 - 160

Şekil 5.2’de verilen akış şemasına göre; binary çevrimli jeotermal santralde, üretim kuyusundan boru hatları ile (1) Pure Cycle 280 modülüne gelen jeotermal akışkan, evaporator ünitesinden geçip reenjeksiyon kuyusuna gitmeden önce (2) ısını organik çalışma sıvısına (3) aktarır. Aşırı ısıtılmış buhar durumuna (4) sahip organik çalışma sıvısı, türbin-generator grubunun elektrik enerjisi üretmesini sağlar. Bu işlemten sonra elektrik enerjisi üretiminde kullanılan jeotermal akışkan, sürdürülebilir enerji üretimi için reenjeksiyon kuyusuna (2) gönderilir. Bu sırada kondenser ünitesine (5) aşırı ısıtılmış buhar gönderilir. Bir su havuzundan beslenen soğutma kulelerinden sağlanan soğutma suyu, kondenserden (7, 8) geçerek aşırı ısıtılmış buharı sıvı faza (6) yoğunlaştırır. Kondenserde sıvılaştırılan organik akışkan, çalışma sıvısı pompası tarafından evaporatore aktarılır. Bu şekilde, kapalı çevrim enerji üretim süreci tekrar tekrar devam eder (Pratt&Whitney 2009).

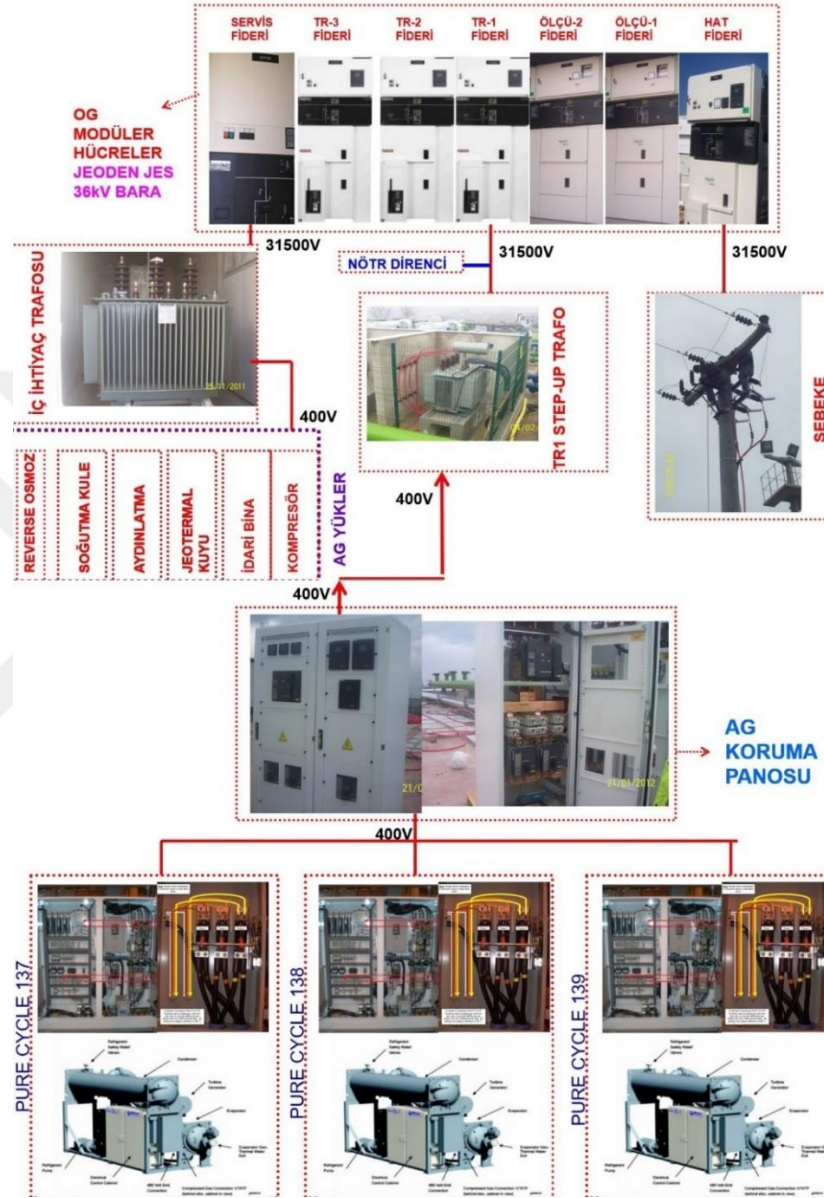
Pure Cycle 280 modülünün, düşük sıcaklıkta (80-160°C) atık ısı geri kazanımı ve güç üretimi uygulamalarında kullanımı yaygındır. Modül, enerji verimliliği artışına ve enerji tasarrufuna katkı sağlarken, emisyonların azaltılmasını da desteklemektedir. Bir buharlaştırıcı, bir türbin-generator ünitesi, bir kondensör, bir pompa ve bir elektronik kontrol sistemine sahiptir. Modülün genel yapısı, Şekil 5.3 'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Pure Cycle 280 modülü genel yapısı (Pratt&Whitney 2009).

Jeoden JES’te üretilen elektrik enerjisinin ulusal enterkonnekte sistemine bağlantı şeması, Şekil 5.4’te verilmiştir. Santral çıkış gerilimi 400 V / 50 Hz AC’dir. Santralde üretilen 400 V / 50 Hz AC elektrik enerjisi, 1.250 kVA step-up (yükseltici) transformatör ile 31.500 V gerilim seviyesine yükseltilmektedir. Santral dahilindeki elektriksel yüklerin beslenmesi için, 400 kVA’lık step-down (düşürücü) bir transformatör kullanılmaktadır. Bu transformatör; yükseltici transformatör çıkışındaki

31500 V gerilimi 400 V AC gerilim seviyesine düşürür. İç ihtiyaç karşılandıktan sonra kalan elektrik enerjisi, havai ve yeraltı orta gerilim enerji nakil hatları üzerinden ulusal enterkonnekte şebekeye dağıtım merkezi fideri vasıtasıyla aktarılır.



Şekil 5.4: Jeoden JES ulusal enterkonnekte bağlantısı.

5.2 Jeotermal Santralin Termodinamik Modeli

Binary çevrim JES'ten bazı veriler elde edilmesine rağmen, R245fa ile çalışan ORC çevriminin termodinamik durum özellikleri tam olarak bilinmemektedir. Bu nedenle, ölçülen verilere ve çeşitli varsayımlara dayanılarak hesaplamalar yapılabilir.

Kararlı hal koşulunda herhangi bir kontrol hacmi için kütle dengesi denklem (5.1) olarak elde edilir:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (5.1)$$

Termodinamiğin birinci yasasına dayanarak, herhangi bir kontrol hacminin enerji analizi, denklem (5.2) ile ifade edilebilir:

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (5.2)$$

Jeotermal santralin her bir bileşenine enerji analizi ve kütle dengesi denklemleri uygulanabilir.

Isı değıştiricisi olan evaporator ve kondenser için sıcaklığa özgü entropi (T-s) ve sıcaklık-ısı transfer diyagramları (T-Q), termodinamik durum özelliklerinin hesaplanmasında yararlanılabilir. Binary çevrimli jeotermal enerji santrali için T-s ve T-Q diyagramları Şekil 5.5'te verilmiştir. T-s diyagramında; üstteki çizgi jeotermal akışkanın davranışını, ortadaki çizgi ise çalışma akışkanının davranışını temsil eder. T-Q diyagramında, ön ısıtma aşamasındaki sıkıştırılmış akışkan R245fa'nın, evaporator için sıcaklığını arttırdığı ve doymuş sıvısına ulaştığı görülmektedir. Çalışma akışkanı saf madde olarak düşünüldüğünde, bu noktadan sonra ısıtıldığında buharlaşma esnasında sıcaklığının sabit kaldığı ve doymuş buhar haline geldiği görülür. Jeotermal akışkanın sıcaklığı ile çalışma akışkanı arasındaki minimum fark, evaporator için temas noktası olarak bilinir ve $\Delta T_{pp,ev}$ olarak gösterilir. Öte yandan, kondenser için, R245fa desatürasyon aşamasında önce doymuş buhar durumuna soğur ve ardından doymuş sıvı durumuna geçer. R245fa ile su arasındaki minimum sıcaklık farkı $\Delta T_{pp,con}$ olarak gösterilir ve kondenser için temas noktası olarak adlandırılır (Hekim ve Cetin 2021).

Evaporator için temas noktası sıcaklığı ve enerji analizi aşağıdaki gibidir:

$$T_{pp,ev} = T_4 + \Delta T_{pp,ev} \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{R245fa} \times (h_4 - h_{4f}) = \varepsilon_{ev} \times \dot{m}_{GB} \times (h_1 - h_{pp,ev}) \quad (5.4)$$

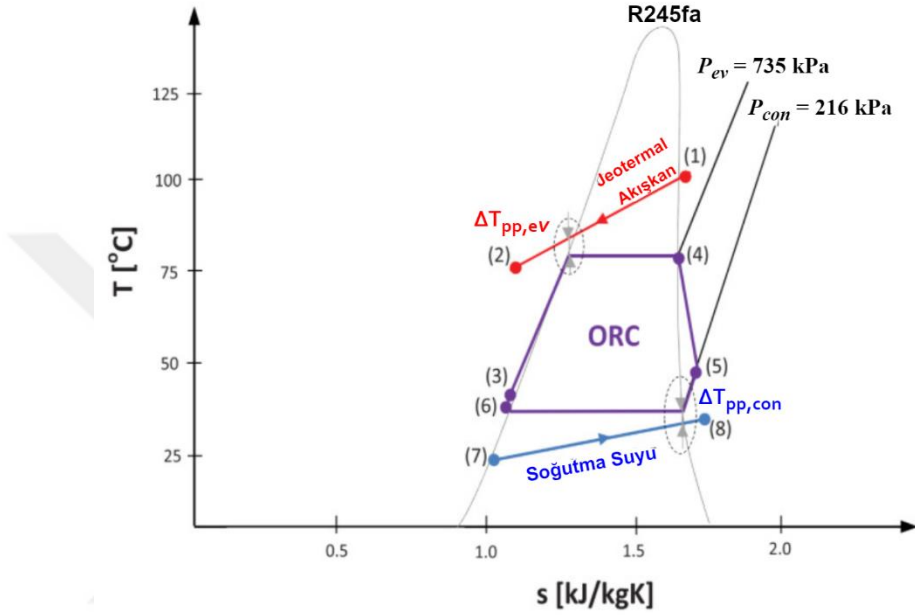
$$\dot{m}_{R245fa} \times (h_{4f} - h_3) = \varepsilon_{ev} \times \dot{m}_{GB} \times (h_{pp,ev} - h_2) \quad (5.5)$$

Benzer şekilde, kondenser için temas noktası sıcaklığı ve enerji analizi aşağıdaki gibi hesaplanır:

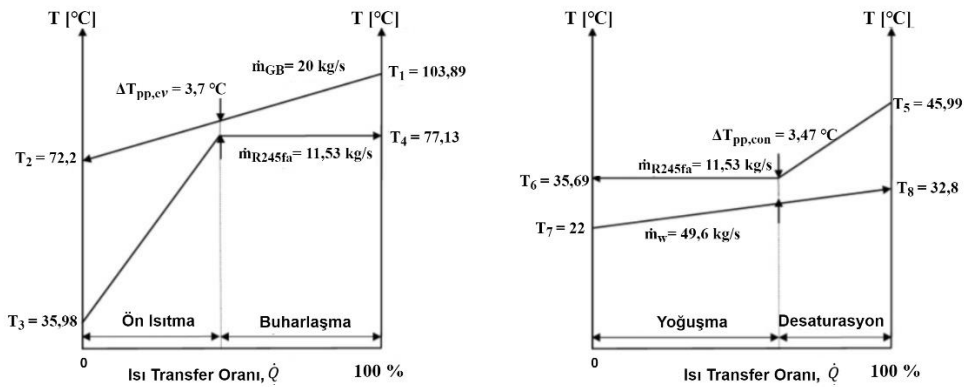
$$T_{pp,con} = T_6 - \Delta T_{pp,con} \quad (5.6)$$

$$\dot{m}_{R245fa} \times (h_5 - h_{6g}) = \varepsilon_{con} \times \dot{m}_{CW} \times (h_8 - h_{pp,con}) \quad (5.7)$$

$$\dot{m}_{R245fa} \times (h_{6g} - h_6) = \varepsilon_{con} \times \dot{m}_{CW} \times (h_{pp,con} - h_7) \quad (5.8)$$



(a)



(b)

Şekil 5.5: (a) Sabit durumda bir çalışma koşulu için jeotermal enerji santrali için sıcaklığa özgü entropi diyagramı. (b) Evaporator ve kondenserin temas noktası sıcaklık hesaplamaları için sıcaklık-ısı transfer hızı diyagramları (Hekim ve Cetin 2021).

5.3 Santral Verilerinin TEG Sistemine Uyarlanması

Gerçek işletme koşulları için bazı veriler, Jeoden JES binary çevrim jeotermal santralinden elde edilmiştir. Kararlı durumdaki çalışma koşulunda, tek bir Pure Cycle 280 ORC modülü için ölçüm yoluyla elde edilen veriler, Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.2: Kararlı durumdaki çalışma koşulları için tek bir Pure Cycle modülünden ölçüm yoluyla elde edilen veriler.

Özellikler	Değerler
Jeotermal akışkanın giriş sıcaklığı, T_1 (°C)	103,89
Jeotermal akışkanın reenjeksiyon sıcaklığı, T_2 (°C)	72,2
Jeotermal akışkanın giriş basıncı, P_1 (kPa)	280
Jeotermal akışkanın reenjeksiyon basıncı, P_2 (kPa)	240
Jeotermal akışkanın kütle akış hızı, $\dot{m}_{GB}$ (kg.s ⁻¹)	20
Soğutma suyu giriş sıcaklığı, T_7 (°C)	22
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı, T_8 (°C)	32,8
Soğutma suyu giriş basıncı, P_7 (kPa)	90
Soğutma suyu çıkış basıncı, P_8 (kPa)	50
Soğutma suyu kütle akış hızı, $\dot{m}_{cw}$ (kg.s ⁻¹)	49,6
Evaporator basıncı, P_{ev} (kPa)	735
Kondenser basıncı, P_{con} (kPa)	216
Brüt güç, $\dot{W}_{gross}$ (kW)	219
Net güç, $\dot{W}_{net}$ (kW)	204

Reenjeksiyon sıcaklığı ve soğutma suyu çıkış sıcaklığı verileri, santralin genel performansının farklı koşullar için değerlendirmesinde yeterli değildir. Jeotermal-termoelektrik hibrit güç üretim sistemi için bu sıcaklık değerleri, TEG'lerin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farklarını ΔT ve jeotermal santralin performansını araştırmak için çok önemlidir. Jeotermal akışkan, analizde su olarak kabul edilmiştir. Jeotermal akışkan ve çalışma akışkanı R245fa'nın termodinamik özelliklerinin belirlenmesi için EES yazılımı kullanılmıştır. Tesisin her bir bileşeni, temas noktası hesaplamaları, evaporator ve kondenser için termodinamik analiz, EES'de yapılmıştır. Reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklığı (T_2) ve soğutma suyunun giriş sıcaklığı T_7 bağımsız parametreleri kullanılarak parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Örnek ORC modülü için, kararlı durum koşulunda, Tablo 5.3'te verilen termodinamik özellikler elde edilmiştir. Ayrıca modülün gerçek çalışma koşulları ve spesifikasyonları ile doğrulama yapılarak, ORC'nin diğer bazı verileri Tablo 5.4'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Evaporator ve kondenserin verimleri sırasıyla 0,92 ve

1 olarak kabul edilmiştir (Boyd ve DiPippo 2012). Türbine bağlı generator-alternatör çiftinin veriminin 0,96 olduğu varsayılmıştır (Pratt&Whitney 2009).

Tablo 5.3: Santralin termodinamik özellikleri.

Sıra No	Akışkan	T (°C)	P (kPa)	$\dot{m}$ (kg.s ⁻¹)	h (kJ.kg ⁻¹)	s (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
1	Jeotermal akışkan	103,9	280	20	435,6	1,351
2	Jeotermal akışkan	72,2	240	20	302,4	0,9816
3	R245fa	35,98	735	11,53	247,3	1,161
4	R245fa	77,13	735	11,53	459,8	1,778
5	R245fa	45,99	216	11,53	440,8	1,788
6	R245fa	35,69	216	11,53	246,7	1,16
7	Su	22	90	49,6	92,28	0,3246
8	Su	32,8	50	49,6	137,4	0,475

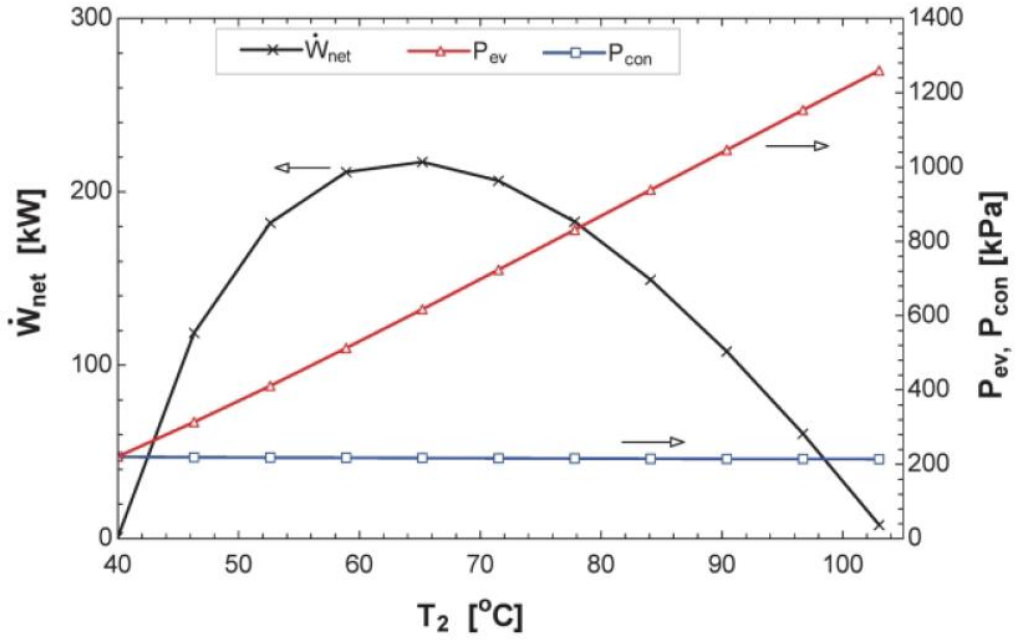
Tablo 5.4: Termodinamik modellemeye dayanan ORC'nin hesaplanmış verileri.

Özellikler	Değerler
Evaporator için temas noktası sıcaklık farkı, $\Delta T_{pp,ev}$ (°C)	3,70
Kondenser için temas noktası sıcaklık farkı, $\Delta T_{pp,con}$ (°C)	3,47
Türbin izantropik verimi, $\eta_{T,s}$	0,85
Pompa izantropik verimi, $\eta_{P,s}$	0,75

Soğutma suyunun kondensere giriş sıcaklığı ($T7$), esasen ortam sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle, aylık ortam sıcaklığı değerleri, Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sisteminin (PVGIS), 2006-2016 yılları için 45 santralin bulunduğu bir lokasyondaki (37° 54' 57" K / 28° 52' 48" E) tipik meteorolojik veri tabanından elde edilmiştir (PVGIS 2021). Ocak ve Temmuz aylarında minimum ve maksimum ortam sıcaklığı değerleri sırasıyla; 6,08 °C ve 30,83 °C'dir. Bu nedenle, parametrik analizde soğutma suyunun giriş sıcaklık değerleri ($T7$), 0 °C ile 40 °C arasında değişmektedir. Ayrıca, jeotermal akışkan sıcaklığının 103,89 °C'de sabit olduğu varsayıldığından $T2$ değerleri, 40 °C ile 103,89 °C arasında alınmıştır. Soğutma suyunun çıkış sıcaklık değerleri ($T8$), soğutma suyunun giriş sıcaklığının ($T7$) üzerinde kabul edilir.

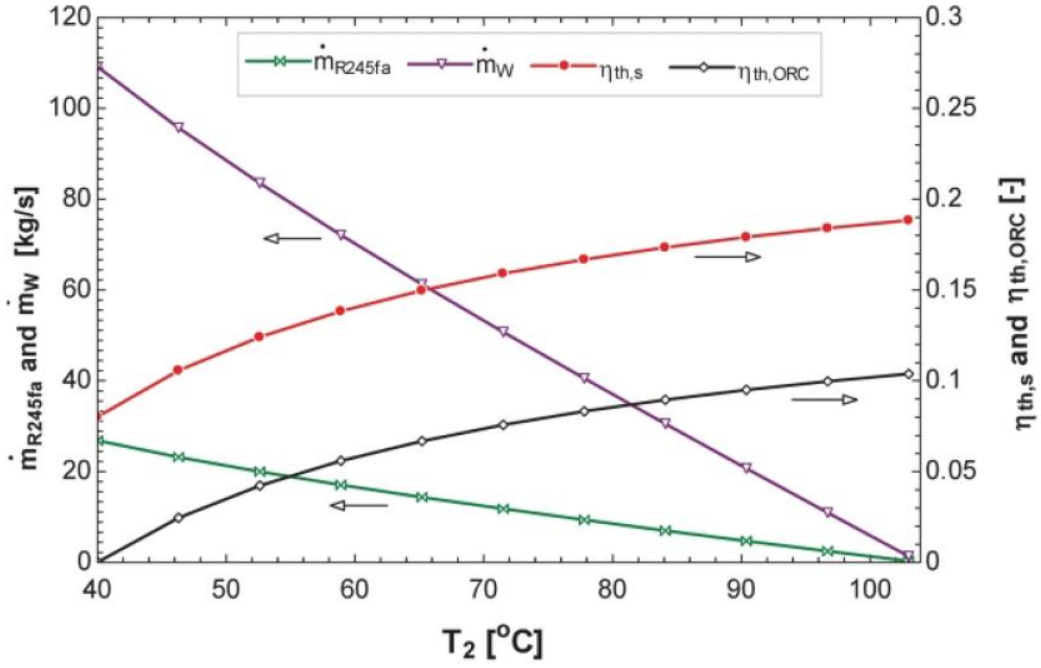
Şekil 5.6 ve Şekil 5.7; jeotermal akışkanın $T7$ ve $T8$ değerleri 22 °C'de ve kütle akış hızı 20 kg/s'de sabit tutulurken, $T2$ değerlerine sahip parametrelerin 40 °C'den 103,89 °C'ye kadar değişimlerini göstermektedir. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi net güç,

63,98 °C'de 217,6 kW'lık maksimum değerine ulaşmakta ve bu noktadan itibaren jeotermal kaynaktan ($\dot{Q}_{in}$) evaporatore termal enerji girişi olduğundan, T_2 'deki artışla birlikte güç değeri düşmekte, böylelikle R245fa'ya aktarılan termal enerji de daha az olmaktadır. Ayrıca, maksimum net güce karşılık gelen evaporator ve kondenser basınç değerleri sırasıyla; 596,6 kPa ve 216,8 kPa olmaktadır. Evaporator basıncı T_2 'deki yükselişle birlikte artmasına rağmen, T_7 değerinin sabit 22 °C olması nedeniyle, kondenser basıncı hemen hemen aynı kalmaktadır (Hekim ve Cetin 2021).



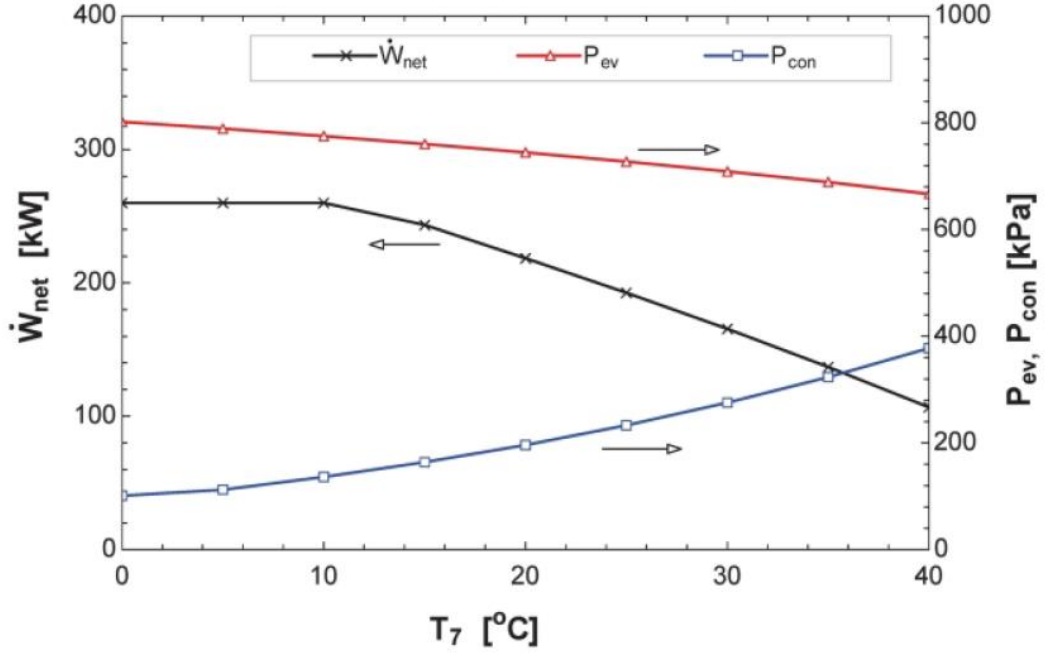
Şekil 5.6: Reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklık değerine bağlı olarak; net güç ile evaporator ve kondenser basınç değerleri (Hekim ve Cetin 2021).

Şekil 5.7'de, R245fa'nın ve soğutma suyunun kütledebilerinin T_2 'deki artışla beraber azaldığı görülmektedir. Carnot ve ısı verimlilik değerleri, daha yüksek T_2 ile artar; çünkü jeotermal kaynaktan ısı enerji girişi ($\dot{Q}_{in}$) ve kondensere ısı enerji çıkışı ($\dot{Q}_{out}$) aynı anda azalır. ORC'den elde edilen maksimum net güç için R245fa kütle debisi 14,89 kg/s ve soğutma suyu debisi 63,61 kg/s olarak hesaplanmıştır. Carnot ve ısı verim değerleri, 0,1477 ve 0,0638 olarak elde edilmiştir.

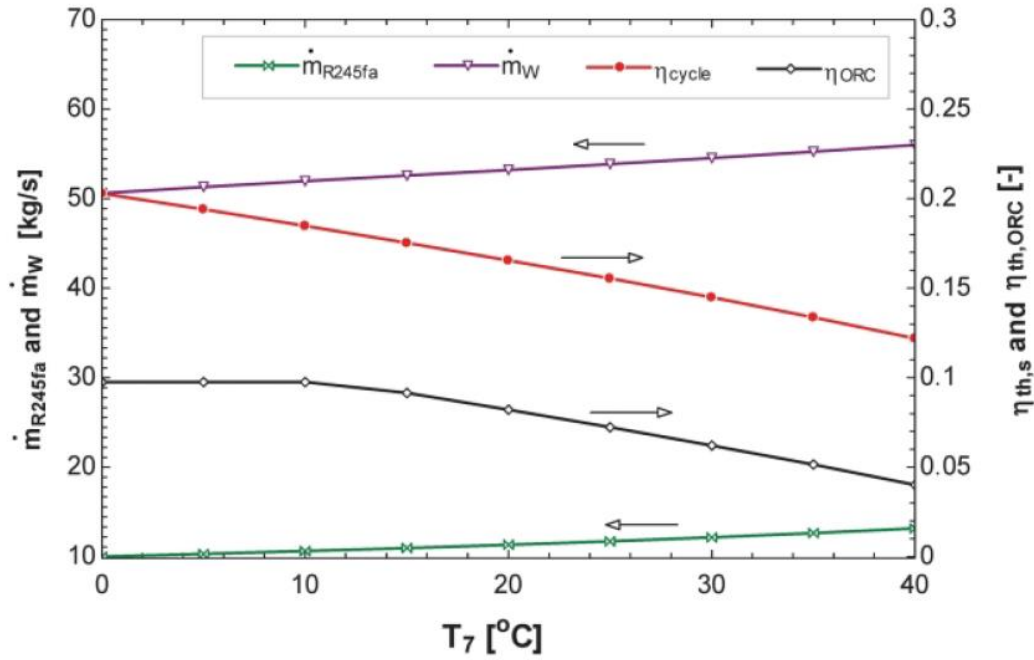


Şekil 5.7: Reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklık değerine bağlı olarak; R245fa ve soğutma suyunun kütle akış hızları ile Carnot ve termal verim değerlerindeki değişimler (Hekim ve Cetin 2021).

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9; T_1 , T_2 ve jeotermal akışkanın kütle debisi sırasıyla 103,89 °C, 72 °C ve 20 kg/s’de sabit tutulurken, soğutma suyu giriş sıcaklığının (T_7) 0 °C - 40 °C arasındaki değerleri için, parametre değişimlerini vermektedir. Burada T_8 , T_7 ’den 10 °C daha yüksek olarak kabul edilmiştir. Şekil 5.8’de gösterildiği gibi, T_7 minimum değerinde iken net güç, 260 kW’lık maksimum değere ulaşmaktadır. T_7 değerinin artması ile birlikte; R245fa’dan kondenser yoluyla soğutma suyuna termal enerji çıkışının azalması nedeniyle, net güç, T_2 ’yi azaltmaktadır. Bu durum, türbinin çıkış koşullarını (basınç ve sıcaklık) belirleyen kondenser basıncının artmasına neden olur. Kondenser basıncı artmasına rağmen, ORC’nin net güç çıkışı azalır. ORC net güç çıkışı, soğutma suyu giriş sıcaklığının 11,6 °C olmasıyla birlikte 260 kW değerine ulaşır. Şekil 5.9’da, R245fa ile soğutma suyu kütleli akış oranlarının, T_7 ’deki artışla beraber yükseldiği görülmektedir. Ancak, Carnot ve ısı verim değerleri, T_7 ’nin artması ile azalmaktadır. ORC maksimum güç değerine ulaştığında, R245fa ile soğutma suyunun kütle akış hızları, minimum değerlerdedir. Bu değerler sırasıyla; 10,72 kg/s ve 52,16 kg/s şeklindedir (Hekim ve Cetin 2021).



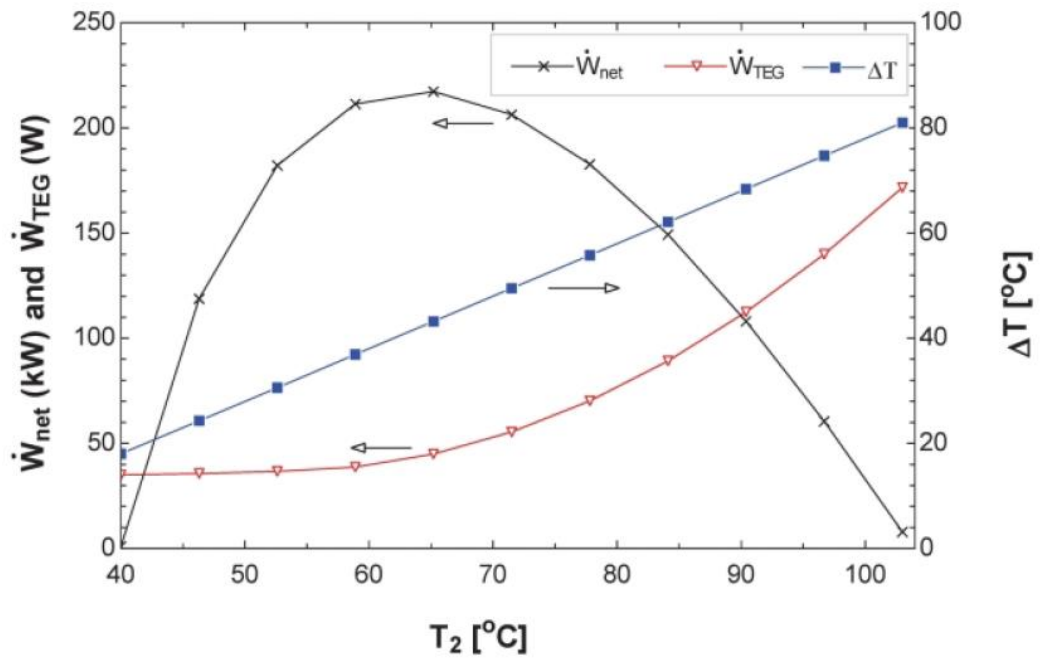
Şekil 5.8: Soğutma suyunun değişken giriş sıcaklık değerine bağlı olarak net güç ile evaporator ve kondenser basınç değerleri (Hekim ve Cetin 2021).



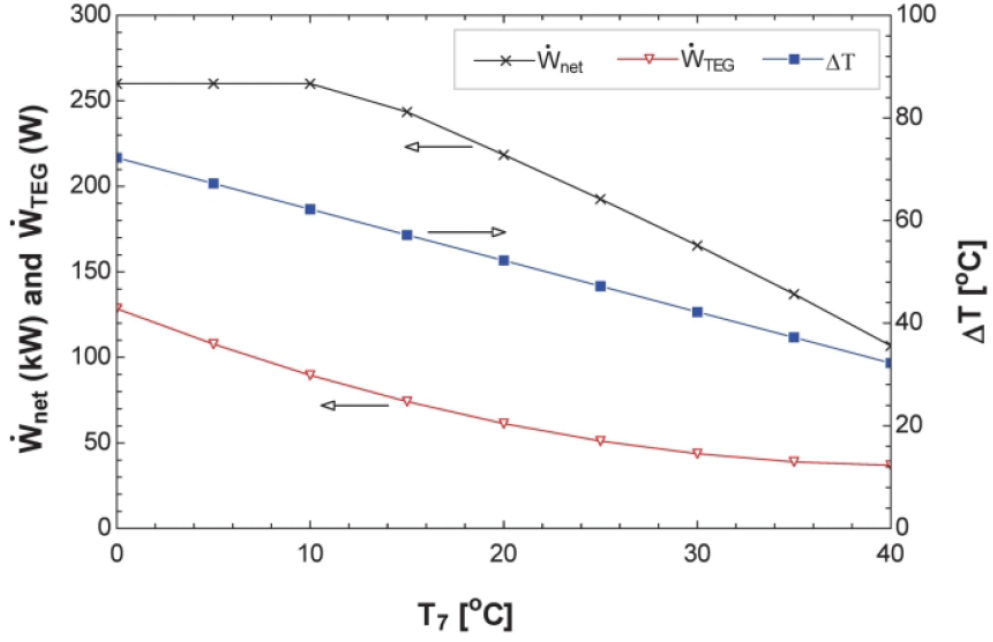
Şekil 5.9: Soğutma suyunun değişken giriş sıcaklık değerine bağlı olarak; R245fa ve soğutma suyunun kütle akış hızları ile Carnot ve termal verim değerlerindeki değişimler Hekim ve Cetin 2021).

Deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, ORC JES için TEG'lerin kullanımı araştırılmıştır. Isı transferi olgusu açısından, uzun ve geniş yerleşimli TEG'lerin boyutları dikkate alınarak, jeotermal/soğutma suyu boru hatları boyunca sıcaklık düşüşlerinin ve sıcak/soğuk taraflarındaki yüzey sıcaklıklarının

belirlenmesi çok önemlidir. Ancak bu çalışmada TEG'ler, düşük güç kapasitelerinde çalıştırılmıştır. Bu nedenle, basitlik açısından, jeotermal/soğutma suyu boru hatları boyunca sıcaklık düşüşleri dikkate alınmamış ve TEG'lerin sıcak/soğuk taraflarındaki yüzey sıcaklıklarının TEG'lerin monte edildiği boru hatları boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. TEG'lerin güç çıkışının, reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklığı (T_2) ve soğutma suyunun giriş sıcaklığı (T_7) ile değişimi, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de gösterilmiştir. TEG'lerin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkları da, yine aynı şekillerde verilmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi, T_2 'deki artışla birlikte TEG'lerin güç çıkışı artmaktadır. Ancak maksimum değere ulaştıktan sonra, daha yüksek T_2 değerleri için, ORC'nin net gücü azalmaktadır. ORC'nin 217,6 kW olan maksimum net güç çıkışı durumu için TEG'ler, bu duruma karşılık gelen 41,98 °C sıcaklık farkında 43,42 W güç üretebilmektedir. Bu nedenle, bu tür bir hibrit enerji sisteminden daha fazla enerji üretebilmek için, TEG'lerin daha düşük güç üretecek şekilde kullanılması gerekmektedir.



Şekil 5.10: Net güç, TEG'lerin çıkış gücü ve sıcaklık farkının, reenjekte edilen jeotermal akışkanın giriş sıcaklığı ile değişimi (Hekim ve Cetin 2021).



Şekil 5.11: Net güç, TEG'lerin çıkış gücü ve sıcaklık farkının, soğutma suyu giriş sıcaklığı ile değişimi (Hekim ve Cetin 2021).

Şekil 5.11'de, T_7 'deki değişimle birlikte TEG'lerin güç çıkışında meydana gelen değişim verilmiştir. Daha yüksek T_7 değerleri için, hem ORC net gücü hem de TEG'lerin güç çıkışı düşmektedir. ORC'nin maksimum net güç çıkışı için TEG'ler, 60,6 °C sıcaklık farkında 84,29 W enerji üretebilmektedir. Bu nedenle, TEG'lerin daha düşük T_7 değerleri için santralde kullanılması düşünülebilir. Sonuç olarak TEG'ler, jeotermal akışkandan ORC'ye enerji girişini ($\dot{Q}_{in}$) etkilediği için, TEG sayısının artırılmasının ve daha yüksek sıcaklık farklılıklarının, hibrit enerji sisteminden daha yüksek net güç eldesi anlamına gelmediğini belirtmek gerekir (Hekim ve Cetin 2021). Ayrıca, TEG'lerin soğuk taraf sıcaklığı (soğutma suyunun giriş sıcaklığı), esas olarak ortam sıcaklığına bağlı olan kondenser sıcaklığı ile sınırlıdır. Bu nedenle TEG kullanımı, net güç çıkışı üzerinde olumlu ve olumsuz birtakım etkilere neden olabilir. Özetle; herhangi bir atık ısı geri kazanım sisteminde kullanılacak TEG'lerin optimum sayılarını ve dizilim konfigürasyonlarını belirlemek için, eşzamanlı bir tasarım yaklaşımı düşünülmesi yerinde olacaktır.

6. BULGULAR

Çalışmanın bu bölümünde, JES-TEG hibrit enerji üretim sisteminden elde edilen verilerin genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. Gerek benzetim sonuçları gerekse deneysel çalışma neticesinde ulaşılan veriler, “Teknik Bulgular” alt başlığı altında incelenmiştir. Burada; özellikle TEG konfigürasyonları ve bu konfigürasyonlarla ortaya çıkan elektriksel bulgular, hem sistemden elde edilen enerji miktarı, hem de sistemin teknik anlamda sağlıklı bir şekilde işletilebilmesi temelinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, yine sistemin teknik açıdan sorunsuz bir şekilde işletilebilmesi noktasında yapılabilecek ilave ve düzenlemeler ile ORC sistemi çıkış gücünü olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde yapılan TEG işletme detayları, bu bölümde irdelenmiştir. JES-TEG hibrit enerji üretim sisteminin finansal durumu ve işletmenin sürdürülebilirliği hususları ise, ikinci bir alt bölüm olan, “Ekonomik Bulgular ve İşletme Sürekliliği” başlığı altında ele alınmıştır. Bu bölümde ise; sistemin kurulum maliyeti, işletme ekonomisi, amortisman süresi ve işletme ömrü gibi kritik noktalar, detaylı bir şekilde analiz edilmeye çalışılmıştır.

6.1 Teknik Bulgular

JES-TEG hibrit enerji üretim sisteminde hedeflenen; ORC tabanlı JES santral çıkış gücünde bir azalma olmaksızın, reenjekte edilen jeotermal akışkanın atık ısısının en verimli şekilde TEG’lerde elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Bu bağlamda yapılması gereken, en verimli elektrik enerjisi üretimi yapabilecek TEG konfigürasyonunun belirlenmesidir. Tablo 3.3’e göre, 8 adet TEG modülünün seri olarak bağlanması, meydana gelecek bu seri koldan 6 adedinin de paralellenmesi neticesinde oluşacak konfigürasyonun, %2,59 verim ile elektrik enerjisi üretmesi ön görülmüştür. Ancak, bu konfigürasyonun sahip olduğu 19,69 V’luk DC gerilim değeri, TEG sistem çıkış geriliminin ani olarak düşmesi nedeniyle invertörü devreye alamamış, bu nedenle verimlilik açısından ikinci sırada yer alan diğer konfigürasyona geçilmiştir. Bu konfigürasyonda 12 adet TEG modülü seri olarak bağlanmış, bu seri koldan da toplamda 4 adet üretilerek kolların tamamı paralellenmiştir. Elde edilen konfigürasyon; %2,44’lük elektriksel dönüşüm verimine ve 19,95 V DC çıkış gerilimine sahip olarak, sistemde yer alan invertörü başarı ile devreye alabilmiştir. Bu

noktada, hibrit sistemin sağlıklı bir şekilde işletilebilmesi adına öncelik, TEG sistemi çıkış gerilimine verilmiştir. Ancak yine deneysel çalışma süresince, sıcak su hat debisinin valf üzerinden manuel olarak artırılmasının, TEG sistem çıkış gerilimini de arttırdığı görülmüştür. Geline nokta itibariyle; TEG sistem çıkışın geriliminin, invertörün devreye alınması anında dinamik olarak TEG DC hat gerilimini izleyen ve gerilimin düşmesi ile birlikte otomatik olarak sıcak su debisini arttıracak otomatik bir valf ile ayarlanması olası görülmektedir. Yanı sıra, sisteme özel bir DC/DC konverterin de otomatik valfle veri alış-verişi yapacak şekilde tasarlanması, DC hat geriliminin stabil hale gelmesini sağlayacaktır.

Deneysel çalışma esnasında, soğuk su hat sıcaklığının 15 °C'ye kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, sıcak su barındıran bakır profilden soğuk su içeren bakır profillere doğru ısı transferinin gerçekleştiğini göstermektedir. Bu noktada, TEG modüllerinin her iki yüzeyleri arasındaki ΔT sıcaklık farkını düşürerek TEG modüllerinin verimli bir şekilde çalışmasını engelleyen bu ısı transferinin azaltılmasına yönelik olarak, TEG modüllerinin işgal etmediği bakır profil yüzeylerinin ısı transferini engelleyecek şekilde yalıtım malzemesi ile kaplanması yoluna gidilebilir. Ancak, gerçekleştirilen JES-TEG hibrit enerji üretim modeli atölyede el yapımı olarak hayata geçirildiğinden, fabrikasyon imalat esnasında profesyonel ekipmanla gerçekleştirilmesi gereken kaplama işlemi de uygulanamamıştır.

Şekil 4.14 – Şekil 4.17’de elde edilen deneysel çalışma sonuçları, TEG modüllerinin her iki yüzeyleri arasındaki ΔT sıcaklık farkının artması halinde, TEG sistemi çıkış gerilimin de artacağını göstermektedir. Benzer durum, kütsel debi artışlarında da kendini göstermektedir (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19). Her iki durumdan çıkarılacak sonuç, her ne kadar, ΔT sıcaklık farkının ve kütsel debilerin arttırılmasının, TEG sistemi çıkış gerilim ve güç değerlerini ve de dolayısıyla sistem verimini arttıracakını gösterse de, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’e göre bu durum, tahmin edildiği şekilde gerçekleşmemiştir. Zira, ilgili şekillere göre; hem reenjekte edilen jeotermal akışkanın (T_2), hem de soğutma suyunun sıcaklığı (T_7) arttıkça, JES ORC çıkış gücü düşmektedir. Oysa bu çalışmada arzulanan, ORC çıkış gücünde azalma olmaksızın, reenjekte edilen jeotermal akışkanın atık ısını kullanıp elektrik enerjisi üreterek enerji geri kazanımının sağlanması olduğundan, gelinen nokta itibariyle TEG

modüllerinin düşük güç değerlerinde çalıştırılmalarının uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

6.2 Ekonomik Bulgular ve İşletme Sürekliliği

Önceki bölümlerde tasarım ve kurulum aşamaları detaylı bir şekilde anlatılan TEG sisteminin, ekonomik ve işletme şartları ile ilgili verileri de önem arz etmektedir. TEG sisteminin yatırım maliyeti, yatırımın geri dönüş süresi, sistemin çalışma ömrü ve işletme ekonomisi gibi önemli ekonomik bulguların bilinmesi ile bu türden sistemlerin kurulumuna yönelik daha sağlıklı planlama yapılması mümkün olabilir.

TEG sistemini oluşturan donanımdan; TEG modülleri 2018 yılı Eylül ayında Kryotherm (Rusya) firmasından, sirkülasyon sistemi 2018 yılı Kasım ayında Isıger (Türkiye) firmasından temin edilmiş ve sistemin montajı yapılmıştır. Ardından, sistemdeki elektriksel ve mekanik verilerin takip ve kontrolünü sağlamak amacıyla PVKS sistem malzemeleri (sensörler ve pano-invertör grubu), 2019 yılı Nisan ayında Isıger (Türkiye) firmasından temin edilmiş ve tüm sistemin kurulumu tamamlanmıştır. Sistemin maliyet hesabı; TEG modüllerinin temini, su sirkülasyon sisteminin temini ve kurulumu, PVKS ekipmanı temini ve kurulumu şeklinde üç aşamada değerlendirilmiştir. Bu aşamaların maliyet verileri, satın almanın gerçekleştiği dönemdeki Türk lirası (₺) ve Amerikan doları (\$) kuru üzerinden, Tablo 6.1’de sunulmuştur. Gösterge niteliğindeki Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB) verilerine göre; TEG modüllerinin fatura tarihi olan 17 Eylül 2018 tarihinde Amerikan doları alış fiyatı 6,2608 TL, sirkülasyon sisteminin fatura tarihi olan 19 Kasım 2018 tarihinde Amerikan doları alış fiyatı 5,3231 TL, PVKS fatura tarihleri olan 18 Nisan 2019 ve 22 Nisan 2019 tarihlerinde Amerikan doları ortalama alış fiyatı 5,8173 TL’dir (TCMB 2021). Proje kapsamında PVKS için ihtiyaç duyulan ve Tablo 6.2’de listelenen ekipman mevcut laboratuvar imkanları dahilinde kullanıldığından ve geçmişe yönelik reel fiyat bilgisi bulunmadığından, maliyet hesabı dışında tutulmuştur.

Tablo 6.1: TEG sistemi kurulum maliyeti.

Ekipman	Maliyet (₺, KDV dahil)	Maliyet (\$, KDV dahil)
TEG modülü (50 adet)	14.160,00	2.261,69
Su sirkülasyon sistemi	14.160,00	2.660,10
PVKS	6.560,80	1.127,80
TOPLAM	34.880,80	6.049,59

Tablo 6.2: Mevcut laboratuvar imkanları dahilinde kullanılan ekipman.

Cihaz Tipi / Modeli	Adet
DC Güç Kaynağı / LOGO!	1
PLC / Siemens S7 200 CPU 224	1
Analog Giriş Modülü / Siemens EM 235	4
Sıcaklık Gerilim Konvertörü / Elimko E-700	6
PC/PPI Kablo / Siemens	1

TEG sistemi kurulum maliyetinin geri dönüş süresinin hesaplamasında; ekipman maliyetlerinin yanında, JES'te elde edilen ΔT sıcaklık farkına bağlı olarak üretilen elektriksel güç ve kWh başına elde edilen gelir de önemli parametreler arasında yer almaktadır. TEG'lerde maliyet analizi yapabilmek için, TEG'in Amerikan doları cinsinden maliyeti ve üretilen enerjinin satış fiyatının (\$/kWh) bilinmesi gerekir. TEG sistemi JES'e bağlı bir elektrik santrali olduğu için, TEG sisteminde üretilen enerji bedelinin hesaplanmasında Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) belgeli üretim tesisleri için uygulanacak YEK Destekleme Mekanizması (YEKDEM) alım ve yerli katkı fiyatları, 01 Temmuz 2021 tarihinden itibaren 0,54 ₺/kWh olarak belirlenmiştir (EPDK 2021). Bu nedenle, enerji satış fiyatı kWh başına 0,54 ₺ gelir varsayılarak, ΔT 'ye bağlı geri dönüş süresi hesaplanabilir. ΔT değerinde artış gerçekleşmesi halinde, TEG sistemi kurulum maliyeti değişmeyeceğinden, TEG sistemi geri dönüş süresinin de azalması beklenir (Gunay ve diğ. 2020).

TEG sisteminde kullanılan her bir TEG modülün gücü katalog değerlerine göre 3,2 W'tır. 12 adet seri kol ve bunlara paralel bağlı 4 koldan oluşan TEG sisteminden; $\Delta T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve ısı verimlilik %2,44 iken, 153,6 W enerji üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

TEG sistemi toplam maliyeti (M) Tablo 6.1'de görüldüğü gibi, \$6.049,59'dur.

JES'ler, mevsimsel ve ekonomik şartlardan etkilenmeden yıl boyunca üretim yapabilmektedir. $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ için TEG sistemi çıkış gücü 0,1536 kW olduğundan, TEG sistemi yıllık geliri (G), aşağıda görüldüğü gibi hesaplanır.

$$G = P_o \times t \times g \times f \quad (6.1)$$

Eşitlik (6.1)'e göre; yılda 365 gün ve günde 24 saat çalışması halinde, TEG sistemi yıllık geliri, ₺726,58 TL olarak hesaplanır. 3 Aralık 2021 tarihinde \$1 = ₺13,6801 olduğuna göre (TCMB 2021), TEG sistemi yıllık geliri de, \$53,11 olacaktır. Bu durumda TEG sistemi yatırımı geri dönüş süresi (T), Eşitlik (6.2)'ye göre, 113,90 yıl şeklinde hesaplanır.

$$T = M / G \quad (6.2)$$

TEG sistem maliyetiyle ilgili yapılan bir çalışmada, 20 m sıcak boru üzerine 40 adet 4 bloklu TEG modülü yerleştirilerek tasarlanan, $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ için her bir TEG modülünden 7,6 W enerji üretilen, 6 kW'lık bir TEG santralının geri dönüş süresi, 7,1 yıl olarak hesaplanmıştır (Gunay ve diğ. 2020). Bir başka çalışmada, sıcak ve soğuk akışkan arasında $\Delta T = 152\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lık bir sıcaklık farkı ile oluşturulan TEG sisteminin maliyetinin ise, 13.900 \$/kW civarında olacağı tahmin edilmiş ve TEG santral yatırımı geri dönüş süresi de, 8,4 yıl olarak hesaplanmıştır. Toplam maliyet, termoelektrik blokların maliyeti ile şebekeye bağlı invertörün maliyetinden oluşturulmuştur (Li ve diğ. 2021). Bu örnek çalışmalarda geri dönüş sürelerinin düşük olmasının nedenleri olarak; santral maliyetlerinin neredeyse TEG modülleri maliyetlerinden oluşturulması, TEG modül maliyetlerinin düşük olması, TEG modülü verimlerinin, elektrik enerjisi birim satış fiyatının, TEG santral gücünün ve ΔT değerinin görece yüksek olması gösterilebilir.

TEG sistemi hem jeotermal tesiste hem de laboratuvar ortamında çalışacak şekilde tasarlanmış, sistem verilerinin takip ve kontrol edilmesi amacıyla PVKS sistemi oluşturulmuştur. Bu nedenle, örnek çalışmalara göre kurulum maliyeti artmaktadır. Yalnızca TEG modüllerine yapılan harcama maliyeti dikkate alınarak geri dönüş süresi hesaplanacak olursa; Tablo 6.1 ve Eşitlik (6.2)'ye göre bu süre, 42,58 yıl olarak hesaplanır.

Bu çalışmada kurulan TEG sisteminin kapasitesi artırılacak olursa, Tablo 6.1'deki toplam maliyeti oluşturan PVKS ve sirkülasyon sistemi ile ilgili maliyetler, kapasite artırım maliyetlerini etkilemeyecektir. Bu durumda kapasite artırımı maliyetlerinin; ilave edilecek TEG modülü maliyetlerinden, bakır kutu profil maliyetlerinden ve sıcak su izolasyon maliyetlerinden oluşması beklenir. Yıllık enerji üretim miktarının ise, kapasite artırım oranında artması beklenir. Örneğin; TEG sistem gücünü 5 katına çıkarmak için TEG modül ilavesi yapılarak, TEG sistemi çıkış gücü 768 W değerine yükseltirirse, Eşitlik (6.1)'e göre yıllık gelir, ₺3.632,94 (\$265,56) olacaktır. Kapasite artırımı sonucunda toplam maliyet, yaklaşık \$12.000 (\$11.000 TEG modülleri, \$1.000 bakır kutu profiller ve izolasyon malzemesi) olarak tahmin edilmiştir. Bu durumda, Eşitlik (6.2)'ye göre TEG sistem yatırımı geri dönüş süresi de, 45 yıl olacaktır.

Yatırım geri dönüş süreleri, tüm enerji sistemleri için elbette önemli bir husustur. Sunulan bu çalışmada hesaplanan yatırım geri dönüş süreleri, oldukça yüksek görülmektedir. Ancak, alternatif enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminin önemli olduğu günümüzde; yapılacak ar-ge faaliyetleri, ekipman üretim proseslerinde meydana gelebilecek maliyet düşürücü birtakım gelişmeler, yüksek miktarlı ekipman siparişi halinde elde edilebilecek kayda değer finansal avantajlar, seri üretim neticesindeki olası maliyet düşüşleri, Devlet teşvikleri v.b. hususlarla birlikte, tesis yatırım geri dönüş sürelerinde de önemli iyileşmelerin olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle; yapılan bu çalışmanın, ekonomik tabanlı olumsuzluklarından ziyade, bilimsel ve teknik sahada yapılabilecek çalışmalara sağlayabileceği olası katkılar bağlamında değerlendirilmesi yerinde olacaktır.

Bir TEG modülü, yapısında hareketli parça barındırmaması nedeniyle, basit yapılı ve uzun ömürlüdür. TEG'ler minimum yıllık bakım gerektirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle ömürleri, 20 yılın üzerindedir (Global Power Technologies 2021, Gunay ve diğ. 2020). Bu nedenle, çalışma kapsamında kurulan TEG sisteminin de 20 yılın üzerinde çalışması beklenmektedir.

Tasarlanan TEG sisteminin JES'te çalıştırılması sırasında dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan birisi de, jeotermal akışkan hatlarında meydana gelebilecek kabuklaşmalardır. JES'lerde kabuklaşmaları önlemek için yapılması gereken, jeotermal kuyularda kurulacak Skid Sistemi ile kuyunun buharlaşma

noktasından biraz daha derin kısmına inhibitör kimyasalı dozajlamaktır. Kimyasalın özelliğine ve miktarına, yapılacak kuyu testleri ile karar verilmektedir. Kuyu testleri ve inhibitör kullanımı dikkatle yapılırsa, jeotermal hatlarda kabuklaşma önlenabilir. TEG sistemi kurulu santrallerde meydana gelebilecek kabuklaşma sorunu, evaporatorde performans düşümüne sebep olabileceği gibi, TEG sisteminde de performans düşümüne neden olabilir. JES-TEG sistemi genel veriminde düşüşten kaçınmak için, inhibitör dozajının gereken miktarda sürekli olarak uygulanması gerekmektedir. Arıza, elektrik kesintisi gibi nedenlerle inhibitör dozajı belirli bir süre yapılamazsa, kuyuda kabuklaşma ihtimali artar. Şebeke elektriği kesildiğinde, JES'ler devre dışı kalmaktadır. Bu devre dışı kalma süresinde, kuyunun kireçlenmemesi için, inhibitör dozajı yapılmalıdır. Şebekede enerji yokken jeneratör, kesintisiz güç kaynağı gibi alternatiflerin yanında, TEG sistemi ile üretilen enerji kullanılarak da inhibitör sistemi çalıştırılabilir ve kabuklaşmanın önlenmesinde alternatif oluşturulabilir. Bu durumda, jeotermal kuyuda meydana gelebilecek kabuklaşmayı önlemek maksadıyla inhibitör dozajında kullanılabilecek TEG sistemi, jeotermal kuyuların işletme sürekliliğini sağlayarak, sistem kurulum maliyetini fazlasıyla karşılayabilecektir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretimi, alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir yeri olan bir enerji üretim yöntemidir. Dünya üzerinde jeotermal kaynaklara sahip ülkeler, bu kaynakları mümkün olduğunca elektrik enerjisi üretiminde de kullanmaya çalışmaktadır. Her enerji üretim sisteminde olduğu gibi, jeotermal enerji santrallerinde hedeflenen unsurlardan birisi de, enerji kaynağından mümkün olan en verimli şekilde faydalanabilmektir. Elektrik enerjisi üretiminde yararlanılan jeotermal akışkanın, reenjeksiyon kuyusuna gönderilmeden önce tekrar elektrik enerjisi üretiminde kullanılması mümkündür. Böylelikle santralin daha verimli bir şekilde işletilmesi sağlanmaktadır. Bu amaçla, yüzeyleri arasında oluşan sıcaklık farkı ile elektrik enerjisi üretimi yapabilen TEG'lerden faydalanılabilir. Reenjeksiyon kuyusuna gönderilen jeotermal akışkan, bu işlemden önce TEG'nin sıcak yüzeyinden geçirilebilir. TEG'nin soğuk yüzeyinden de santralin soğutma suyu geçirildiğinde, TEG'nin yüzeyleri arasında oluşan sıcaklık farkı neticesinde elektrik enerjisi üretimi yapılabilir. Bu şekilde oluşan sistem, Jeotermal-TEG Hibrit Enerji Sistemi adını alır.

Yapılan bu çalışmada; TEG'lerin JES'lerdeki atık ısıdan enerji geri kazanımı bağlamında kullanımına yönelik bir laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Elde edilen hibrit model, bu amacının yanı sıra, mühendislik eğitimi alan öğrencilerin bu tür sistemleri deneyimleyebilmesi ve ayrıca lisansüstü çalışmalarda da kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Hibrit model, PLC tabanlı bir kontrol sistemi ile donatılmıştır. PLC tabanlı sistem; modellenen santraldeki sıcaklık, debi ve basınç gibi verilerin değişimlerinin izlenmesini sağlar. Aynı zamanda, santralde oluşabilecek ani sıcaklık, debi ve basınç değişimlerinin operatör tarafından belirlenen limitleri aşması halinde sisteme müdahale ederek, tüm sistemi otomatik olarak devre dışı bırakabilmektedir.

Oluşturulan hibrit enerji üretim sistemi modelinde Matlab & Simulink kullanılarak, maksimum güç çıkışı, gerilim kararlılığı ve TEG'lerin optimize edilmiş konfigürasyonu için, seri ve paralel bağlı TEG sayısı; 12 seri bağlı modülden oluşan kol ve bu kollardan 4 adedinin paralel bağlanması şeklinde bulunmuştur.

TEG'lerin optimize konfigürasyonu için tasarlanan laboratuvar modelinden, TEG'lerin ısıdan elektrığe dönüşüm verimlerinin %2,44'e kadar mümkün olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada, farklı kütle akış hızlarına sahip (0,2 kg/s, 0,3 kg/s ve 0,4 kg/s) üç durum ele alınmıştır. Bu durumlarda, TEG'lerin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farklarının; 50 °C ($T_h = 70$ °C ve $T_c = 20$ °C), 60 °C ($T_h = 80$ °C ve $T_c = 20$ °C), 70 °C ($T_h = 90$ °C ve $T_c = 20$ °C), ve 80 °C ($T_h = 100$ °C ve $T_c = 20$ °C) olması halinde, daha yüksek kütle akış hızları ve sıcaklık farklarının, TEG voltaj ve güç çıkışlarını arttırdığı teyid edilmiştir.

Bununla birlikte, jeotermal santralin gerçek işletme koşullarında, böyle bir hibrit enerji sisteminden daha verimli elektrik enerjisi üretilmesi noktasında, TEG'lerin detaylı analizler neticesinde elde edilecek veriler ışığında kullanılmaları yerinde olacaktır. Parametrik enerji analizinden, reenjekte edilen jeotermal akışkanın sıcaklığının artmasıyla TEG'lerin güç çıkışının arttığı, ancak ORC'nin net gücünün azaldığı görülmektedir. ORC'nin 217,6 kW olan maksimum net güç çıkışı için, TEG'ler, bu duruma karşılık gelen 41,98 °C sıcaklık farkında, 43,42 W güç üretebilmektedir. Ayrıca, soğutma suyunun yüksek giriş sıcaklık değerleri için ORC'nin net gücü azalmakta ve ayrıca TEG'lerin güç çıkışı da düşmektedir. TEG'ler, ORC'nin maksimum net güç çıkış gücü değeri olan 260 kW için, 60,6 °C'lık sıcaklık farkında 84,29 W enerji üretebilmektedir. Dolayısıyla, TEG'lerden maksimum güç elde etme yolunda, asıl sistem olan ORC yapısından daha düşük enerji çıkışı elde edilmesi yoluna gidilmesi doğru değildir. Bu noktada yapılması gereken, ORC sisteminin çalışma sistemine müdahale etmeden, yani güç çıkış değerini düşürmeden, sistemden reenjekte edilen jeotermal akışkanın atık ısını kullanarak enerji geri kazanımının hedeflenmesidir. Bu çalışmada da, bahsi geçen prensip üzerine faaliyet yürütülmüştür.

Bu çalışma bağlamında gelecekte yapılabilecek faaliyetlerin, sistemde otomatik olarak kontrol edilemeyen sıcak su debisinin, örneğin elektronik kontrollü vana kullanımı ile ayarlanabilmesi noktasına yoğunlaşması olasıdır. Zira, sıcak su debisinin elektriksel yük değişimine göre otomatik olarak ayarlanabilmesi, TEG çıkış güçlerinin bu türden yük değişimlerine adaptasyonu noktasında ciddi bir unsur olacaktır. Ayrıca, hibrit sistem veriminin ve sistemden atık ısı geri kazanımının

iyileştirilmesi maksatlı; enerji, ekserji ve termoeconomik analizlerin yapılması da mümkündür.

Hibrit modelin deney seti şeklinde seri imalatının yapılarak mühendislik öğrencilerinin (elektrik-elektronik mühendisliği, makine mühendisliği, enerji sistemleri mühendisliği v.b.) geniş çapta kullanımına sunulması, deney setinin fonksiyonelliğinin arttırılması ve lisans - lisansüstü tez çalışmalarında kullanılması, yine bu çalışma bağlamında geleceğe yönelik planlamalar dahilinde düşünülebilir.



8. KAYNAKLAR

Ahıska, R., Mamur, H. ve Uliş, M., "Termoelektrik modülün jeneratör olarak modellenmesi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ*, 26 (4), 889-896, (2011).

Ahıska, R., Mamur, H. ve Uliş, M., "Termoelektrik jeneratörler için düşük güçlü DC-DC boost konvertör uygulaması", *Proje Tabanlı Mekatronik Eğitim Çalıştayı*, Çankırı-Ilgaz, TÜRKİYE, (2012).

Ahıska, R. and Mamur, H., "Development and application of a new power analysis system for testing of geothermal thermoelectric generators", *International Journal of Green Energy*, 13 (7), 672-681, (2016).

Ahıska, R., Mamur, H. and Uliş, M., "Modelling and experimental study of thermoelectric module as generator", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (4), 889-896, (2011).

Anderson, A. and Rezaie, B., "Geothermal technology: trends and potential role in a sustainable future", *Applied Energy*, 248, 18–34, (2019).

Ankara Kalkınma Ajansı., "Ankara İli Jeotermal Kaynaklı Elektrik Üretim Santrali", *Ön Fizibilite Raporu*, Ankara, (2021).

Apator Powogaz., "Vane Wheel Water Meters Operating Instructions", I-EN-5-002/2018, pdf version, p. 9, (2018).

Atek., "BCT 110 Pressure Transmitter Product Catalogue", pdf version, p. 2, (2019).

Baş, Ş., "Atık Baca Gazı Kullanımı ile Termoelektrik Jeneratörlerde Elektrik Üretiminin Faydalı Kullanımının DeneySEL İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2014).

Boyd, T. and DiPippo, R., "Technical assessment of the combined heat and power plant at the Oregon Institute of Technology", Klamath Falls, Oregon. *GRC Trans.* 36, 1143-1149, (2012).

Bozkurt, M. A., "Jeotermal Enerji Santrallerinde Sondaj Kuyusu ve Akışkan Özelliklerinin Elektrik Üretimine Etkilerinin İncelenmesi", Lisans Tezi, *Elektrik&Elektronik Mühendisliği*, Danışman; Dr. Engin Cetin, p. 89, (2013).

Catalan, L., Aranguren, P., Araiz, M., Perez, G. and Astrain, D., “New opportunities for electricity generation in shallow hot dry rock fields: A study of thermoelectric generators with different heat exchangers”, *Energy Conversion and Management*, 200, 1-11, (2019).

Catalan, L., Garacochea, A., Casi, A., Araiz, M., Aranguren, P. and Astrain, D., “Experimental evidence of the viability of thermoelectric generators to power volcanic monitoring stations”, *Sensors*, 20 (17), 4839, (2020).

Cetin E., “Sıfır Akım Anahtarlama Tekniğinin AC Besleme Yapan Bir Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemine Uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *PAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2002).

Cetin, E., Hekim, M., Ozden, H. and Bozkurt, M. A., “A small scale geothermal power plant in Denizli-Turkey for sustainable energy studies”, *26th European Conference on Operational Research*, Rome-Italy, (2013).

Ding, T., Liu, J., Shi, K., Hu, S. and Yang, H., “Theoretical study on geothermal power generation using thermoelectric technology: A potential way to develop geothermal energy”, *International Journal of Green Energy*, 18, 297-307, (2021).

Dişlitaş, S., “Mikrodenetleyici Kontrollü Jeotermal Termoelektrik Jeneratör Tasarımı ve Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2002).

Döşkaya, H. E., "Güneş Enerjisi ve Atık Isı Kullanılarak Termoelektrik Modül ile Deneysel Elektrik Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, (2014).

Düzağaç, S., “Afyonkarahisar İli Jeotermal Konut Isıtma Sisteminin İrdelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Elektrik Mühendisliği, Yenilenebilir Enerji Sistemleri B.D.*, Afyon, (2015).

Elankovan, R., Suresh, S., Karthick, K., Muaaz, M.D. and Hussain, V.P., “Chandramohan, evaluation of thermoelectric power generated through waste heat recovery from long ducts and different thermal system configurations”, *Energy*, 185, 477-491, (2019).

Eldesoukey, A. and Hassan, H., “3D model of thermoelectric generator (TEG) case study: Effect of flow regime on the TEG performance”, *Energy Conversion and Management*, 180, 231-239, (2019).

Electrical Academia, “types of geothermal power plants”, (26.06.2021), <https://electricalacademia.com/renewable-energy/types-geothermal-power-plants-geothermal-electric-power-generation/>

Elimko., “General Product Catalogue”, pdf version, p. 342, (2019).

Enerji Atlası, “Ülkelere göre jeotermal enerji”, (22.06.2021), <https://www.enerjiatlasi.com/ulkelere-gore-jeotermal-enerji.html>

EPDK, “01/07/2021 ile 31/12/2025 Tarihleri Arasında İşletmeye Girecek Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Üretim Tesislerine İlişkin Cumhurbaşkan Kararı”, (01.12.2021), <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-122/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-destekleme-mekanizmasi-yekdem>

Fathabadi, H., “Two novel methods for converting the waste heat of PV modules caused by temperature rise into electric power”, *Renewable Energy*, 142, 543-551, (2019).

Geothermal Communities, “Geothermal Systems and Technologies, Geothermal Energy for Power Generation”, (02.07.2021), https://geothermalcommunities.eu/assets/presentation/7.Course_GT.pdf

Gholamian, E., Habibollahzade, A. and Zare, V., “Development and multi-objective optimization of geothermal-based organic Rankine cycle integrated with thermoelectric generator and proton exchange membrane electrolyzer for power and hydrogen production”, *Energy Conversion and Management*, 174, 112-125, (2018).

Global Power Technologies, “Thermoelectric Generators (TEGs)”, (09.12.2021), <https://www.globalte.com/products/thermoelectric-generators-tegs/overview>

Gunay, O., Yavuz, A. H., Ahiska, R. and Calisal, K. E., “Smart thermoelectric waste heat generator: Design, simulation and cost analysis”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100623, (2020).

Hekim, M. ve Cetin, E., “Jeotermal enerji santrallerine yönelik termoelektrik jeneratör sistem modellemesi”, *Cigre Güç Sistemleri Konferansı*, Ankara, Türkiye, p. 99-104, (2018).

Hekim, M. and Cetin, E., “Regeneration of electrical energy from waste geothermal fluid in geothermal power plants”, *Academic Perspective Procedia*, 2 (3), 525-531, DOI: 10.33793/acperpro.02.03.44, (2019).

Hekim, M. and Cetin, E., "Energy analysis of a geothermal power plant with thermoelectric energy harvester using waste heat", *International Journal of Energy Research*, 45 (15), 20891-20908, DOI: 10.1002/er.7145, (2021).

IEA, "Geothermal Tracking Report", (Mart 2021),
<https://www.iea.org/reports/geothermal>

IRENA., "Geothermal Power: Technology Brief", pdf version, p. 28, Abu Dhabi, (September 2017).

Islam, S., Dincer, I. and Yilbas, B. S., "Development, analysis and assessment of solar energy-based multigeneration system with thermoelectric generator", *Energy Conversion and Management*, 156, 746-756, (2018).

Kanimba, E. and Tian, Z., Modeling of a thermoelectric generator device, Book Chapter, *Thermoelectrics for Power Generation- A Look at Trends in the Technology*, pp. 461-479, DOI: 10.5772/65741, (2016).

Khanmohammadi, S., Saadat-Targhi, M., Ahmed, FW. and Afrand, M., "Potential of thermoelectric waste heat recovery in a combined geothermal, fuel cell and organic Rankine flash cycle (thermodynamic and economic evaluation)", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (11), 6934-6948, (2020).

Kryotherm. "Specification of Generating Thermoelectric Modules TGM-199-1.4-0.8", Russia, (2019).

Kuhite, R., Sheikh, S., Thakur, A., Bharre, C. and Mankar, N., "An experimental evaluation of automobile waste heat recovery system using thermoelectric generator", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2650, 2395-0056, (2020).

Kumar, A., Singh, K. and Das, R., "Response surface based experimental analysis and thermal resistance model of a thermoelectric power generation system", *Applied Thermal Engineering*, 159, 1-8, (2019).

LEO, "Circulation Pump Catalogue", LRP25-60/130, pdf version, p. 7. (2020).

Li, K., Garrison, G., Zhu, Y., Horne, R. and Petty, S., "Cost Estimation of Thermoelectric Generators", *46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*, SGP-TR-218, (2021).

Liu, C., Chen, P. and Li, K., “A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39,15497-15505, (2014).

Liu, S., Hu, B., Liu, D., Li, F., Li, J. F., Li, B. ... and Nan, C. W., “Micro-thermoelectric generators based on through glass pillars with high output voltage enabled by large temperature difference”, *Applied Energy*, 225, 600-610, (2018).

Ma, X., Shu, G., Tian, H., Xu, W. and Chen, T., “Performance assessment of engine exhaust-based segmented thermoelectric generators by length ratio optimization”, *Applied Energy*, 248, 614–625, (2019).

Maddalena., “Water Meters Product Catalogue”, pdf version, p. 16, (2020).

Madrugá, S., “Modeling of enhanced micro-energy harvesting of thermal ambient fluctuations with metallic foams embedded in phase change materials”, *Renewable Energy*, 168, 424-437, (2021).

Malik, M. Z., Musharavati, F., Khanmohammadi, S., Pakseresht, A. H., Khanmohammadi, S. and Nguyen, D. D., “Design and comparative exergy and exergo-economic analyses of a novel integrated Kalina cycle improved with fuel cell and thermoelectric module”, *Energy Conversion and Management*, 220, 113081, (2020).

Mamur, H., “Termoelektrik Jeneratörün Elektriksel, Termoelektriksel ve Isıl Parametrelerinin İncelenmesi İçin Bilgisayarlı Bir Veri Edinim ve Test Sisteminin Gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü*, Ankara, (2014).

Mathworks, “Controlled Voltage Source”, (05.07.2021), https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/controlledvoltage_source.html

MEGEP., “T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Elektrik-Elektronik Teknolojisi Soğutma Sistemi Elemanları”, pdf 523EO0459, 80 s, (2011).

Mohan N., Power Electronics, USA, Wiley, (1989).

Neamtu, MO., Trip, ND. and Burca, A.T., “Low power renewable energy system used for power back-up applications”, *IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging*, Romania, October 26-29, (2017).

Niu, X., Yu, J. and Wang, S., “Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator”, *Journal of Power Sources*, 188, 621-626, (2009).

Northwestern, “Thermoelectric Engineering, thermoelectric devices”, (28.06.2021),
<http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/engineering.html>

Özdemir, A., Türkiye’de Jeotermal Enerji, Potansiyel Arama Yöntemleri, Mevcut Jeotermal Alanların Özellikleri, 17-23, 29-48, (2012).

Özden, H. and Paul, D., “Organik Rankine çevrim teknolojisiyle düşük sıcaklıktaki kaynaktan faydalanılarak elektrik üretimi örnek çalışma: Sarayköy jeotermal santrali”, *İzmir Tesisat kongresi*, İzmir, (2011).

Öztemir, M.H., “Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi ve Aydın-Salavatlı Sahası Elektrik Üretim Santrali”, (2011).

Pratt&Whitney, “Hot Liquid to Electricity Power System Product Data and Application Guide”, USA, (2009).

Ramirez, R., Gutierrez, A.S., Eras, J.C.E., Valencia, K., Hernandez, B. and Forero, J.D., “Evaluation of the energy recovery potential of thermoelectric generators in diesel engines”, *Journal of Cleaner Production*, 241, 118412, 1-9, (2019).

Rattner, A. S. and Meehan, T. J., “Simple analytic model for optimally sizing thermoelectric generator module arrays for waste heat recovery”, *Applied Thermal Engineering*, 146, 795-804, (2019).

REN21. Renewables 2020 Global Status Report, ISBN 978-3-948393-03-8, (2020).

Rodrigues, C. R., Machado, T., Pires, A. L., Chaves, B., Carpinteiro, F. S. and Pereira, A. M., “Recovery of thermal energy released in the composting process and their conversion into electricity utilizing thermoelectric generators”, *Applied Thermal Engineering*, 138, 319-324, (2018).

RS Components., “On-line Catalogue”, (1 Ekim 2020),
<https://fi.rsdelivers.com/product/siemens/6es7214-1ad23-0xb0/siemens-s7-200-plc-cpu-10-outputs-computer/4886713>

S7200 Otomasyon, “S7-200 Türkçe Kullanım Kılavuzu”, (23.07.2021), <https://s7otomasyon.com/2009/06/05/s7200-turkce-kullanim-kilavuzu/>, (2009).

Siemens., “S7-200 Explorer Automated Data Log Upload Procedure”, *Technical Brochure*, 28/10, pdf version, 19 p, (2004).

Siemens., “Simatic S7-200 Programmable Controller System Manual”, 6ES7298-8FA24-8BH0, Edition 09/2007, A5E00307987-03, pdf version, 546 p., (2007).

Siemens., “CPU 224 DC/DC/DC PLC 6ES7214-1AD23-0XB0 Data Sheet”, 04/24, pdf version, 6 p, (2020).

Siouane, S., Jovanović, S. and Poure, P. “Equivalent electrical circuits of thermoelectric generators under different operating conditions”, *Energies*, 10 (3), 386, (2017).

Suryawanshi, S., Sonawane, M., Sharma, A., Kshirsagar, S. and Diware, V. “Use of exhaust heat energy of two wheelers to generate power by seebeck effect”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 1366, 2395-0056, (2017).

TCMB, “Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları”, (03.12.2021), <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/istatistikler/doviz+kurlari/gosterge+niteligindeki+merkez+bankasi+kurlari>

TEİAŞ, “Türkiye kurulu güç raporu”, (25.06.2021), <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari>

Teknoloji, “Termoelektrik Etki Nedir? Isıdan Elektrik Enerjisi Elde Etmek”, (22.06.2021), <https://teknoloji.org/termoelektrik-etki-nedir-isidan-elektrik-enerjisi-elde-etmek/>

Tsai, H. L. and Lin, J. M., “Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink”, *Journal of Electronic Materials*, 39 (9), 2105-2111, (2010).

Wang, P., Wang, B.L. and Li, J.E., “Temperature and performance modeling of thermoelectric generators”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118509, 1-14, (2019).

Wang, S., Xie, T. and Xie, H., “Experimental study of the effects of the thermal contact resistance on the performance of thermoelectric generator”, *Applied Thermal Engineering*, 130, 847-853, (2018).

Wates., “Main Product Catalogue”, pdf version, p. 24, (2014)

Xie, Y., Wu, S. J. and Yang, C. J., “Generation of electricity from deep-sea hydrothermal vents with a thermoelectric converter”, *Applied energy*, 164, 620-627, (2016).

Yıldız A., “Jeotermal Enerji Kaynakları”, 3. *Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sistemleri Kış Okulu*, Afyon, (2014).

Zare, V. and Palideh, V., “Employing thermoelectric generator for power generation enhancement in a Kalina cycle driven by low-grade geothermal energy”, *Applied Thermal Engineering*, 130, 418-428, (2018).

Zarrouk, S. J. and Moon, H., “Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review”, *Geothermics*, 51, 142–153, (2014).

Zheng, L.J., Kang, D.H., Kim, N.K., Youn, Y.J. and Kang, H.W., “Theoretical analysis of natural evaporative cooling to enhance the efficiency of thermoelectric devices”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118512, 1-11, (2019).



EKLER

9. EKLER

EK A Akış Debilerine Göre Hesaplanan Gerilim ve Güç Değer Tabloları

ΔT 'nin 50 °C, 60 °C, 70 °C ve 80 °C'lik değerleri için, ayrı ayrı sıcak ve soğuk su pompasının 3 ayrı akış debisine göre hesaplanan gerilim ve güç değer tabloları, aşağıda sunulmuştur.



Tablo A.1: 50 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri.

Zaman (s)	Kademe 1		Kademe 2		Kademe 3	
	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)
0	13,43	58,02	13,52	58,41	13,94	60,22
30	13,20	57,02	13,32	57,54	14,57	62,94
60	13,30	57,46	13,57	58,62	14,32	61,86
90	12,94	55,90	13,60	58,75	14,62	63,16
120	13,00	56,16	13,70	59,18	14,92	64,45
150	12,45	53,78	13,50	58,32	14,46	62,47
180	12,44	53,74	13,07	56,46	13,50	58,32
210	12,42	53,65	13,10	56,59	13,56	58,58
240	12,40	53,57	13,00	56,16	13,26	57,28
270	12,35	53,35	13,00	56,16	13,41	57,93
300	12,31	53,18	12,66	54,69	13,43	58,02
330	12,22	52,79	12,63	54,56	13,31	57,50
360	12,26	52,96	12,62	54,52	13,14	56,76
390	12,30	53,14	12,69	54,82	13,50	58,32
420	12,37	53,44	12,75	55,08	12,95	55,94
450	12,47	53,87	12,82	55,38	12,91	55,77
480	12,48	53,91	12,82	55,38	12,88	55,64
510	12,48	53,91	12,80	55,30	12,89	55,68
540	12,48	53,91	12,80	55,30	13,07	56,46
570	12,47	53,87	12,79	55,25	13,07	56,46
600	12,47	53,87	12,77	55,17	13,07	56,46
630	12,46	53,83	12,74	55,04	13,06	56,42
660	12,46	53,83	12,71	54,91	13,03	56,29
690	12,46	53,83	12,62	54,52	12,97	56,03
720	12,44	53,74	12,62	54,52	12,90	55,73
750	12,40	53,57	12,60	54,43	12,87	55,60
780	12,34	53,31	12,66	54,69	12,85	55,51
810	12,29	53,09	12,75	55,08	12,85	55,51
840	12,26	52,96	12,76	55,12	12,83	55,43
870	12,27	53,01	12,75	55,08	12,81	55,34
900	12,32	53,22	12,74	55,04	12,85	55,51
930	12,40	53,57	12,73	54,99	13,06	56,42
960	12,44	53,74	12,72	54,95	13,03	56,29
990	12,45	53,78	12,71	54,91	13,04	56,33
1020	12,44	53,74	12,68	54,78	13,01	56,20
1050	12,44	53,74	12,62	54,52	13,00	56,16
1080	12,44	53,74	12,59	54,39	12,93	55,86
1110	12,44	53,74	12,56	54,26	12,88	55,64
1140	12,43	53,70	12,57	54,30	12,84	55,47
1170	12,43	53,70	12,68	54,78	12,82	55,38
1200	12,43	53,70	12,77	55,17	12,80	55,30

Tablo A.2: 60 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri.

Zaman (s)	Kademe 1		Kademe 2		Kademe 3	
	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)
0	14,75	74,93	15,42	78,33	15,63	79,40
30	14,74	74,88	15,22	77,32	15,71	79,81
60	14,68	74,57	15,47	78,59	16,08	81,69
90	14,60	74,17	15,50	78,74	16,05	81,53
120	14,46	73,46	15,60	79,25	16,02	81,38
150	14,31	72,69	15,40	78,23	16,01	81,33
180	14,21	72,19	14,97	76,05	15,89	80,72
210	14,53	73,81	15,00	76,20	15,83	80,42
240	14,48	73,56	14,90	75,69	15,72	79,86
270	14,74	74,88	14,90	75,69	15,69	79,71
300	14,56	73,96	14,84	75,39	15,67	79,60
330	14,53	73,81	14,83	75,34	15,65	79,50
360	14,52	73,76	14,83	75,34	15,53	78,89
390	14,59	74,12	14,80	75,18	15,56	79,04
420	14,65	74,42	14,79	75,13	15,90	80,77
450	14,72	74,78	14,79	75,13	16,02	81,38
480	14,72	74,78	14,78	75,08	16,00	81,28
510	14,70	74,68	14,78	75,08	16,01	81,33
540	14,70	74,68	14,76	74,98	16,00	81,28
570	14,69	74,63	14,73	74,83	15,87	80,62
600	14,66	74,47	14,67	74,52	15,74	79,96
630	14,45	73,41	14,64	74,37	15,71	79,81
660	14,29	72,59	14,61	74,22	15,65	79,50
690	14,14	71,83	14,52	73,76	15,57	79,10
720	14,14	71,83	14,52	73,76	15,55	78,99
750	14,39	73,10	14,50	73,66	15,49	78,69
780	14,56	73,96	14,74	74,88	15,62	79,35
810	14,65	74,42	14,86	75,49	15,85	80,52
840	14,66	74,47	14,86	75,49	15,99	81,23
870	14,65	74,42	14,83	75,34	15,94	80,98
900	14,64	74,37	14,82	75,29	15,94	80,98
930	14,63	74,32	14,82	75,29	15,93	80,92
960	14,62	74,27	14,81	75,23	15,83	80,42
990	14,61	74,22	14,80	75,18	15,71	79,81
1020	14,58	74,07	14,79	75,13	15,59	79,20
1050	14,52	73,76	14,78	75,08	15,56	79,04
1080	14,49	73,61	14,78	75,08	15,53	78,89
1110	14,46	73,46	14,70	74,68	15,47	78,59
1140	14,47	73,51	14,64	74,37	15,45	78,49
1170	14,44	73,36	14,58	74,07	15,71	79,81
1200	14,26	72,44	14,67	74,52	15,97	81,13

Tablo A.3: 70 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri.

Zaman (s)	Kademe 1		Kademe 2		Kademe 3	
	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)
0	19,14	111,01	20,58	119,36	20,59	119,42
30	19,13	110,95	20,32	117,86	20,71	120,12
60	19,10	110,78	20,23	117,33	21,13	122,55
90	19,00	110,20	19,99	115,94	21,34	123,77
120	18,59	107,82	19,77	114,67	21,28	123,42
150	19,13	110,95	19,89	115,36	21,25	123,25
180	19,01	110,26	20,17	116,99	21,25	123,25
210	19,05	110,49	20,41	118,38	21,23	123,13
240	19,01	110,26	20,65	119,77	21,13	122,55
270	19,00	110,20	20,55	119,19	20,85	120,93
300	18,97	110,03	20,54	119,13	20,70	120,06
330	18,98	110,08	20,53	119,07	20,56	119,25
360	18,97	110,03	20,50	118,90	20,84	120,87
390	18,94	109,85	20,50	118,90	21,13	122,55
420	18,93	109,79	20,49	118,84	21,22	123,08
450	18,91	109,68	20,41	118,38	21,20	122,96
480	18,90	109,62	20,10	116,58	21,18	122,84
510	18,88	109,50	19,83	115,01	21,14	122,61
540	18,83	109,21	19,66	114,03	21,15	122,67
570	18,67	108,29	19,70	114,26	21,11	122,44
600	18,36	106,49	19,99	115,94	20,88	121,10
630	17,98	104,28	20,09	116,52	20,54	119,13
660	17,90	103,82	20,49	118,84	20,51	118,96
690	18,10	104,98	20,40	118,32	20,56	119,25
720	18,29	106,08	20,39	118,26	20,62	119,60
750	18,57	107,71	20,40	118,32	20,81	120,70
780	18,86	109,39	20,39	118,26	21,03	121,97
810	18,96	109,97	20,40	118,32	21,05	122,09
840	18,95	109,91	20,36	118,09	21,02	121,92
870	18,93	109,79	20,32	117,86	20,98	121,68
900	18,90	109,62	20,04	116,23	20,98	121,68
930	18,89	109,56	19,74	114,49	20,94	121,45
960	18,88	109,50	19,50	113,10	20,74	120,29
990	18,86	109,39	19,56	113,45	20,45	118,61
1020	18,85	109,33	19,80	114,84	20,31	117,80
1050	18,81	109,10	20,02	116,12	20,49	118,84
1080	18,78	108,92	20,28	117,62	20,68	119,94
1110	18,76	108,81	20,44	118,55	20,92	121,34
1140	18,55	107,59	20,37	118,15	21,02	121,92
1170	18,26	105,91	20,34	117,97	20,97	121,63
1200	17,97	104,23	20,35	118,03	20,97	121,63

Tablo A.4: 80 °C sıcaklık farkı için TEG sistemi gerilim ve güç değerleri.

Zaman (s)	Kademe 1		Kademe 2		Kademe 3	
	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)	Gerilim (V DC)	Güç (W)
0	22,44	147,21	23,48	154,03	25,10	164,66
30	22,43	147,14	23,22	152,32	25,30	165,97
60	22,40	146,94	23,13	151,73	25,33	166,16
90	22,30	146,29	22,89	150,16	25,40	166,62
120	22,41	147,01	23,00	150,88	25,48	167,15
150	22,43	147,14	22,79	149,50	25,47	167,08
180	22,31	146,35	23,07	151,34	25,45	166,95
210	22,35	146,62	23,31	152,91	25,43	166,82
240	22,31	146,35	23,20	152,19	25,33	166,16
270	22,30	146,29	23,45	153,83	25,30	165,97
300	22,27	146,09	23,44	153,77	25,40	166,62
330	22,28	146,16	23,43	153,70	25,35	166,30
360	22,27	146,09	23,40	153,50	25,32	166,10
390	22,24	145,89	23,44	153,77	25,33	166,16
420	22,23	145,83	23,39	153,44	25,42	166,76
450	22,21	145,70	23,31	152,91	25,40	166,62
480	22,20	145,63	23,00	150,88	25,38	166,49
510	22,18	145,50	22,90	150,22	25,34	166,23
540	22,13	145,17	23,00	150,88	25,35	166,30
570	21,97	144,12	23,10	151,54	25,31	166,03
600	21,66	142,09	22,89	150,16	25,08	164,52
630	22,17	145,44	22,99	150,81	25,30	165,97
660	21,60	141,70	23,39	153,44	25,20	165,31
690	21,57	141,50	23,30	152,85	25,22	165,44
720	21,59	141,63	23,29	152,78	25,10	164,66
750	21,87	143,47	23,30	152,85	25,01	164,07
780	22,16	145,37	23,29	152,78	25,23	165,51
810	22,26	146,03	23,30	152,85	25,25	165,64
840	22,25	145,96	23,26	152,59	25,22	165,44
870	22,23	145,83	23,22	152,32	25,18	165,18
900	22,20	145,63	22,94	150,49	25,18	165,18
930	22,19	145,57	22,80	149,57	25,14	164,92
960	22,18	145,50	22,70	148,91	24,94	163,61
990	22,16	145,37	22,80	149,57	25,00	164,00
1020	22,15	145,30	22,70	148,91	25,03	164,20
1050	22,11	145,04	22,92	150,36	25,01	164,07
1080	22,08	144,84	23,18	152,06	25,02	164,13
1110	22,06	144,71	23,34	153,11	25,12	164,79
1140	21,85	143,34	23,27	152,65	25,22	165,44
1170	21,56	141,43	23,24	152,45	25,17	165,12
1200	21,70	142,35	23,60	154,82	25,17	165,12

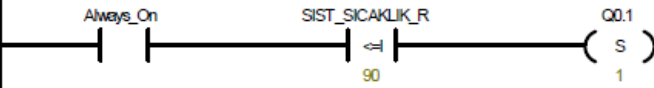
EK B Step 7 Micro/WIN Ladder Diyagramları

TEG sistemi kontrol ve veri takibini yapmak amacıyla bu tez çalışması kapsamında Siemens S7200 PLC üzerinde Step 7 Micro/WIN programı ile oluşturulan PLC TEG Sistemi ladder diyagramları, bu bölümde verilmiştir.



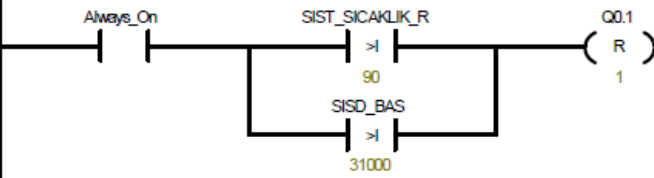
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SIST_SIC	AIW0	SICAK SU TANK SICAKLIK ANIN
SIST_SICAKLIK_R	VW0	SICAK SU TANK SICAKLIK R

Network 2

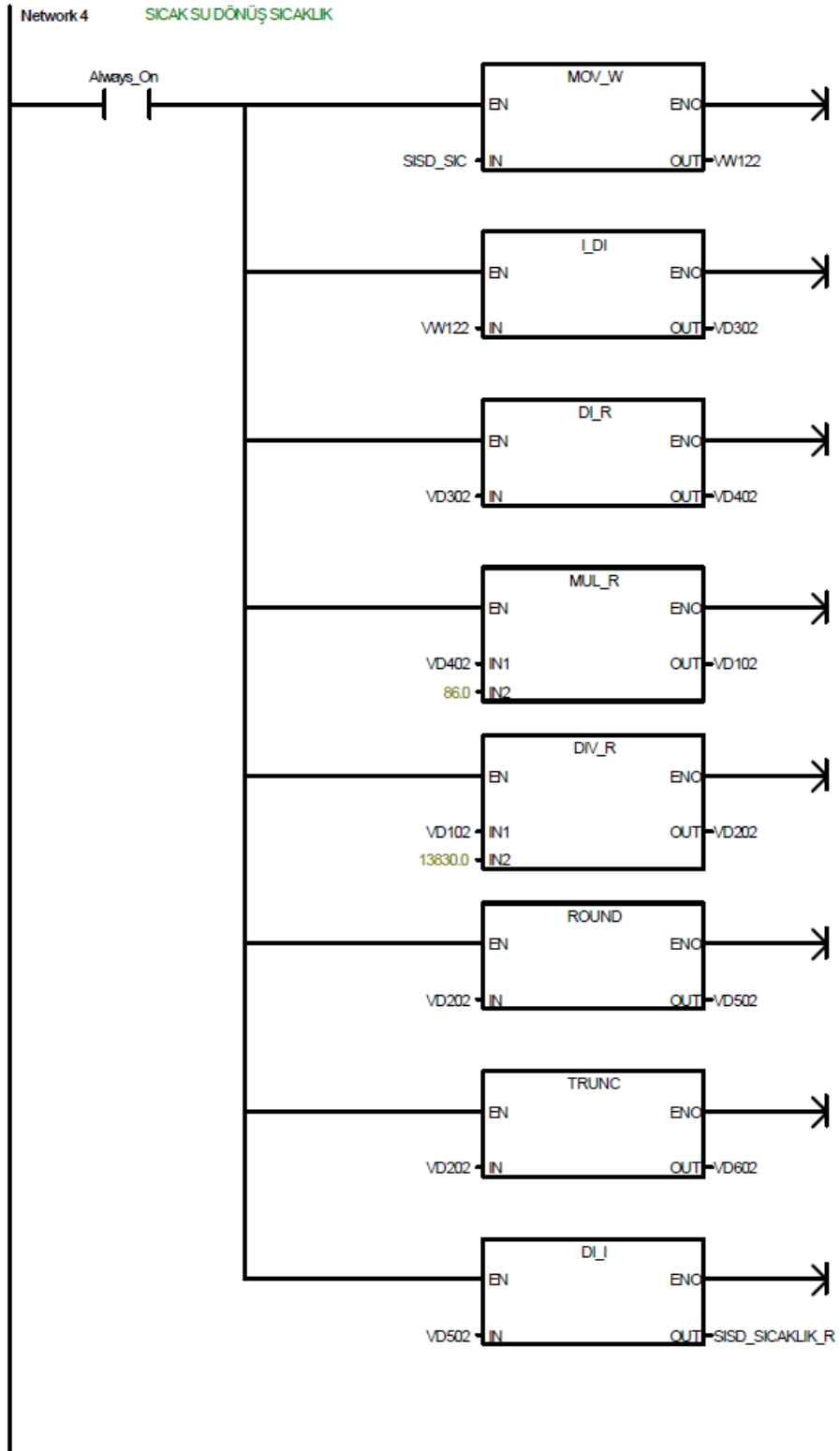


Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SIST_SICAKLIK_R	VW0	SICAK SU TANK SICAKLIK R

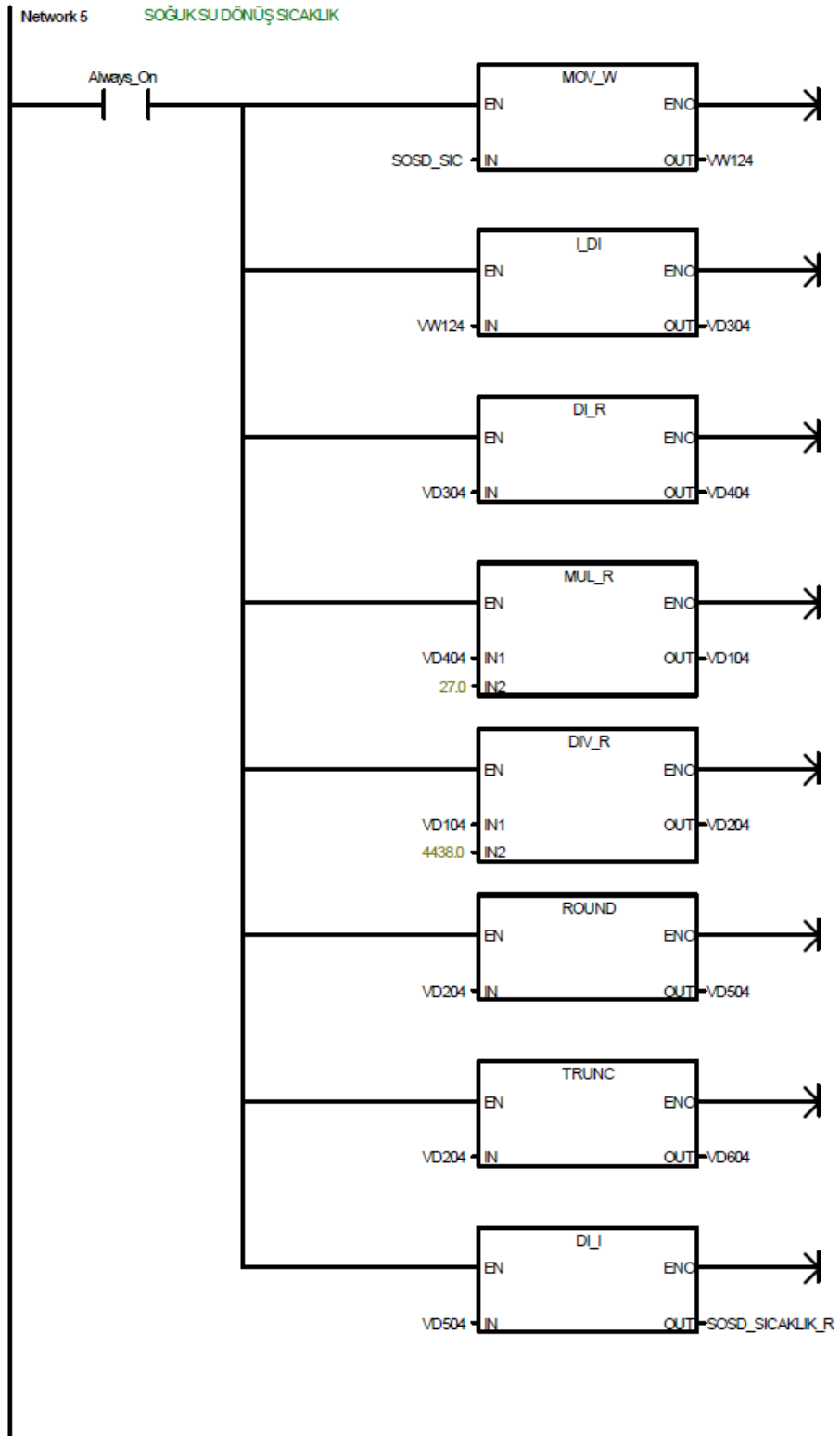
Network 3



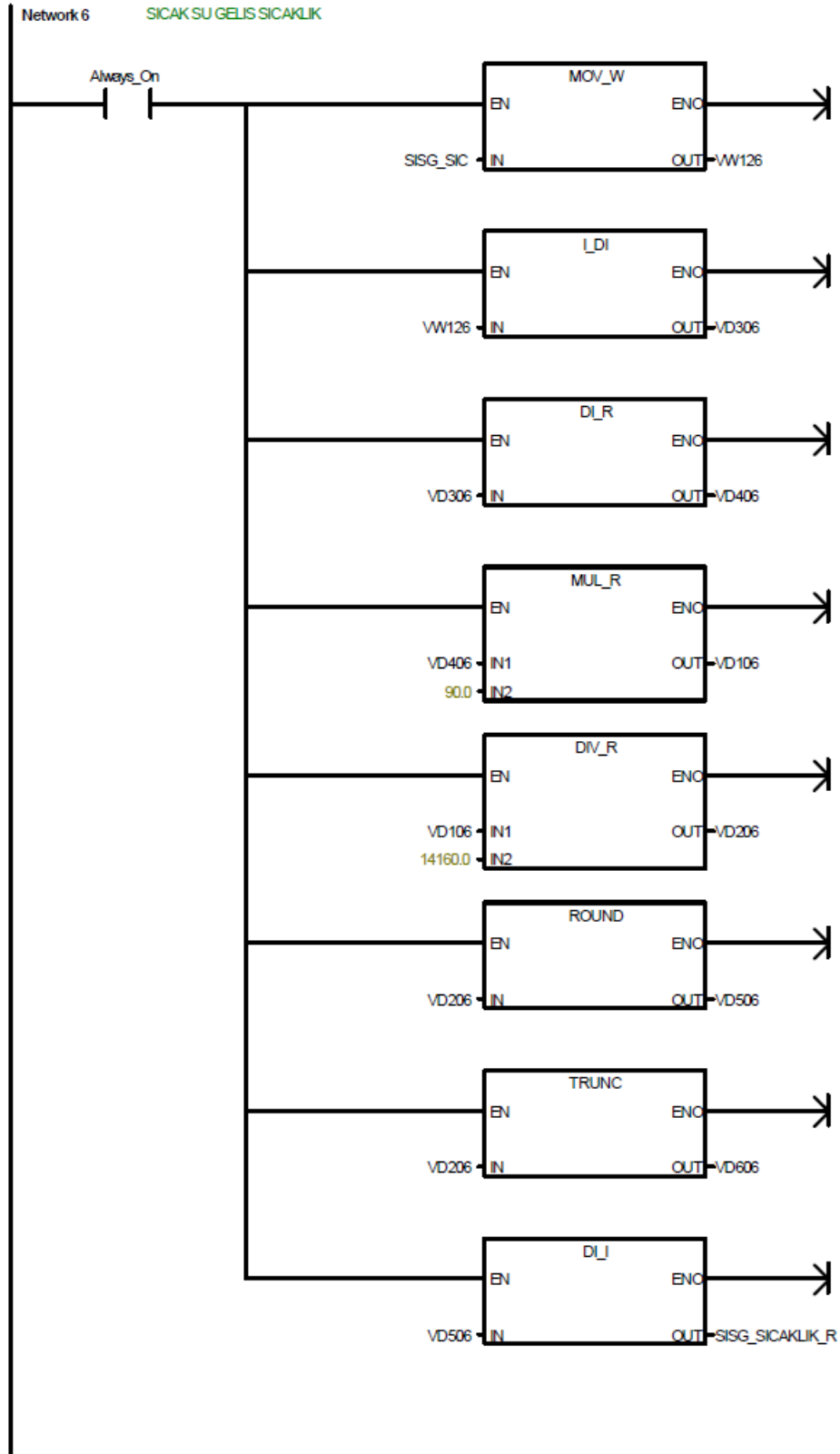
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SISD_BAS	AIW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC
SIST_SICAKLIK_R	VW0	SICAK SU TANK SICAKLIK R



Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SISD_SIC	AIW2	SICAK SU DONUS SICAKLIK
SISD_SICAKLIK_R	VW2	SICAK SU DONUS SICAKLIK R

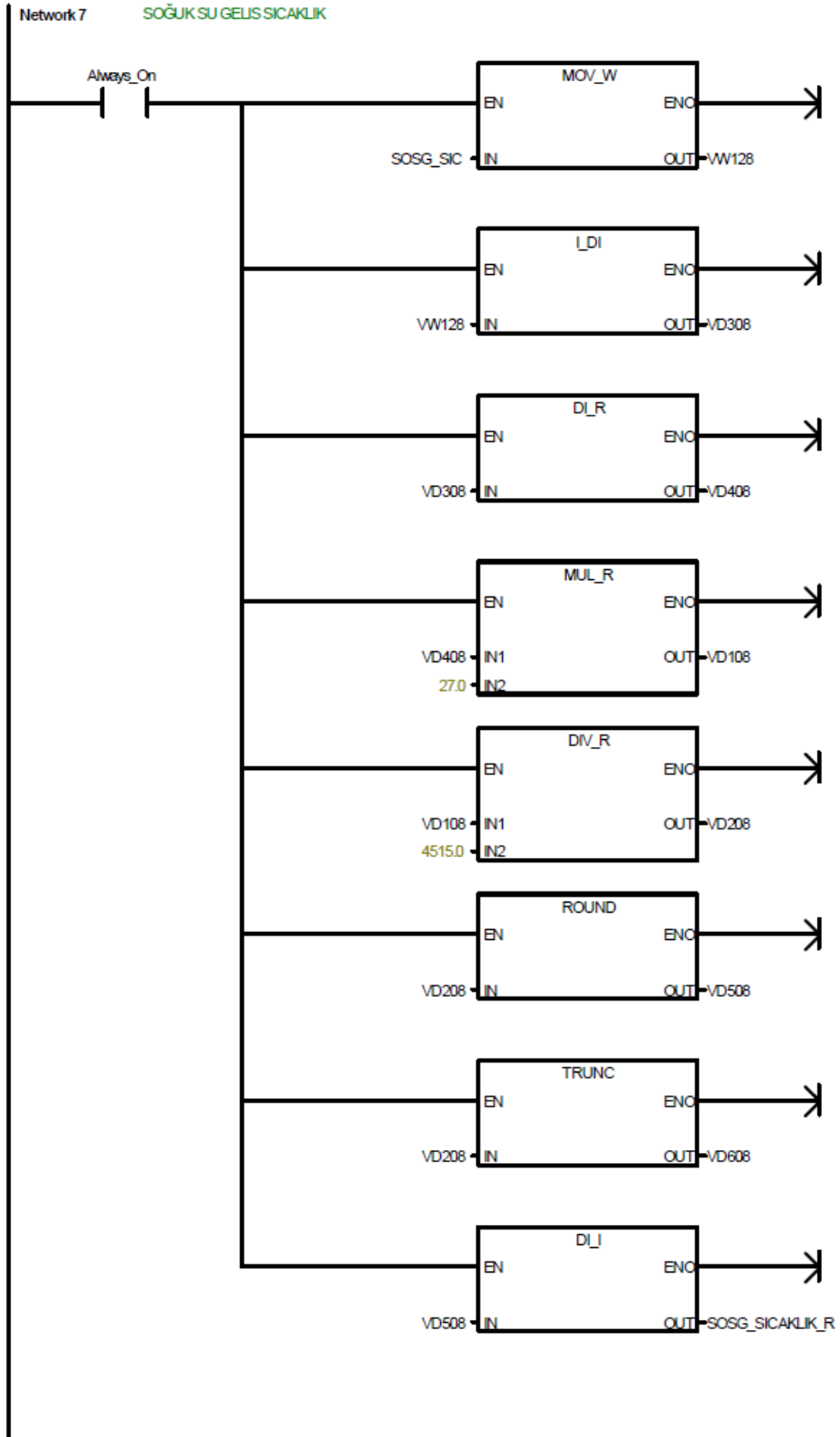


Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SOSD_SIC	AIW4	SOGUK SU DONUS SICAKLIK
SOSD_SICAKLIK_R	VW4	SOGUK SU DONUS SICAKLIK R



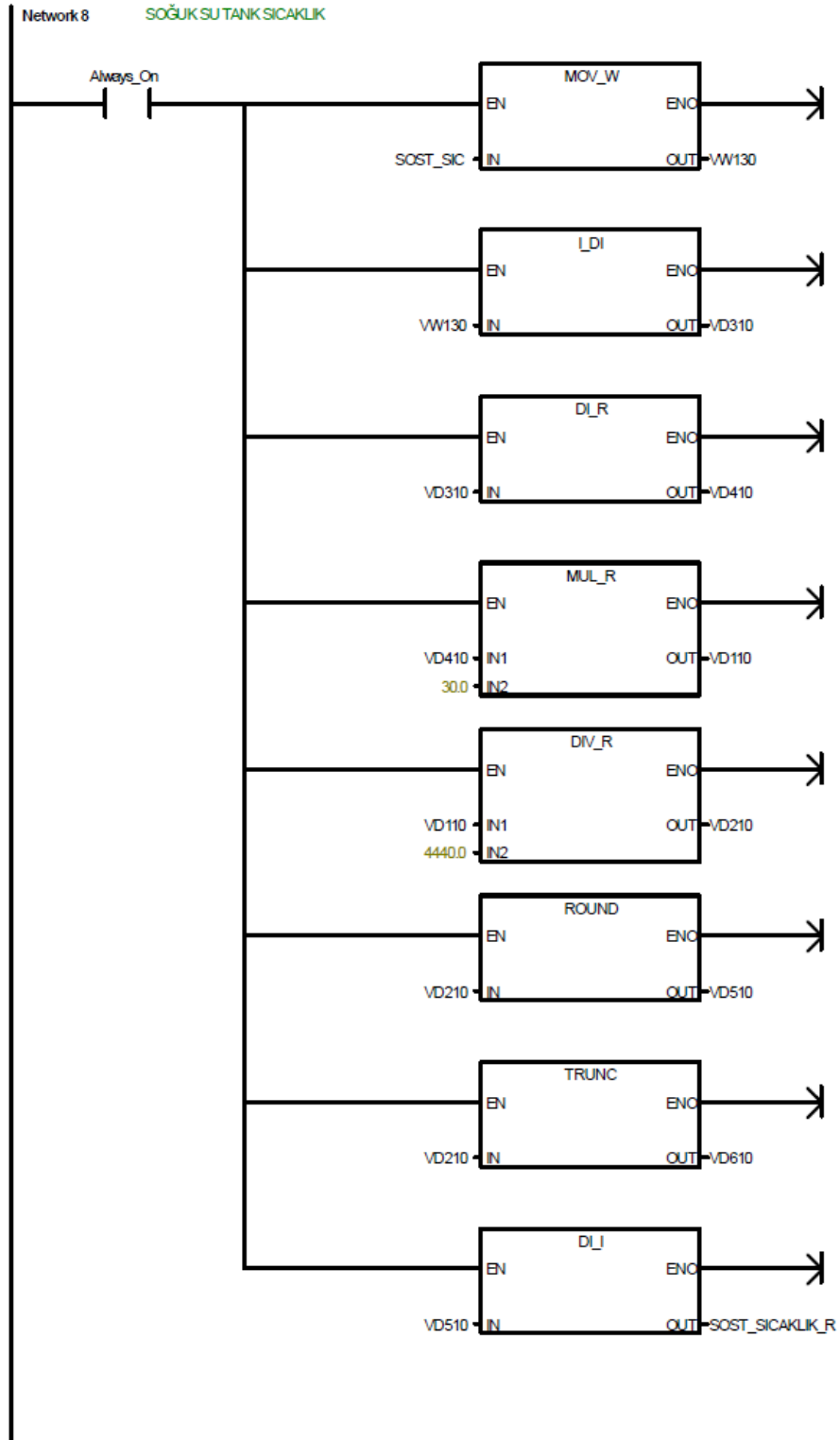
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SISG_SIC	AIW6	SICAK SU GELIS SICAKLIK
SISG_SICAKLIK_R	VW6	SICAK SU GELIS SICAKLIK R





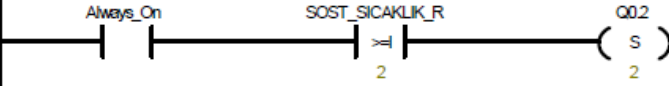
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SOSG_SIC	AIW8	SOGUK SU GELIS SICAKLIK
SOSG_SICAKLIK_R	VW8	SOGUK SU GELIS SICAKLIK R





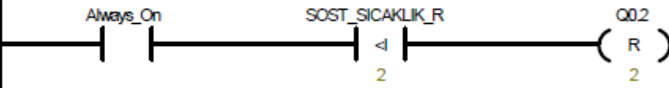
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SOST_SIC	AIW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK
SOST_SICAKLIK_R	VW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK R

Network 9

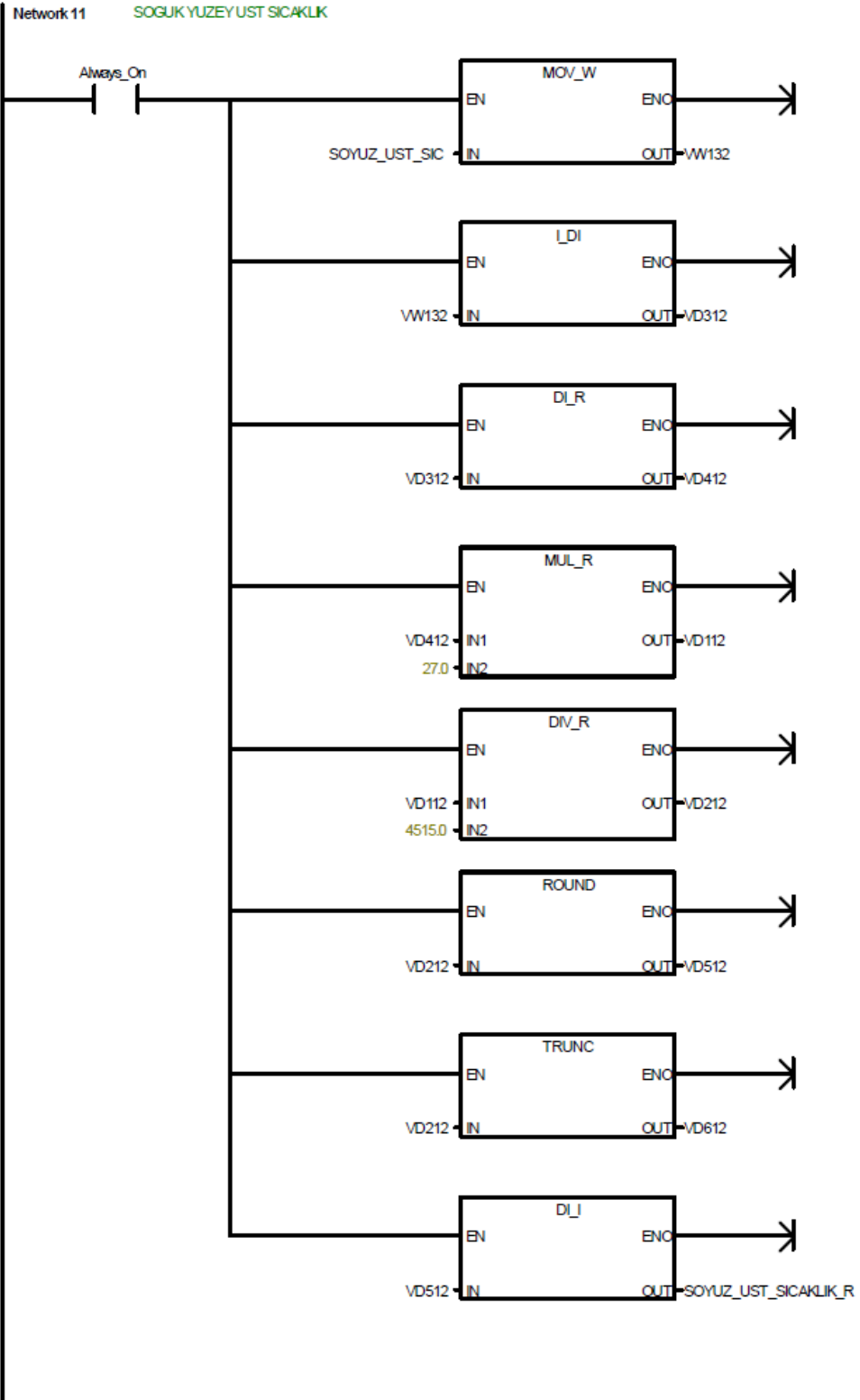


Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SOST_SICAKLIK_R	VW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK R

Network 10

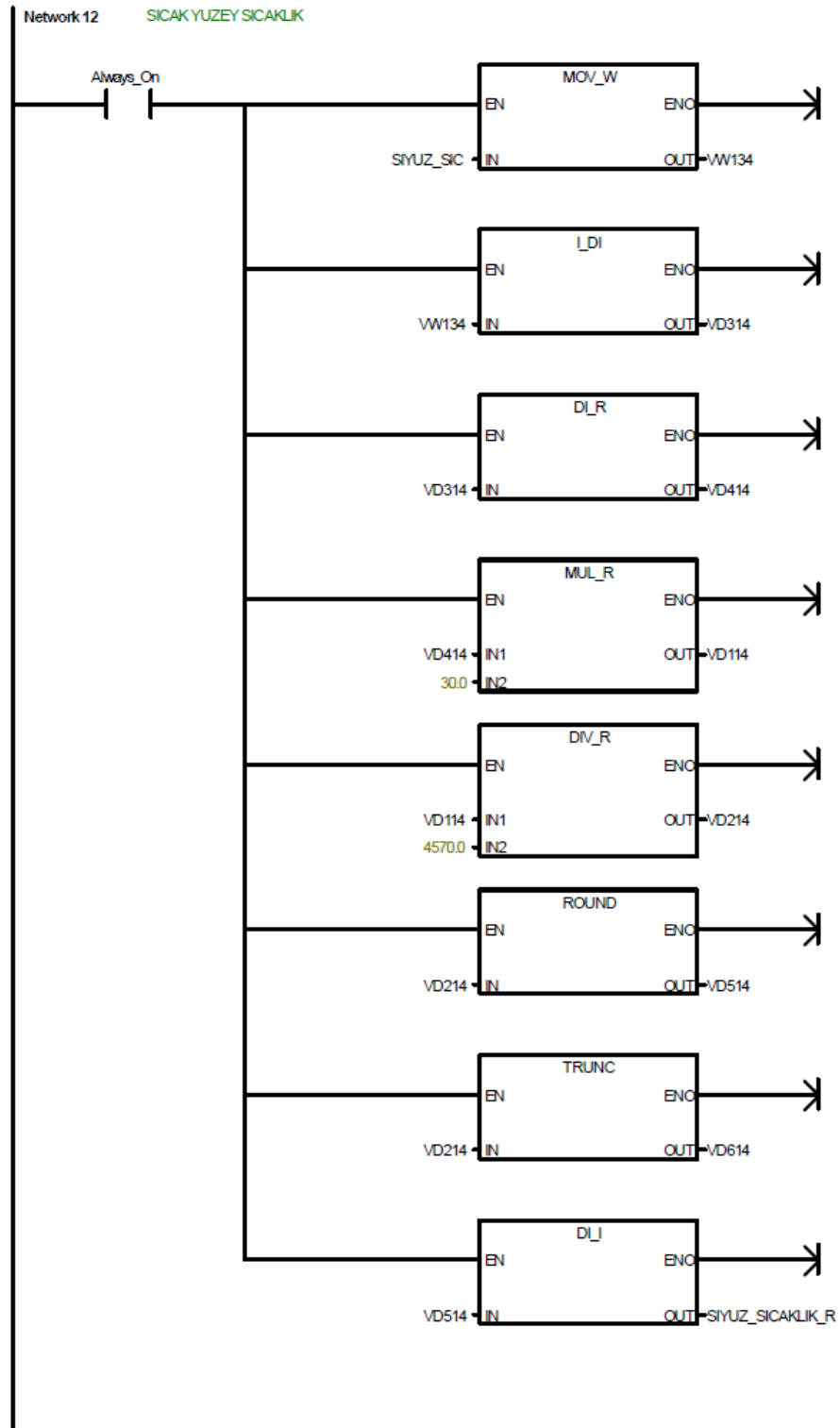


Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SOST_SICAKLIK_R	VW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK R



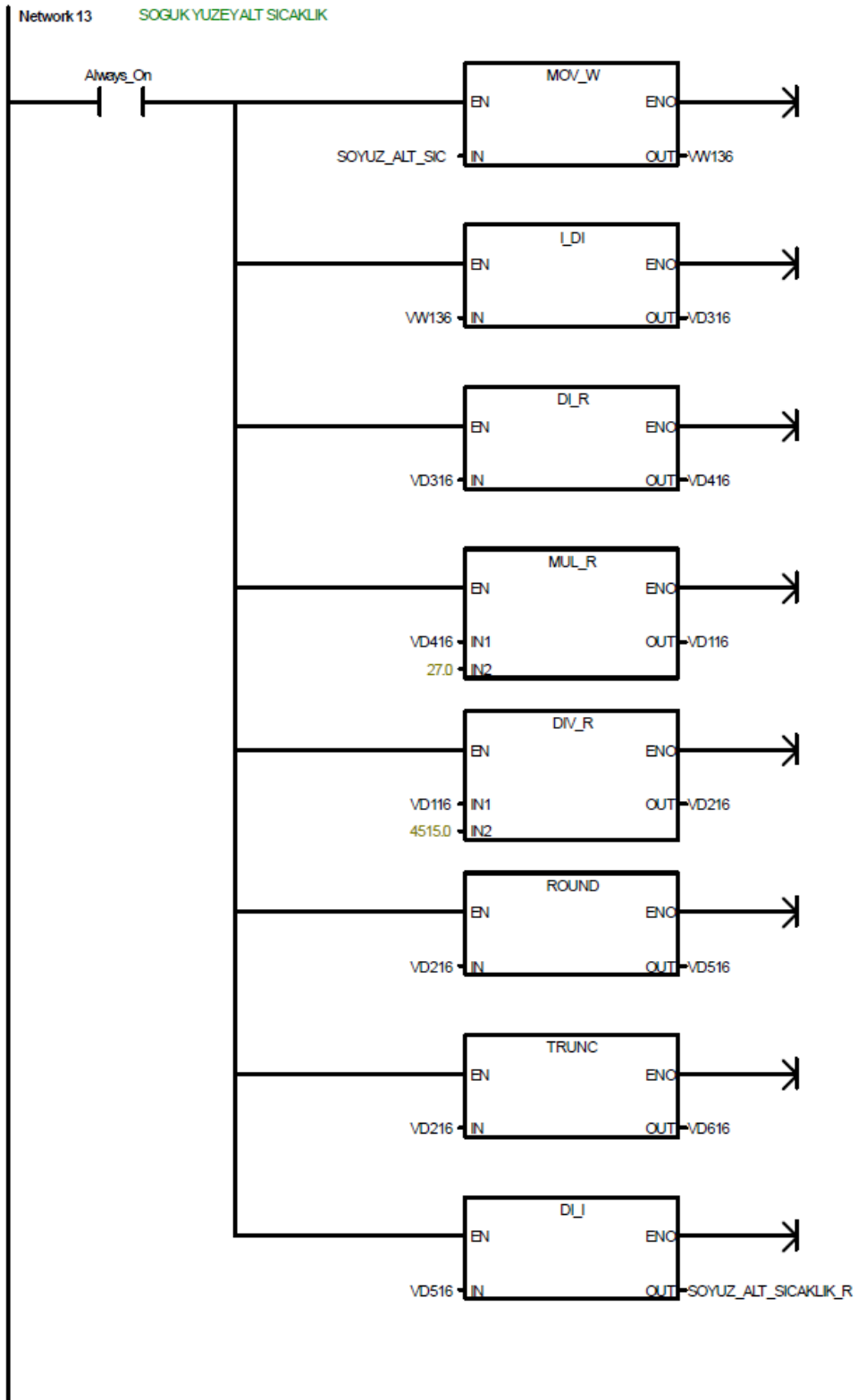
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SOYUZ_UST_SIC	AIW12	SOGUK YUZEY UST SICAKLIK
SOYUZ_UST_SICAKLIK_R	VW12	SOGUK YUZEY UST SICAKLIK R





Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SIYUZ_SIC	AIW14	SICAK YUZEY SICAKLIK
SIYUZ_SICAKLIK_R	VW14	SICAK YUZEY SICAKLIK R

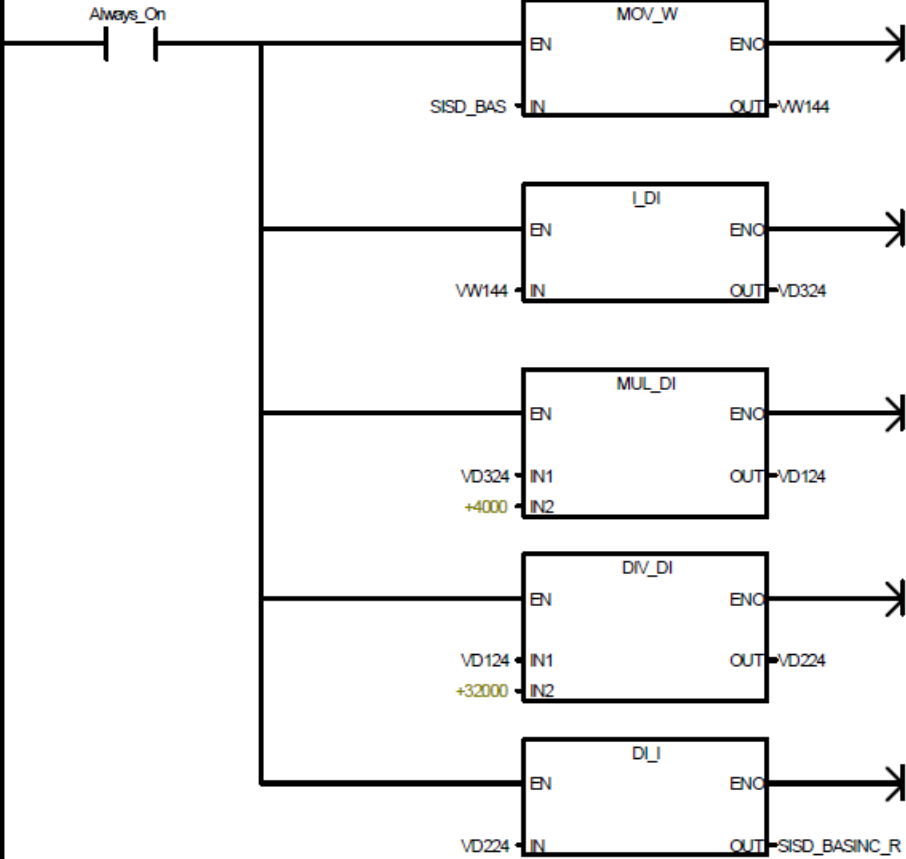




Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SOYUZ_ALT_SIC	AIW16	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK
SOYUZ_ALT_SICAKLIK_R	VW16	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK R

Network 14 SICAK SU DONUS HAT BASINC

Network Comment

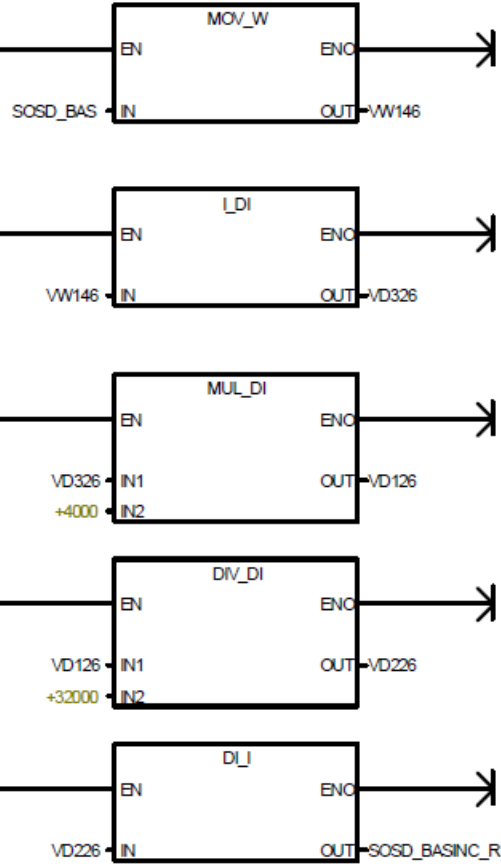


Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SISD_BAS	AIW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC
SISD_BASINC_R	VW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC R

Network 15 SOGUK SU DONUS HAT BASINC

Network Comment

Always_On



Symbol

Always_On

S0SD_BAS

S0SD_BASINC_R

Address

SM0.0

AIW26

VW26

Comment

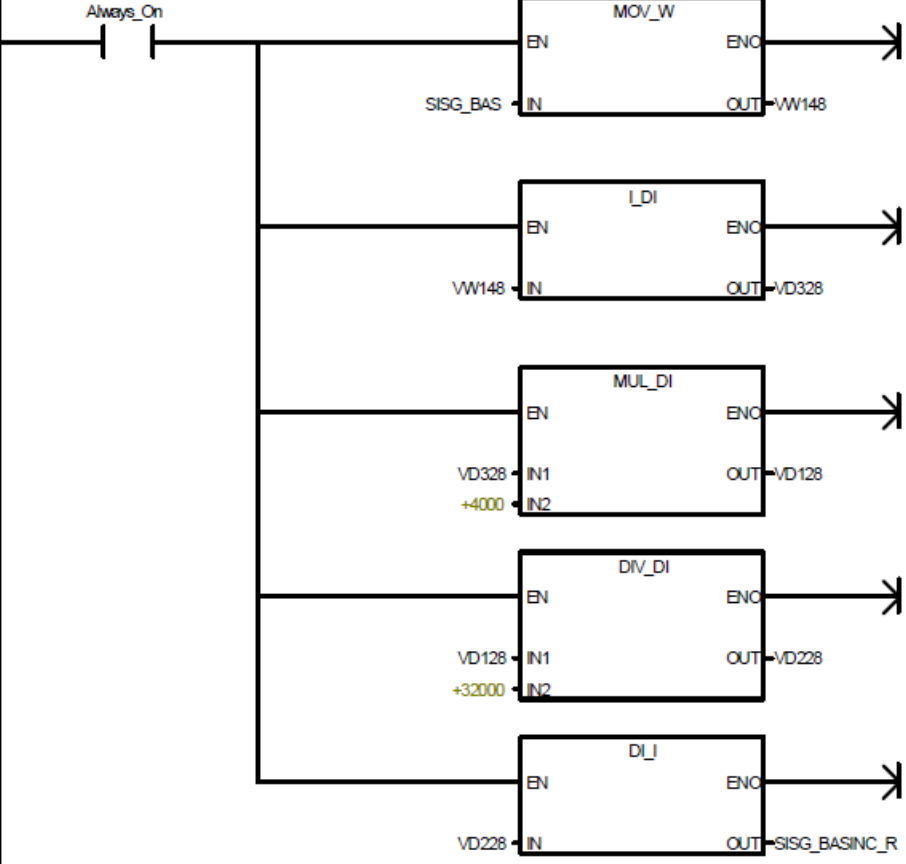
Always ON

SOGUK SU DONUS HAT BASINC

SOGUK SU DONUS HAT BASINC R

Network 16 SICAK SU GELIS HAT BASINC

Network Comment



Symbol
Always_On
SISG_BAS
SISG_BASINC_R

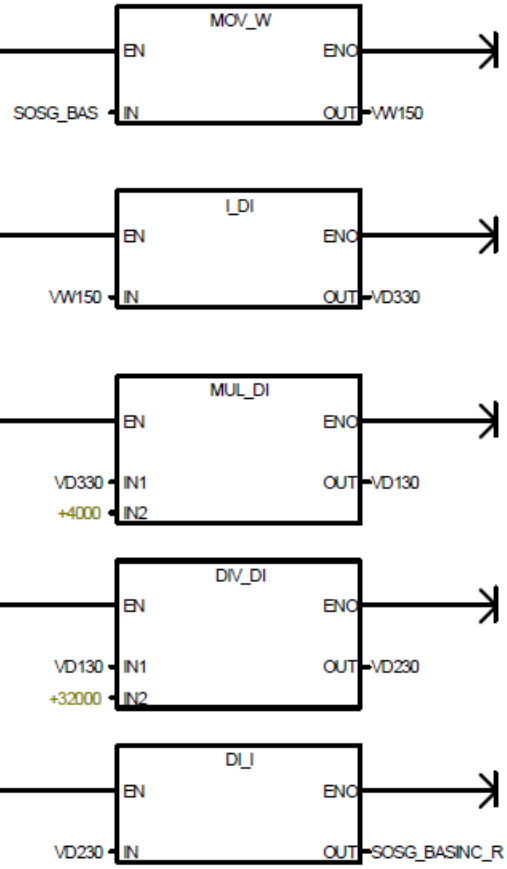
Address
SM0.0
AIW28
VW28

Comment
Always ON
SICAK SU GELIS HAT BASINC
SICAK SU GELIS HAT BASINC R

Network 17 SOGUK SU GELIS HAT BASINC

Network Comment

Always_On



Symbol

Always_On

SOSG_BAS

SOSG_BASINC_R

Address

SM0.0

AIW30

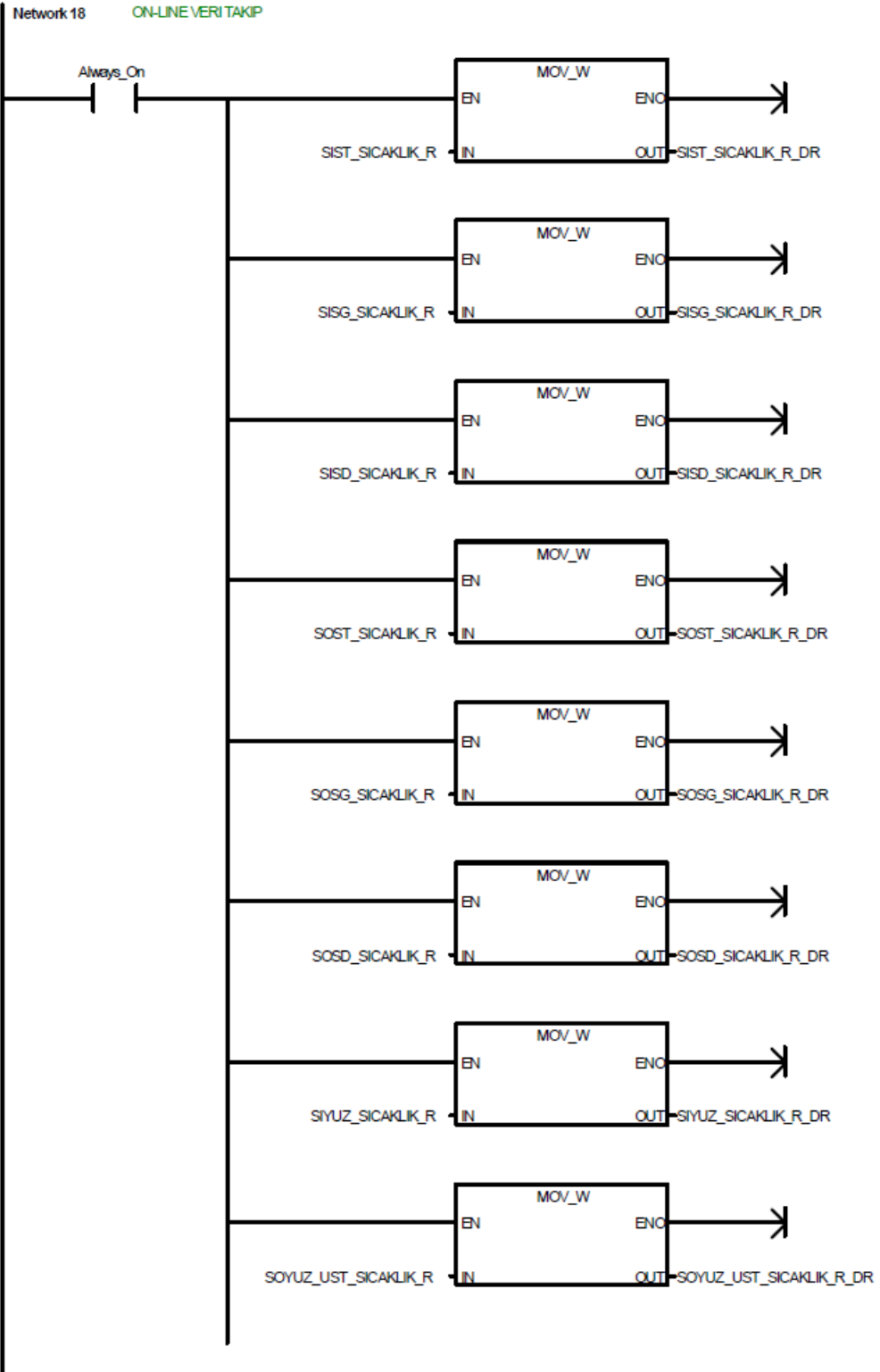
VW30

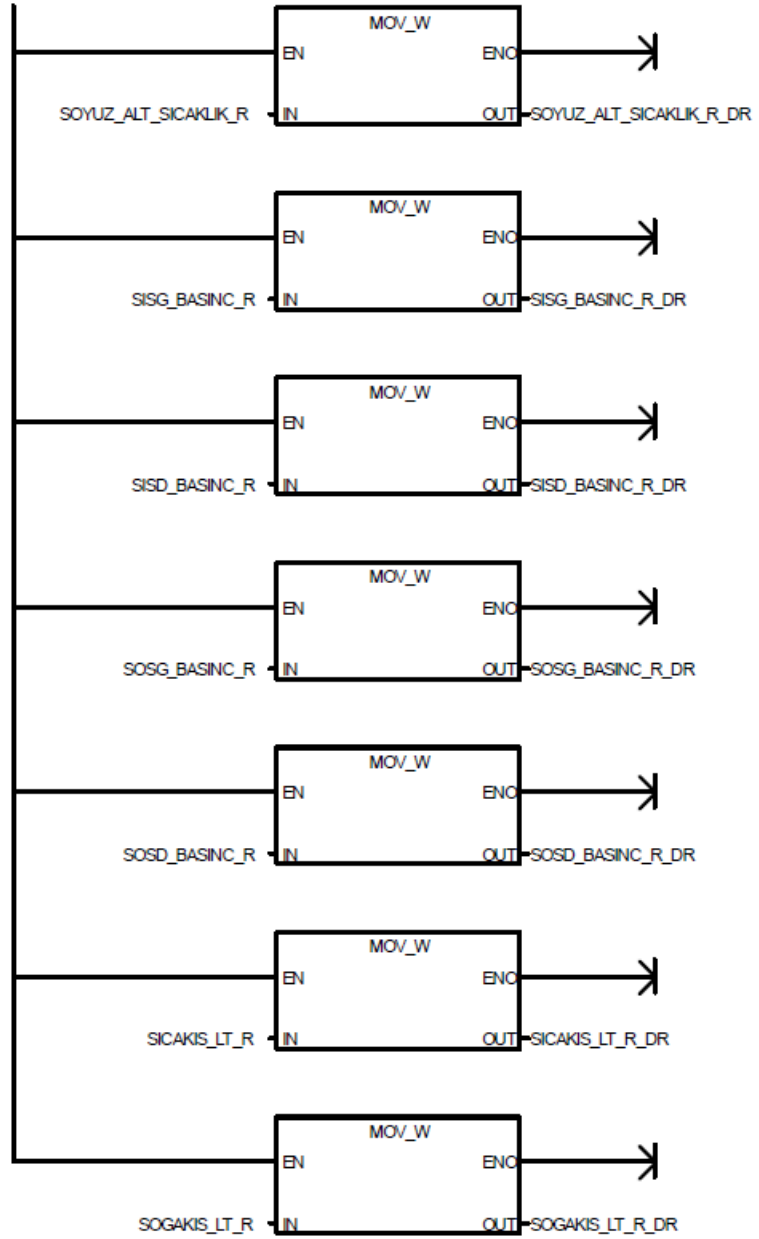
Comment

Always ON

SOGUK SU GELIS HAT BASINC

SOGUK SU GELIS HAT BASINC R

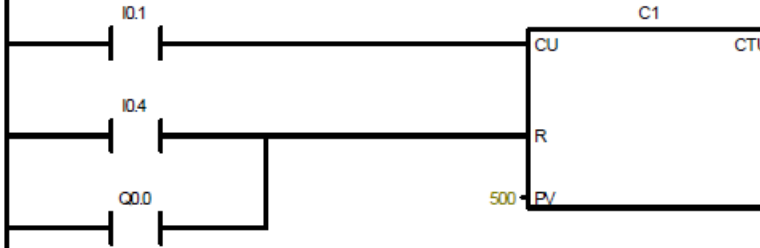




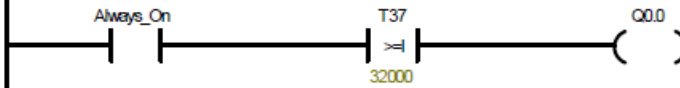
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
SICAKIS_LT_R	VW22	SICAK SU AKIS MIKTARI R
SICAKIS_LT_R_DR	VW676	SICAK SU AKIS MIKTARI
SISD_BASINC_R	VW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC R
SISD_BASINC_R_DR	VW670	SICAKK SU DONUS BASINC
SISD_SICAKLIK_R	VW2	SICAK SU DONUS SICAKLIK R
SISD_SICAKLIK_R_DR	VW652	SISD SICAKLIK
SISG_BASINC_R	VW28	SICAK SU GELIS HAT BASINC R
SISG_BASINC_R_DR	VW668	SICAK SU GELIS BASINC
SISG_SICAKLIK_R	VW6	SICAK SU GELIS SICAKLIK R

SISG_SICAKLIK_R_DR	VW656	SISG SICAKLIK
SIST_SICAKLIK_R	VW0	SICAK SU TANK SICAKLIK R
SIST_SICAKLIK_R_DR	VW650	SIST SICAKLIK
SIYUZ_SICAKLIK_R	VW14	SICAK YUZEY SICAKLIK R
SIYUZ_SICAKLIK_R_DR	VW664	SICAK YUZEY SICAKLIK
SOGAKIS_LT_R	VW20	SOGUK SU AKIS MIKTARI R
SOGAKIS_LT_R_DR	VW678	SOGUK SU AKIS MIKTARI
SOSD_BASINC_R	VW26	SOGUK SU DONUS HAT BASINC R
SOSD_BASINC_R_DR	VW674	SOGUK SU DONUS BASINC
SOSD_SICAKLIK_R	VW4	SOGUK SU DONUS SICAKLIK R
SOSD_SICAKLIK_R_DR	VW654	SOSD SICAKLIK
SOSG_BASINC_R	VW30	SOGUK SU GELIS HAT BASINC R
SOSG_BASINC_R_DR	VW672	SOGUK SU GELIS BASINC
SOSG_SICAKLIK_R	VW8	SOGUK SU GELIS SICAKLIK R
SOSG_SICAKLIK_R_DR	VW658	SOSG SICAKLIK
SOST_SICAKLIK_R	VW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK R
SOST_SICAKLIK_R_DR	VW660	SOST SICAKLIK
SOYUZ_ALT_SICAKLIK_R	VW16	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK R
SOYUZ_ALT_SICAKLIK_R_DR	VW666	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK
SOYUZ_UST_SICAKLIK_R	VW12	SOGUK YUZEY UST SICAKLIK R
SOYUZ_UST_SICAKLIK_R_DR	VW662	SOGUK UST YUZEY SICAKLIK

Network 19 SICAK SU AKIS MIKTARI

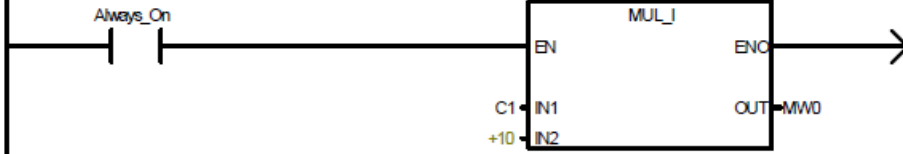


Network 20 SICAK SU AKIS MIKTARI

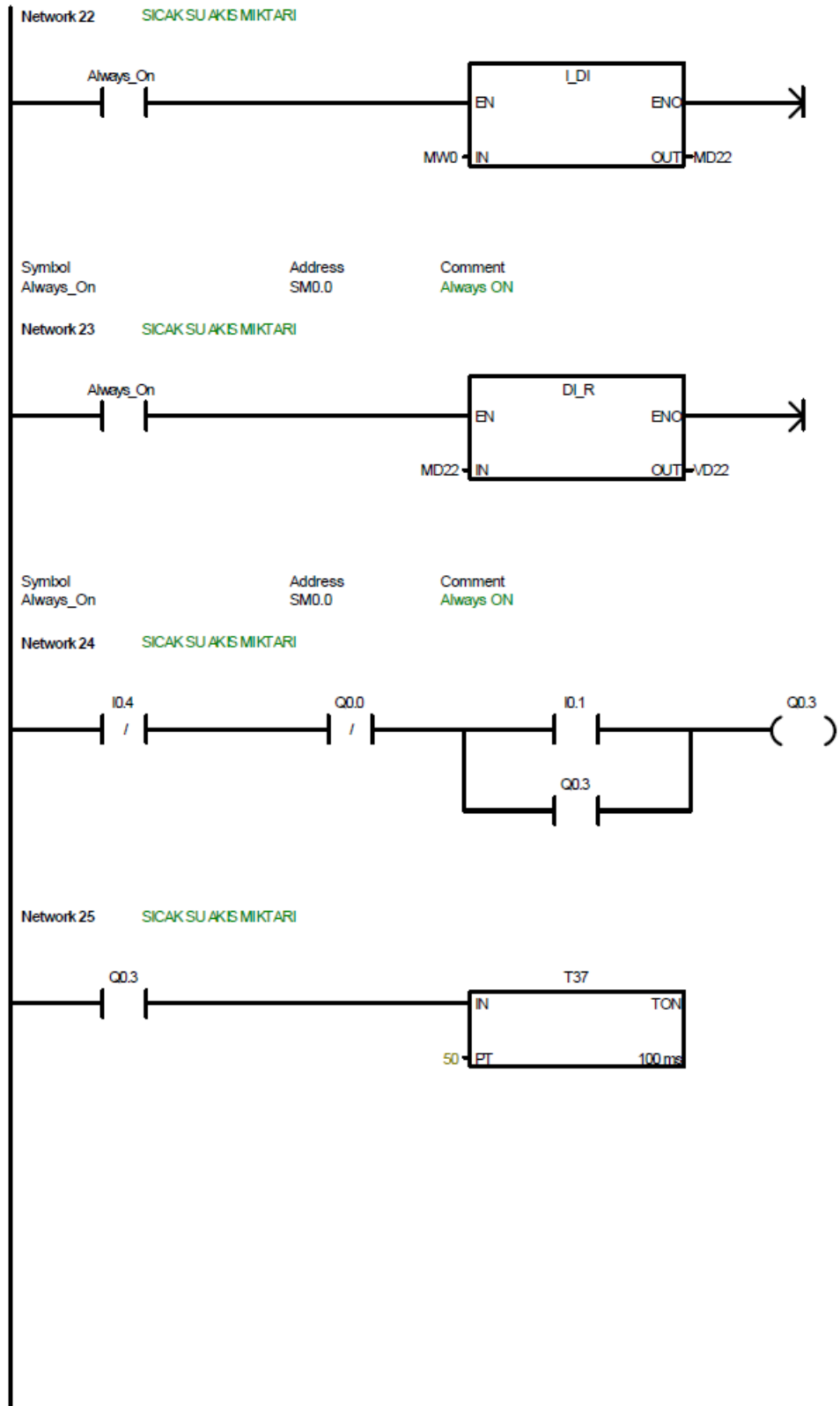


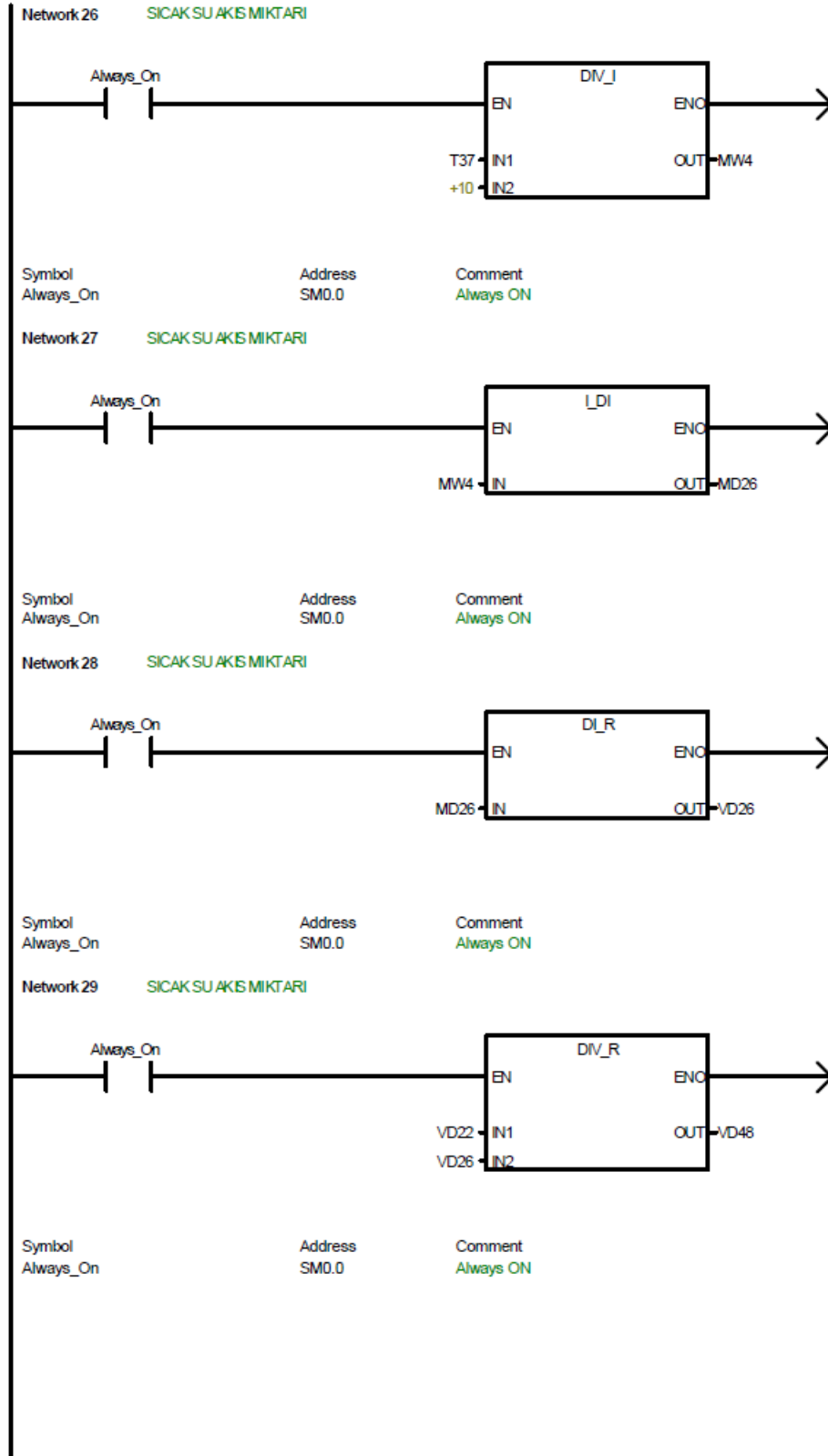
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON

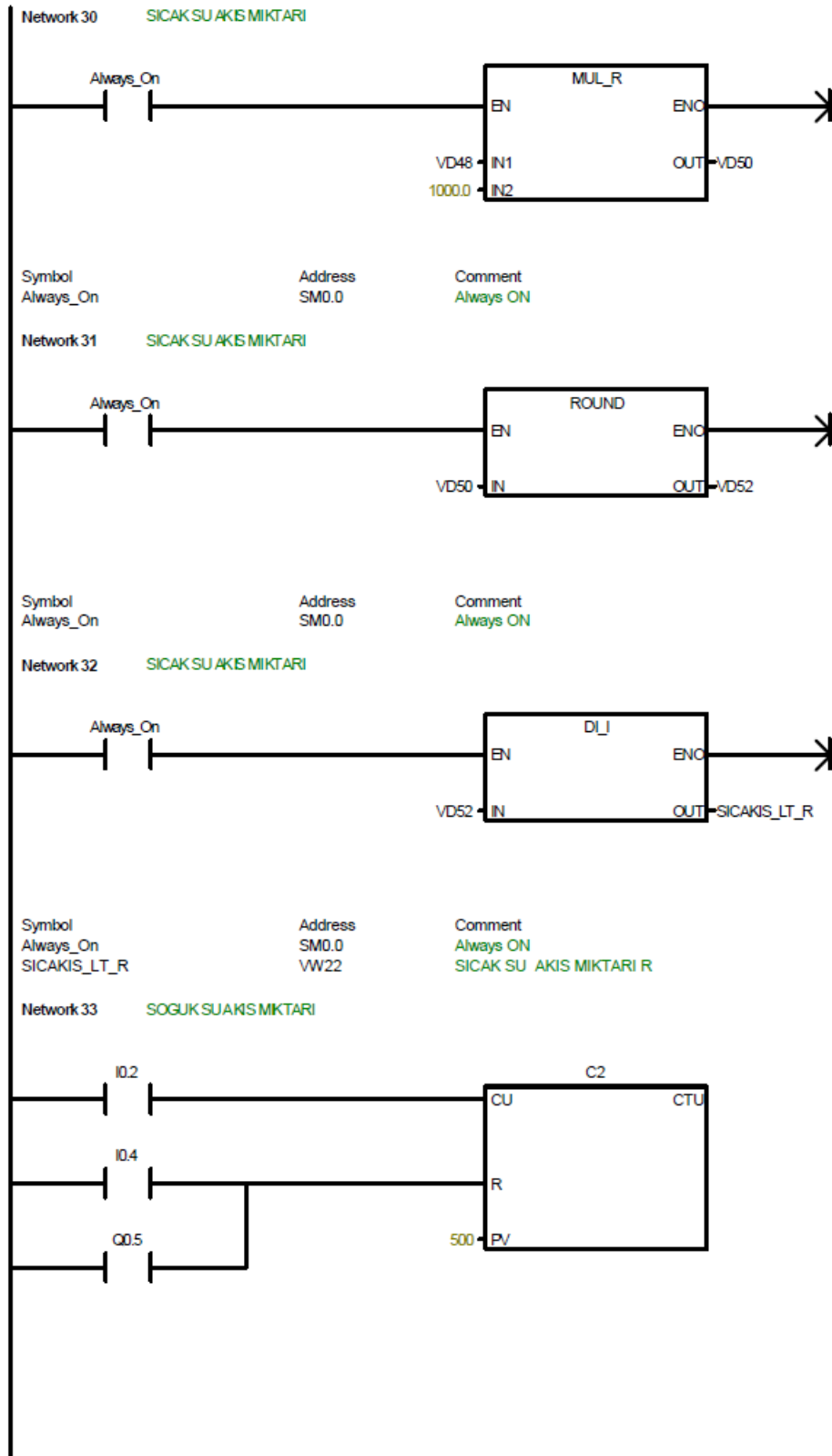
Network 21 SICAK SU AKIS MIKTARI

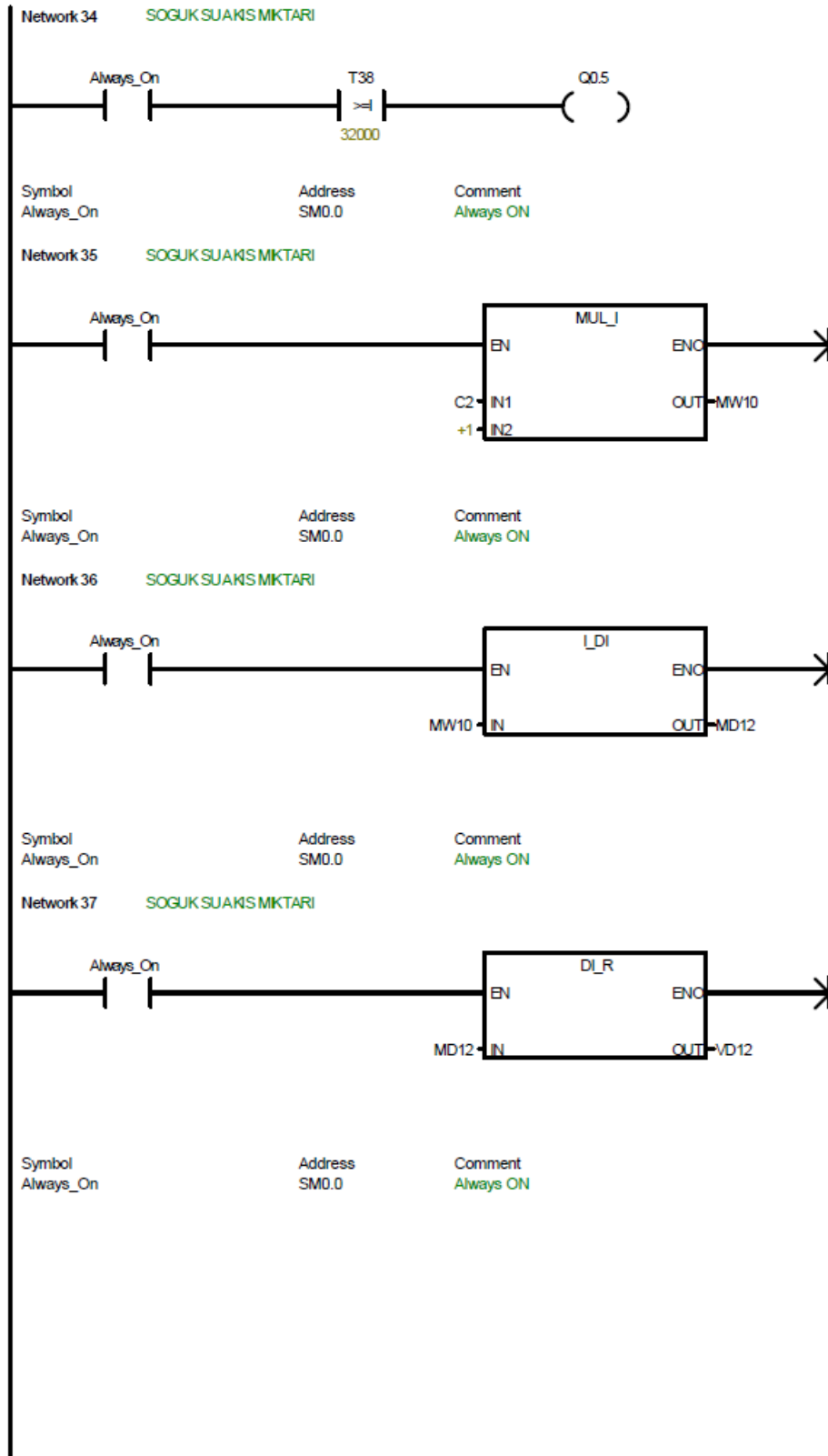


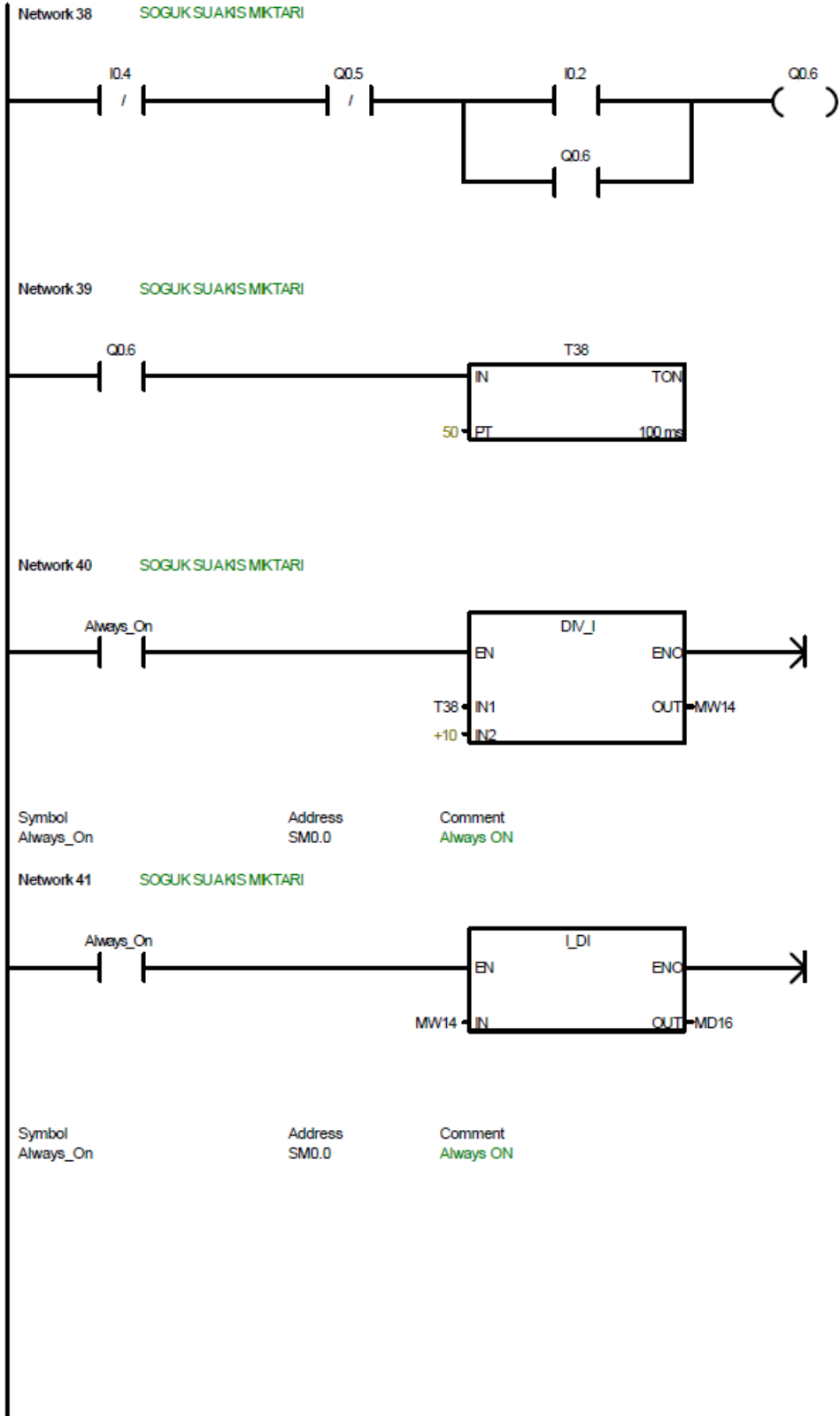
Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON

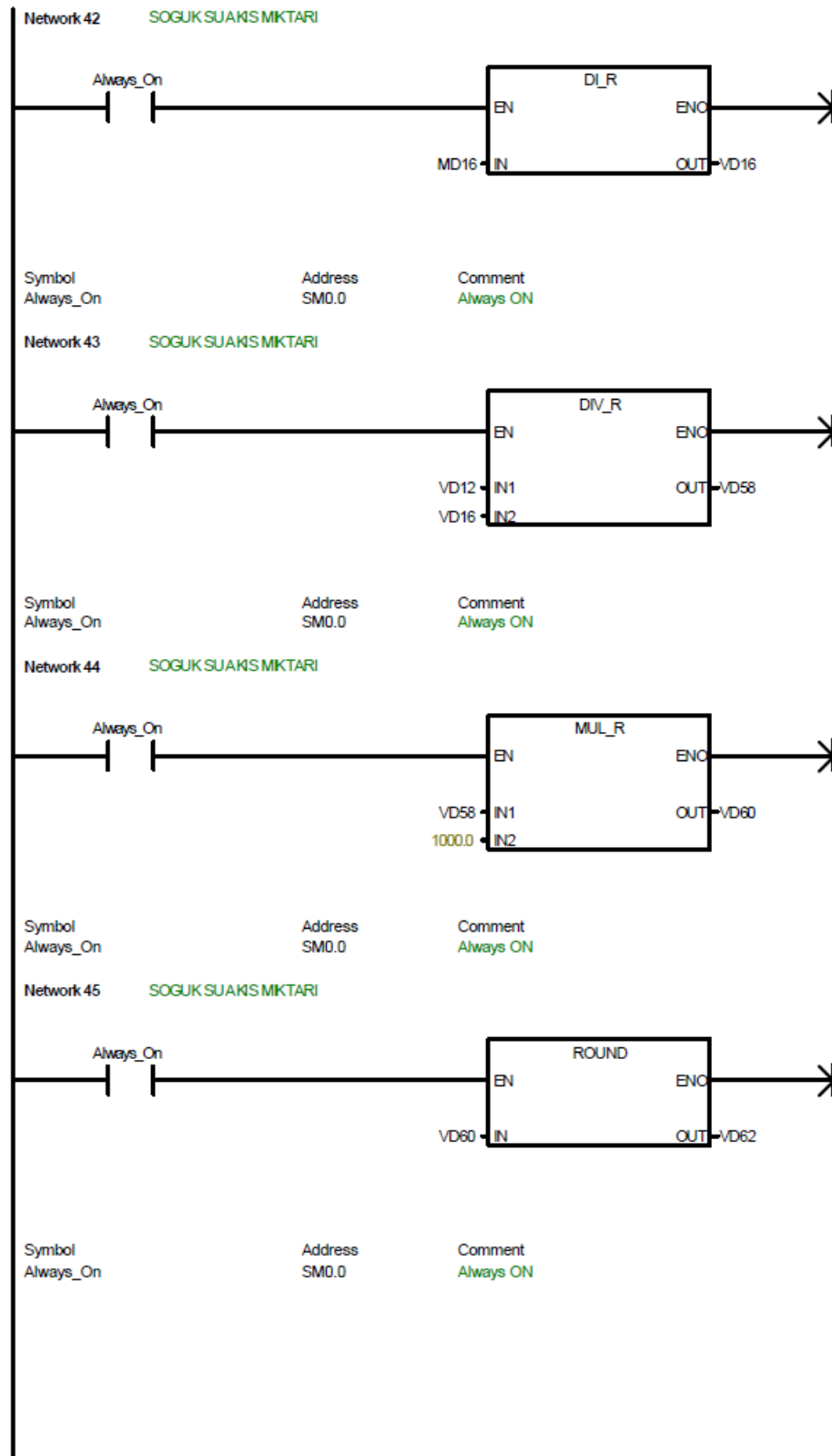


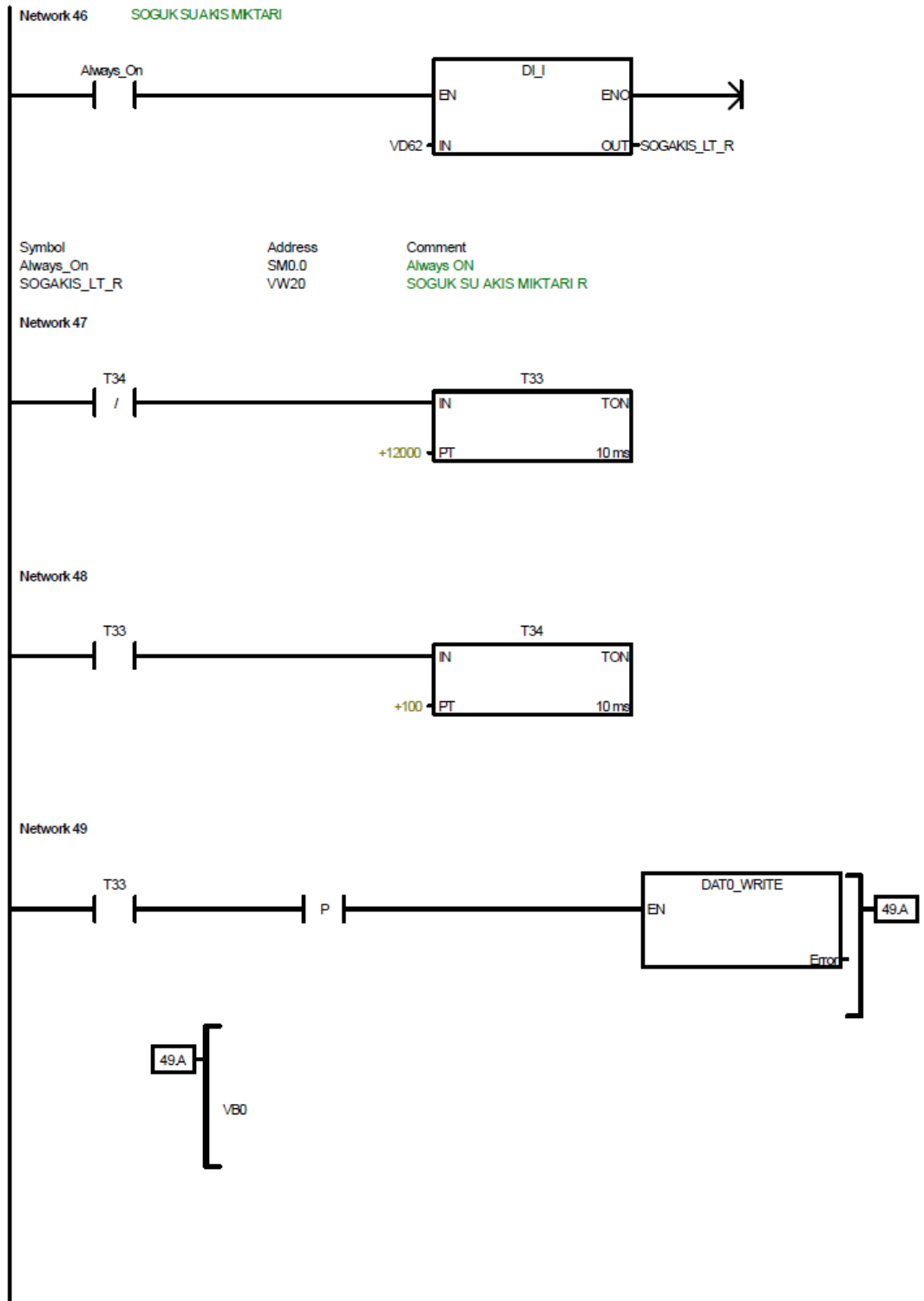












  Symbol	Address	Comment
SIST_SIC	AIW0	SICAK SU TANK SICAKLIK ANIN
SISD_SIC	AIW2	SICAK SU DONUS SICAKLIK
SOSD_SIC	AIW4	SOGUK SU DONUS SICAKLIK
SISG_SIC	AIW6	SICAK SU GELIS SICAKLIK
SOSG_SIC	AIW8	SOGUK SU GELIS SICAKLIK
SOST_SIC	AIW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK
SOYUZ_UST_SIC	AIW12	SOGUK YUZEY UST SICAKLIK
SIYUZ_SIC	AIW14	SICAK YUZEY SICAKLIK
SOYUZ_ALT_SIC	AIW16	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK
SISD_BAS	AIW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC
SOSD_BAS	AIW26	SOGUK SU DONUS HAT BASINC
SISG_BAS	AIW28	SICAK SU GELIS HAT BASINC
SOSG_BAS	AIW30	SOGUK SU GELIS HAT BASINC
	AIW32	
	AIW34	
SIST_SICAKLIK_R	VW0	SICAK SU TANK SICAKLIK R
SISD_SICAKLIK_R	VW2	SICAK SU DONUS SICAKLIK R
SOSD_SICAKLIK_R	VW4	SOGUK SU DONUS SICAKLIK R
SISG_SICAKLIK_R	VW6	SICAK SU GELIS SICAKLIK R
SOSG_SICAKLIK_R	VW8	SOGUK SU GELIS SICAKLIK R
SOST_SICAKLIK_R	VW10	SOGUK SU TANK SICAKLIK R
SOYUZ_UST_SICAKLIK_R	VW12	SOGUK YUZEY UST SICAKLIK R
SIYUZ_SICAKLIK_R	VW14	SICAK YUZEY SICAKLIK R
SOYUZ_ALT_SICAKLIK_R	VW16	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK R
SICAKIS_LT_R	VW22	SICAK SU AKIS MIKTARI R
SOGAKIS_LT_R	VW20	SOGUK SU AKIS MIKTARI R
SISD_BASINC_R	VW24	SICAK SU DONUS HAT BASINC R
SOSD_BASINC_R	VW26	SOGUK SU DONUS HAT BASINC R
SISG_BASINC_R	VW28	SICAK SU GELIS HAT BASINC R
SOSG_BASINC_R	VW30	SOGUK SU GELIS HAT BASINC R
	VW32	
	VW34	
	VW40	
	VW42	
	VW44	
	VW46	
	VW48	

  Symbol	Address	Comment
SOGAKIS_LT_R_DR	VW678	SOGUK SU AKIS MIKTARI
SICAKIS_LT_R_DR	VW676	SICAK SU AKIS MIKTARI
SOSD_BASINC_R_DR	VW674	SOGUK SU DONUS BASINC
SOSG_BASINC_R_DR	VW672	SOGUK SU GELIS BASINC
SISD_BASINC_R_DR	VW670	SICAK SU DONUS BASINC
SISG_BASINC_R_DR	VW668	SICAK SU GELIS BASINC
SOYUZ_ALT_SICAKLIK_R_DR	VW666	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK
SIYUZ_SICAKLIK_R_DR	VW664	SICAK YUZEY SICAKLIK
SOYUZ_UST_SICAKLIK_R_DR	VW662	SOGUK UST YUZEY SICAKLIK
SOST_SICAKLIK_R_DR	VW660	SOST SICAKLIK
SOSG_SICAKLIK_R_DR	VW658	SOSG SICAKLIK
SISG_SICAKLIK_R_DR	VW656	SISG SICAKLIK
SOSD_SICAKLIK_R_DR	VW654	SOSD SICAKLIK
SISD_SICAKLIK_R_DR	VW652	SISD SICAKLIK
SIST_SICAKLIK_R_DR	VW650	SIST SICAKLIK

Type of Wizard Configuration

Data Log Wizard

Name of Wizard Configuration

DAT Configuration 0

Created: 10/13/19 11:41:03 AM

Last Modified: 07/12/21 06:53:15 PM

Project Components Generated by this Wizard Configuration

- Subroutine "DAT0_WRITE"
- Global Symbol Table "DAT0_SYM"
- Data page "DAT0_DATA" for the data log configuration at (VB650-VB679)
- The logged data may use up to approximately 39000 bytes in the Memory Cartridge

Usage Instructions

The subroutine DAT0_WRITE should be called to log the current values of the data log fields to the memory cartridge.

Data Log Options

Maximum number of data log records: 1000

Date Stamping: Enabled

Time Stamping: Enabled

Clear Data on Upload: Enabled

Data Log Definition

<u>Field Name</u>	<u>Data Type</u>	<u>Comment</u>
SIST_SICAKLIK_R_DR	WORD	SIST SICAKLIK
SISD_SICAKLIK_R_DR	WORD	SISD SICAKLIK
SOSD_SICAKLIK_R_DR	WORD	SOSD SICAKLIK
SISG_SICAKLIK_R_DR	WORD	SISG SICAKLIK
SOSG_SICAKLIK_R_DR	WORD	SOSG SICAKLIK
SOST_SICAKLIK_R_DR	WORD	SOST SICAKLIK
SOYUZ_UST_SICAKLIK	WORD	SOGUK UST YUZEY SICAKLIK
SIYUZ_SICAKLIK_R_DR	WORD	SICAK YUZEY SICAKLIK
SOYUZ_ALT_SICAKLIK	WORD	SOGUK YUZEY ALT SICAKLIK
SISG_BASINC_R_DR	WORD	SICAK SU GELIS BASINC
SISD_BASINC_R_DR	WORD	SICAKK SU DONUS BASINC
SOSG_BASINC_R_DR	WORD	SOGUK SU GELIS BASINC
SOSD_BASINC_R_DR	WORD	SOGUK SU DONUS BASINC
SICAKIS_LT_R_DR	WORD	SICAK SU AKIS MIKTARI
SOGAKIS_LT_R_DR	WORD	SOGUK SU AKIS MIKTARI