

10 MW'LIK SDU GÜNEŞ GÜÇ KULESİ TESİS TASARIMI

Ramazan ŞENOL*, İbrahim ÜÇGÜL, Arif KOYUN, Mustafa ACAR

*SDÜ Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arş. Ve Uyg. Merkezi, Isparta,
rsenol@sdu.edu.tr

(Geliş/Received: 03.01.2011; Kabul/Accepted: 11.05.2011)

ÖZET

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ile elektrik üretim metodu olan güneş güç kulesi sistemi ele alınmıştır. Çalışmada güneş güç kulesi sistemindeki aynaların güneşi takip ederek kule üzerindeki alıcı sisteme odaklaması için yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan faydalanarak Süleyman Demirel Üniversitesi'nde 10 MW gücünde güneş güç kulesi kurmak için gerekli olan ayna sayısı, ayna boyutları, kule yüksekliği, alan yarı çapı, vb., dizayn parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca bu sistemde kullanılan heliostat ve otomatik kontrol sistemlerinin maliyet analizleri yapılmıştır. Geliştirilen bilgisayar yazılımları ve otomatik kontrol ünitesi ile aynalar gün boyu çalıştırılarak ortaya çıkan izleme hataları belirlenmiştir. Sonuç olarak 10 MW gücündeki bir tesis için gerekli olan tüm dizayn parametreleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Güneş Güç Kulesi, Heliostat, Elektrik Enerjisi

10 MW SDU SOLAR POWER TOWER PLANT DESIGN

ABSTRACT

In this study, which is a method of producing electricity from renewable energy sources, solar power tower system is investigated. Various programs have been developed for tracking the sun's position and concentrating the captured solar radiation to the receiver by heliostat mirror. By using this software, design parameters, which are a number of mirrors, mirror size, tower height, radius of the area, have been obtained for 10 MW SDU solar power tower. Also, cost analyses were made for heliostat and automation systems which are used in this project. Heliostat mirrors were operated with using the developed software and automation system during the test period, and obtained tracking errors. As a result, all design parameters for a 10 MW power plant have been obtained.

Keywords: Solar Energy, Solar Power Tower, Heliostat, Electric Energy

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güneş güç kuleleri (*Solar Power Tower*), güneş ışınlarını kule tepesine monte edilmiş olan ısı değiştiriciye (alıcı) yoğunlaştırarak ısı enerjiden elektrik enerjisi üretir. Sistemde, gelen güneş ışınlarını yansıtan ve heliostat olarak adlandırılan, çok sayıda güneş izleme ve yansıtma aynaları kullanılır. Güneş güç kulesi sisteminde, iki eksenli izleyici heliostat aynalar, güneş enerjisini, kulenin tepesine merkezi bir şekilde yerleştirilmiş olan alıcıya yansıtırlar. Burada, alıcıya gelen güneş enerjisi, çalışma akışkanı (gaz veya tuz eriyiği) tarafından absorbe edilir ve sonra toplanan ısı buhar üretiminde kullanılır. Üretilen buhar bir buhar güç çevriminde kullanılarak elektrik üretilir. Örnek bir güneş güç kulesi tesisi şekil 1'de görülmektedir. Hildebrandt ve

arkadaşları [2], Lorin ve Hull [3], Kribus ve arkadaşları [4] güneş kulesi ile elektrik üretimi kavramını tanımlamışlardır. Lorin ve Hull [5] güneş güç kulesi tesisinde heliostat alan düzenlemesi yapılırken maksimum güç eldesi için optik sistemin analizini yapmışlardır. Siala ve Elayeb [6] bir güneş güç kulesi tesisi için grafiksel metot yardımıyla heliostat dizayn çalışmasını ele almış ve matematiksel bir formülasyon yardımıyla alanın dizaynını grafiksel olarak gerçekleştirmişlerdir. Collado [7] heliostat alan düzenlemeleri için engelleme ve gölgeleme kayıplarını incelemiştir. Kribus ve arkadaşları [4] güneş kulesi ile elektrik üretimi için dizayn edilen sistemlere uygun olabilecek alıcı tasarımlarını incelemiş ve sıcaklık ile güç çıkışının nasıl değiştiğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 1. PS10 tesisinden bir görüntü [1]. (PS10 plant)

Segal ve Epstein [8] alıcı çalışma sıcaklığı ve heliostat alan yoğunluğu gibi dizayn parametreleri için bir optimizasyon metodu üzerine çalışmışlardır. Chen ve arkadaşları [9] iki farklı heliostat tasarımı için performans analizleri yaparak heliostat malzemeleri aynı olduğu halde sadece heliostat geometrileri değiştirilerek daha yüksek performans elde etmeye çalışmışlardır. Kribus ve arkadaşları [10] heliostatlarda güneş izleme ve kuleye yansıtma esnasında oluşan hataların ortadan kaldırılmasına yönelik bir uygulama yapmışlardır. Klasik heliostat sistemlerinde açık kontrol tekniği uygulanmakta ve ortaya çıkan hatalar manuel olarak bertaraf edilmektedir. Kribus ve diğerleri izleme ve yansıtma tekniğinde heliostatları kapalı kontrol ile çalıştırıp ortaya çıkan hataları otomatik olarak ortadan kaldırmışlardır.

Bu çalışma, heliostat alan yerleşimi için Siala ve Elayeb [6] tarafından önerilen metoda dayanarak tarafımızca geliştirilen görsel ve grafiksel bir yazılım yardımıyla elde edilen optimum ayna boyutu, ayna sayısı, dağılım açısı, kule yüksekliği, alan yarıçapı ve grafiksel olarak elde edilen alan yerleşimini incelemektedir. Ayrıca Eltez [11] tarafından öne sürülen heliostatların güneşi ve kuleyi izlemelerine olanak veren metot temel alınarak, tarafımızca geliştirilen bir yazılım ile izleme için gerekli olan “S” ve “Ay” açıları elde edilmiştir. Bu açıları geliştirilen heliostat kontrol yazılımına yüklenerek izleme hataları gözlemlenmiştir. Bütün bu verilere dayanarak 10 MW gücündeki SDU güneş güç kulesi tesisinin dizayn parametreleri elde edilmiştir. Bu çalışma ülkemiz coğrafi koşulları için yapılmış olan ilk tesis dizaynı olma özelliğini de taşımaktadır.

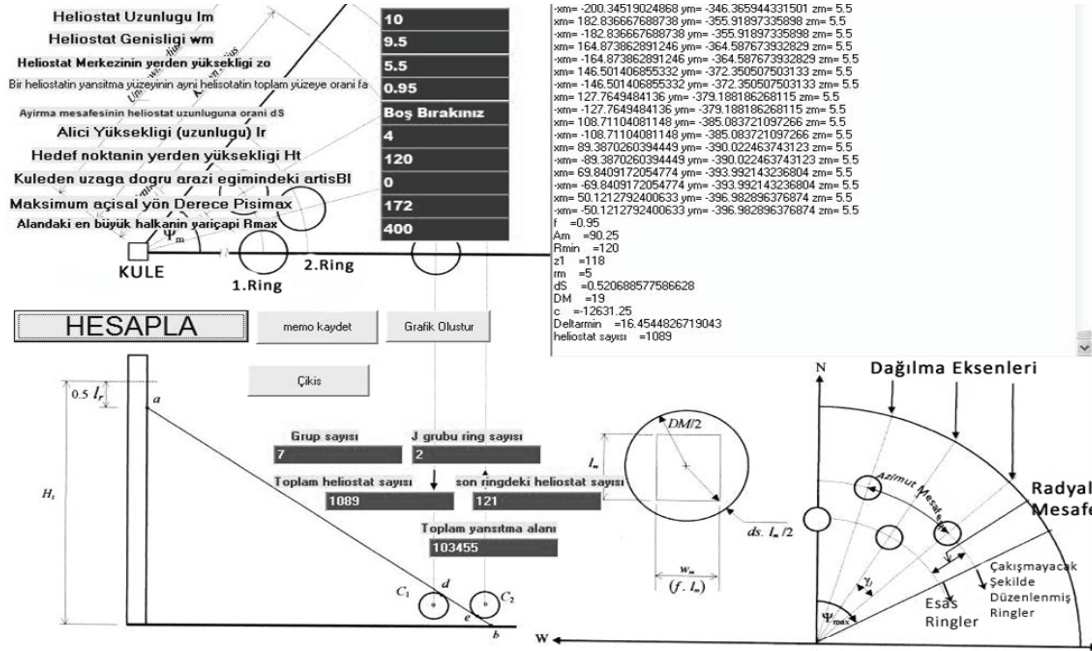
2. SİSTEM DİZAYNI (SYSTEM DESIGN)

2.1. Heliostat Alan Ayna Düzenlemesi (Heliostat Field Layout)

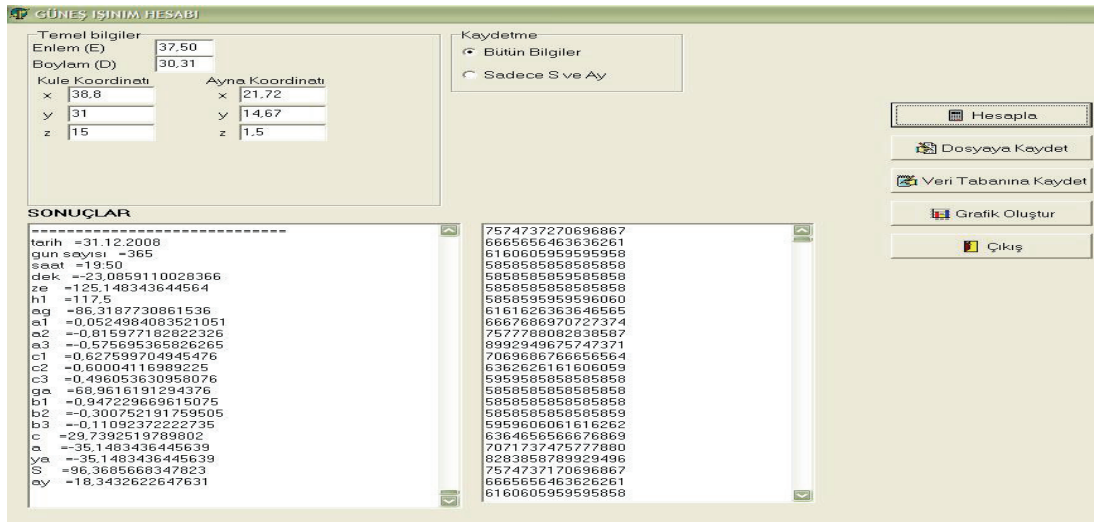
Heliostat alanın uygun bir biçimde düzenlenmesi sistem performansı, tesisin yıllık verimi ve ekonomiklik açısından oldukça önemlidir. Örneğin kule yüksekliğinin en uygun değerinin belirlenmesi, heliostat boyutlarının uygun seçimi, alanın etkin kullanımı, heliostatların birbirlerini gölgelememesi için uygun koordinatların tespiti gibi oldukça önemli parametreler çözümlenmelidir. Siala ve Elayeb [6] tarafından öne sürülen heliostat alan dizaynı metodu alandaki tüm heliostatların birbirlerini engellemeden ve gölgelemeden yerleştirilmelerini sağlayan ve dünya genelinde kabul görmüş olan en önemli çalışmalardan birisidir. Bu metot temel alınarak geliştirilen HELIOYER isimli yazılım ile heliostatların alana engellemez ve gölgelemesiz yerleşimi sağlanmış ve yerleşim şekli grafiksel olarak elde edilmiştir. Bu yöntemde esas olan, alanın halkalara ayrılması ve her halkaya heliostatların uygun biçimde yerleşiminin sağlanmasıdır. Bunun için bir halkanın yarı çapı belirlendikten sonra bir sonraki halkanın yarı çapının alması gereken değerler ve heliostatların yerleri belirlenmelidir. Verilen bir güç değeri için heliostat uzunluğu, heliostat boyu, heliostat merkezinin yerden yüksekliği, alıcının boyutları, hedef noktanın yerden yüksekliği, arazi eğimi, açılal yön ve gerekli olan alan yarıçapı gibi parametreler programa girilerek optimum ayna boyutu, alıcı boyutu (silindirik), kule yüksekliği, alan yarıçapı ve heliostatların yerleşim koordinatları elde edilmiştir. Bu yazılım ile incelenen ayna boyutları; 5x5 m, 6x5 m, 6x6 m, 6x7 m, 7x6 m, 8x7 m, 10x9,5 m ve 11x10 m' dir. Yazılımda 10 MW lık bir tesis için incelenen alan yarıçapları ise 350 m, 380 m ve 400 m'dir. İncelenen kule yükseklikleri ise 60 m, 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 120 m ve 150 m'dir. 10 MW gücündeki bir tesis için tüm bu parametreler incelenerek elde edilen bulgular sonuçlar bölümünde verilmiştir. Yazılıma ait ekran görüntüsü şekil 2' de görülmektedir.

2.2. İzleme ve Yansıtma Açılı (Tracking and Reflecting Angle)

Heliostatların gün boyu hareketlerini belirlemek kule tepesine monte edilen alıcıda gerekli olan ısı enerjisinin temini için oldukça önemlidir. Her bir heliostat için gerekli olan iki eksen izleme açıları olan “S” yüzey elemanın yatay düzleme yaptığı açı ve “Ay” yüzey azimut açısı belirlenirken kule koordinatları, kule ve alıcının ebatları ve yerden yükseklikleri ile her bir heliostatın koordinat bilgileri



Şekil 2. HELIOYER programının veri girişi ekran görüntüsü. (HELIOYER software screen shot)



Şekil 3. HELIOACIR programı veri girişi ekran görüntüsü. (HELIOACIR software screen shot)

ile ebatları bilinmelidir. HELIOYER programı ile elde edilen heliostat boyutları, yerleşim koordinatları ve kule yüksekliği vd. parametreler geliştirilen HELIOACIR programına girilerek her bir heliostat için gerekli olan "S" ve "Ay" açıları elde edilmiştir. Hesaplama kullanılan Programın hazırlanmasında seçilen yöntem Eltez [11] tarafından öne sürülen metodu esas almaktadır. Her bir heliostat için 1 yıl boyunca sabah saat 06:00 ile akşam saat 20:00 arasında her iki eksen için gerekli olan açıların hesaplaması yapılmıştır. Programa ait ekran görüntüsü şekil 3'te sunulmuştur. Programa girilen enlem, boylam, ayna koordinatları, kule koordinatları gibi değerler kullanılarak deklinasyon açısı, zenit, S, Ay vb. pek çok parametre hesaplanmaktadır. İstenildiği takdirde tüm bu değerlere ve grafiksel sonuçlara program ara yüzünden ulaşılabilir.

2.3. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

Sistemin mekanik dizaynı 5x5 m ve daha büyük ebatlardaki heliostatlar göz önüne alınarak yapılmıştır. İmalatı yapılmış olan sistem şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görülen bu aynanın boyutları 1x1 m'dir. Sistemdeki motorlar, sürücüler, sensörler ve kontrol ekipmanları ise 5x5 m ve daha büyük ebatları heliostatlara uygun olacak bir biçimde uygulanmıştır.

2.4. Heliostat Kontrolü (Heliostat Control)

Heliostatların güneşi izlemeleri ve kuleye yansıtma yapmalarını sağlayabilmek için HELIOSRM isimli bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım oldukça basit ama bir o kadar da karmaşıktır. PIC Basic ile geliştirilen

yazılım için kullanılan mikro işlemci ise PIC16F877 [12] dir.

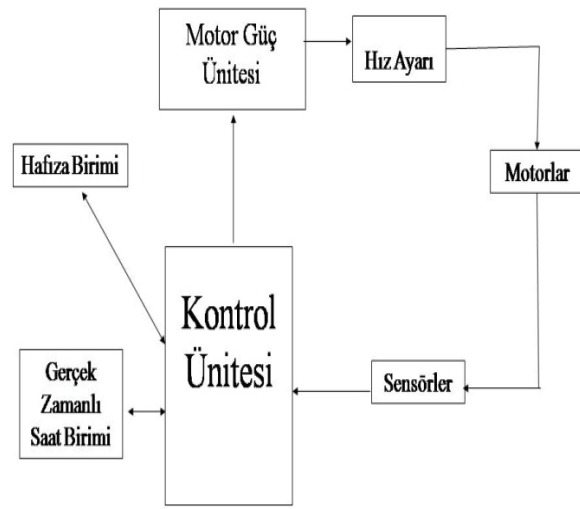


Şekil 4. İmalatı yapılan heliostatın deneme ve ayar anından bir görüntü. (Tracking test images: Picture of the experiment model)

3. SİSTEMİN ÇALIŞMASI (SYSTEM OPERATION)

Alan yerleşimi ve yerleri HELIOYER ile belirlenen aynalar için HELIOACIR ile hesaplanmış olan açı değerleri HELIOSHEXR yardımı ile kontrol kartındaki eeprom'a kaydedilir. Eeprom elektriksel olarak silinebilir ve programlanabilir belleklerin en gelişmiş olup, bellek gözlerine istenen bir değer yazılabilir ve yazılan bu bilgi yeni bir yazma işlemine kadar hafızada kalır. Bu işlem yapılırken tüm açı değerleri HEX formatına çevrilir. Hex formatı mikroişlemcilerin verilen komutları işleyebilmesi için geliştirilmiş olan kod yapısıdır. Hexadesimal sayı sisteminde 16 adet rakam bulunur. Bunlar 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A B C D E F'dir. Tabanı ise 16'dır. Her hareket için iki açı değeri kontrol ünitesine aktarılır. Bu açılar alt motor ve üst motor açılarıdır. Yazılım; sistem el ile ya da otomatik olarak devreye alındığında ay, gün ve saat gibi yerel zaman bilgileri DS1307 [13] gerçek saat entegresinden alınır. Bu zamana karşılık gelen anlık açı değerleri eeprom'dan okunur ve hareket anından önce motorlara iletilir. Motorun dönmesi encoder yardımıyla sayılarak hareket tamamlanır. Koordinatları HELIOYER ile belirlenen heliostatların gün boyu hareketini sağlamak için gerekli olan anlık açı değerleri 16F877'nin dahili eeprom'una kaydedilir ki bir sonraki açı değerleri ile kıyaslanarak motorların dönüp dönmeyeceğine karar verilir. Şekil 5'te motor hız kontrol sürücüsü, güç kontrol kartı ve HELIOSRM yazılımını da içeren elektronik kontrol kartının blok diyagramı verilmiştir. Geliştirilen yazılımlar çizelge 1'de özetlenmiştir. Devir sayılarının kontrolü için bir encoder devresi tasarlanmıştır. Geliştirilen encoder'in hassasiyeti ve

kalibrasyonu piyasadan temin edilen bir encoder ile test edilmiştir. Dizayn ve imalatı gerçekleştirilen heliostat sistemi geliştirilen yazılım bileşenlerinden elde edilen veriler ile birleştirilerek denenmiştir. Denemeler esnasında ortaya çıkan en büyük problem devir sayma işlemidir. Kullanılan motorlara ait frenleme ve sürücü devrelerinin oluşturduğu manyetik alanı yenmek zaman almıştır. Frenleme ve sürücü devrelerinin oluşturduğu manyetik alan, devir sayma işlemindeki hassasiyeti etkilemekte ve yanlış sonuçlar elde edilmesine yol açmaktadır. Dolayısıyla gerekli olan açı değerleri kontrol kartı tarafından yanlış değerlendirilmekte ve izleme hatalarına sebep olmaktadır. Bu problem ilave yükseltme devreleri ile aşıldıktan sonra sistemin çalışması ve hassasiyeti daha kararlı bir hal almıştır.



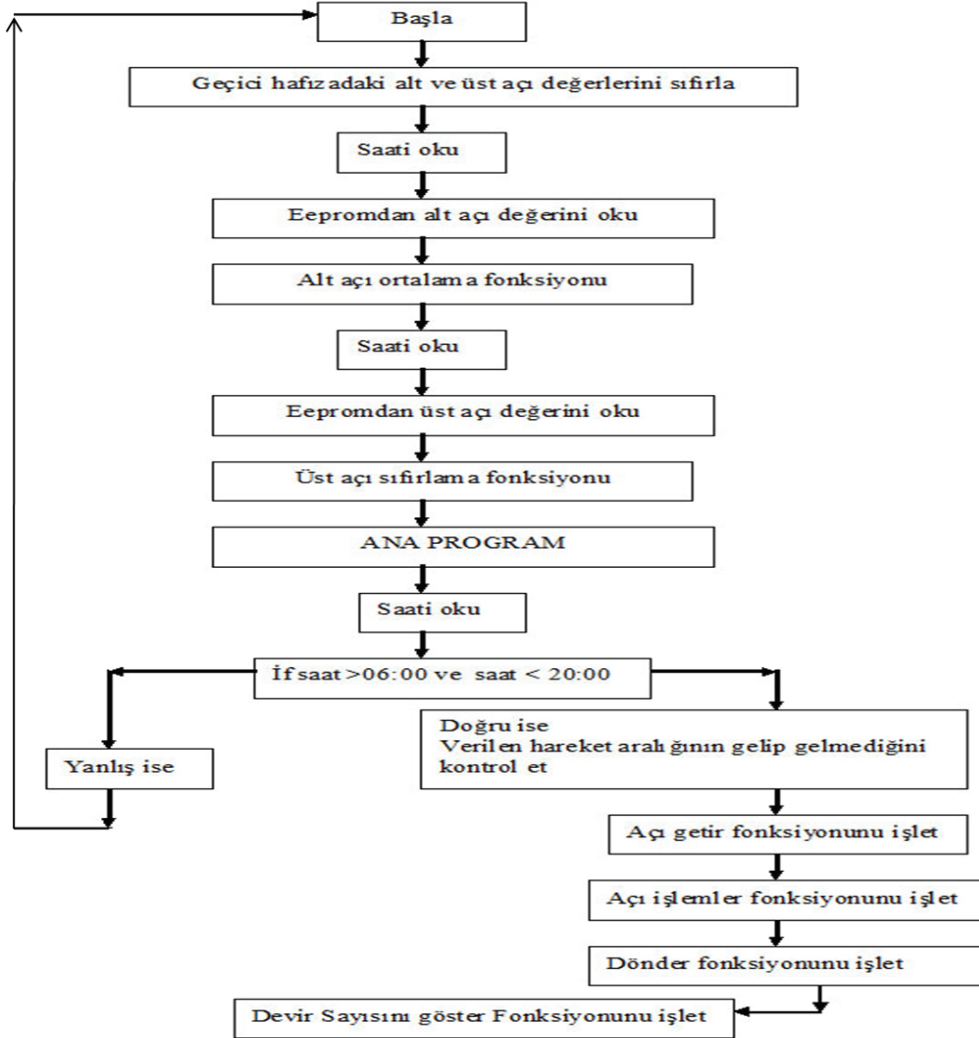
Şekil 5. Sistemin blok diyagramı. (Flow chart of the system.)

4. BULGULAR (RESULTS)

SDÜ Güneş Güç Kulesi örnek tasarımı için HELIOYER programı ile kule parametreleri, heliostat parametreleri, alan parametreleri, alıcı parametreleri, alan dağılım parametreleri gibi pek çok parametre değiştirilerek kurulacak sistem için en optimum durumlar elde edilmeye çalışılmıştır. 350 m, 380 m ve 400 m alan yarıçaplarında 5x5 m, 6x5 m, 6x6 m, 6x7 m, 7x6 m, 8x7 m, 10x9,5 m ve 11x10 m ayna boyutları ve 60 m, 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 120 m ve 150 m kule yükseklikleri için uygun alan yerleşimi ve ekonomik değerlendirme için ayrı, ayrı analiz edilmiştir. Örneğin 350 m alan yarıçapı 5x5 m ayna boyutu ve 60 m kule yüksekliği için analiz yapılmış daha sonra kule yüksekliği artırılarak 150 m kule yüksekliği için analizler yapıldıktan sonra 6x5 m ayna boyutları ve diğer ayna boyutları için bu işlemler

Çizelge 1. Geliştirilen yazılımlar.(The software developed)

ADI	GÖREVİ	Hesaplama	Grafik	Çizelge
HELIOYER	Heliostatların alana en uygun biçimde (gölgeleme, engelleme olmaksızın) yerleşmesini sağlar. Heliostat sayısı, Heliostat ebatları, kule yüksekliği, alıcı ebatları, alan gereksinimi, toplam yansıtma alanı belirlenir.	☒	☒	☒
HELIOACIR	Belirlenen koordinatlara göre her bir heliostat için gerekli olan açılış değerlerinin belirlenmesi.	☒	☒	☒
HELIOSHEXR	Elde edilen açılış değerlerinin makine diline çevrilmesini sağlar.	☒		

**Şekil 6.** HELIOSRM programına ait akış şeması. (Flow chart of the HELIOSRM)

tekrarlanmıştır. 350 m alan yarıçapı analizi tamamlandıktan sonra tüm bu işlemler 380 m ve 400 m alan yarıçapları için tekrar edilmiştir. Bu analizlerin sadece kuzey bölümüne ayna yerleşiminde incelendikten sonra alanın hem kuzey hem de güney bölümlerine ayna yerleşim durumu incelenmesi için yerleşim ve dağılım parametreleri değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Tüm bu analizler yapılmadan önce literatüre göre [14],[4] seçilen alıcı, türbin jeneratör verimleri dikkate alınarak hesaplanan 10 MW elektrik üretimi için gerekli olan ayna yansıtma alanı referans alınarak analizler sonucunda elde edilen

değerlerin en uygun durum seçimleri bilgisayar ortamında incelenmiştir. Bu değerlendirme işlemine ekonomik analiz için 2006 yılı heliostat ve kontrol ekipmanları maliyetleri de katılmıştır. Tüm bu değerlendirme işlemleri neticesinde en uygun durumun belirlenebilmesi için elde edilen tablo ve grafiklerden bazıları aşağıda sunulmuştur. Kule yüksekliği 60 m ve 70 m değerleri için ortaya çıkan yansıtma alanı belirlenen güç değerine ulaşmak için gerekli duyulan toplam yansıtma alanı değerinden çok uzak olduğu için burada çizelgelerde gösterilmemiştir.

Çizelge 2. 10 MW 400 m alan yarı çapı için optimum değerler [15]. (The optimum values for the radius of 400 m, 10 MW.)

R=400m 172 derece	Heliostat Ebatları 10-9,5 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
80m kule yük.	991	94145	166,00	15628,07
R=400m 172 derece	Heliostat Ebatları 10-9,5 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
90m kule yük.	1007	95675	166,00	15882,05
R=400m 172 derece	Heliostat Ebatları 11-10 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
100m kule yük.	786	86460	162,60	14058,72
R=400m 172 derece	Heliostat Ebatları 11-10 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
120m kule yük.	842	92620	162,60	15060,36
R=400m 172 derece	Heliostat Ebatları 11-10 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
150m kule yük.	928	102080	162,60	16598,59

Çizelge 3. 10 MW 380 m alan yarı çapı için optimum değerler [15]. (The optimum values for the radius of 380 m)

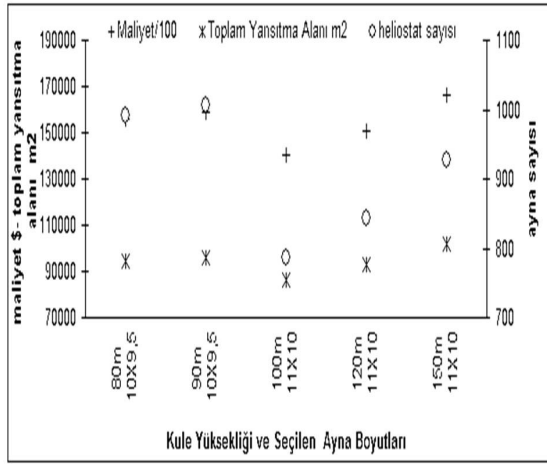
R=380m 172 Derece	Heliostat Ebatları 7-6m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
90m kule yük.	2230	93660	175,00	16443,66
R=380m 172 derece	Heliostat Ebatları 10-9,5 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
100m kule yük.	1029	97755	166,00	16227,33
R=380m 172 Derece	Heliostat Ebatları 10-9,5 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
120m kule yük.	852	80940	166,00	13436,42
R=380m 172 derece	Heliostat Ebatları 10-9,5 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
150m kule yük.	948	90060	166,00	14949,96

Çizelge 4. 10 MW 350 m alan yarı çapı için optimum değerler [15]. (The optimum values for the radius of 350 m)

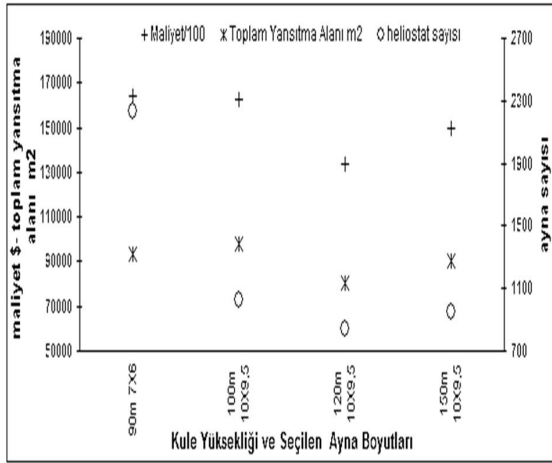
R=350m 172 Derece	Heliostat Ebatları 8-7m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
120m kule yük.	1574	88144	165,07	14550,05
R=350m 172 derece	Heliostat Ebatları 10-9,5 m			
Ht	heliostat sayısı	Toplam Yansıtma Alanı (m ²)	\$/m ²	Maliyet*1000
150m kule yük.	948	90060	166,00	14949,96

10 MW 400 m alan yarı çapı için optimum değerler Çizelge 2'de grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 7'de, 10 MW 380 m alan yarı çapı için optimum değerler Çizelge 3'de grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 8'de, 10 MW 350 m alan yarı çapı için optimum değerler Çizelge 4'de grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 9'da, 10 MW için heliostat maliyetlerinin karşılaştırılması ise Şekil 10'da görülmektedir. Çizelge 2'de verilen terim ve sayısal ifadeler: R; seçilen güç değeri için gerekli olan alan yarıçapı (m), Ht; kule yüksekliği (m), 172 derece; alana yerleştirilecek olan heliostatların alana dağılma açıları, \$/m²; heliostatlar için birim maliyet olup arazi gereksinimi ve sistemin

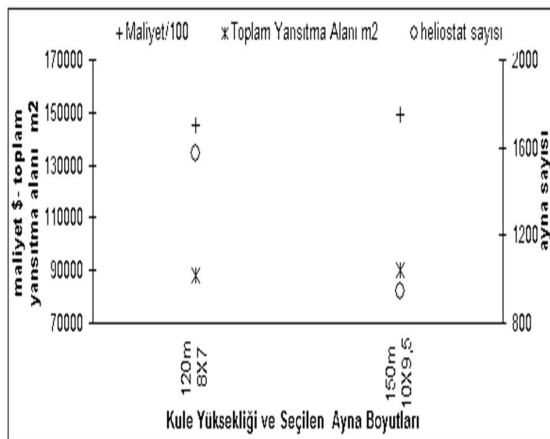
ısı dönüşüm ekipmanlarını içermemekle birlikte heliostatlar için tüm imalat ve kontrol maliyetlerini içeren değerdir. Şekil 7, şekil 8 ve şekil 9 incelendiğinde istenilen güç değeri için ortaya çıkan alan gereksinimleri, heliostat sayıları, toplam yansıtma alanı ve maliyet değerleri incelenmiş ve uygun olarak seçilen bu değerler şekil 10'da gösterilmiştir. Elde edilen bu değerlerden de şekil 10 üzerinde görüldüğü gibi en uygun alan gereksinimi 380 m alan yarıçapı, 120 m kule yüksekliği, 10x9,5m heliostat boyutu, 852 adet heliostat ile toplam 80940m²'lik bir yansıtma alanı elde edilmiştir. HELIOACIR programı ile elde edilen "S" ve "Ay"



Şekil 7. 10 MW 400 m alan yarı çapı için optimum değerler [15]. (The optimum values for the radius of 400 m, 10 MW.)



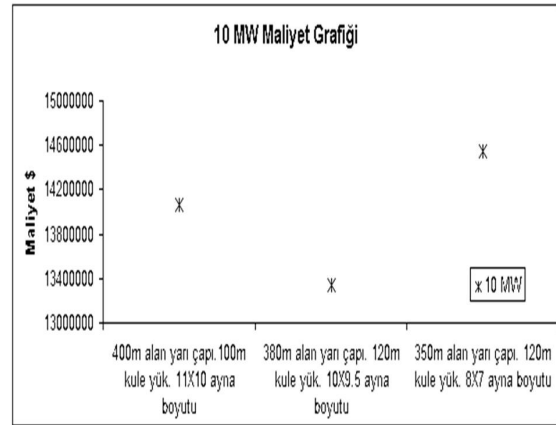
Şekil 8. 10 MW 380 m alan yarı çapı için optimum değerler [15]. (The optimum values for the radius of 380 m, 10 MW.)



Şekil 9. 10 MW 350 m alan yarı çapı için optimum değerler [15]. (The optimum values for the radius of 350 m, 10 MW.)

açı değerlerinin bir günlük örnek değişimi ise şekil 12'de verilmiştir. Bu değerler yılın tüm günleri için güneşin doğuş ve batış saatleri arasında hesaplamaları yapılır ve geliştirilen kontrol ünitesinin hafızasına

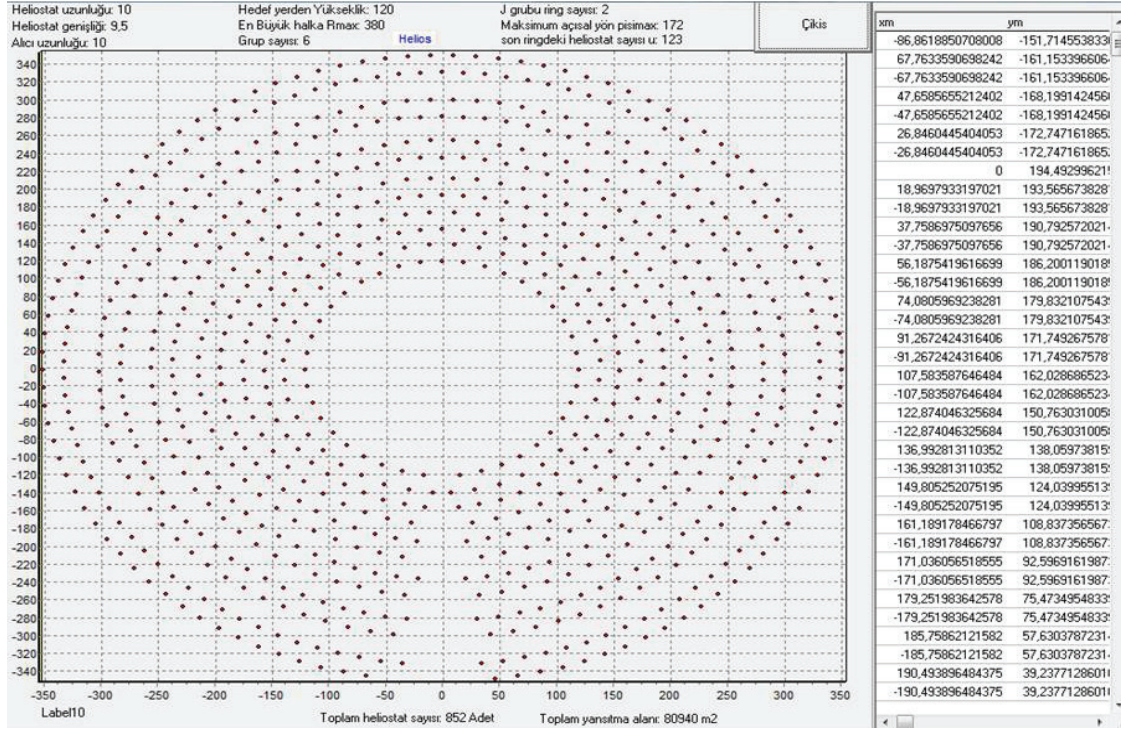
aktarılır. 08.08.2008 tarihi için S ve Ay değerleri incelendiğinde de görüleceği üzere S değerleri ise seçilen bölgenin koordinatlarına, heliostatların ebatlarına ve koordinatlarına (enlem, boylam, heliostat kaidenin merkezinin yerden yüksekliği), kule tepesine monte edilmiş alıcının koordinatlarına - ebatlarına ve yerden olan yüksekliğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Ay değerleri aynı parametrelere bağlı olarak güneş öğlesi (güneş öğlesi; verilen bölgede yerel saat 12:00'ye göre güneş ışınlarının dik geldiği konum) öncesinde eksi değerler almaktadır. SDÜ - 10 MW bir güneş tesisi için öngörülen dizayn parametreleri çizelge 5'de verilmiştir.



Şekil 10. 10 MW için heliostat maliyetlerinin karşılaştırılması [15]. (Comparison of heliostat costs for 10 MW)

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan analizler sonucunda 10 MW'lık bir sistem için 380 m alan yarıçapı, 120 m kule yüksekliği, 10x9,5m heliostat boyutu, 852 adet heliostat ile toplam 80940m²'lik bir yansıtma alanı elde edilmiştir. Sistemin toplam heliostat ve kontrol maliyeti ise 166\$ [17] birim değeri üzerinden 13436420 \$ olmaktadır. Bu değere ısı sistem ekipmanları (boru, bağlantı ekipmanları, türbin, jeneratör, alıcı, kule inşaatı, arazi bedeli, depolama ortamı ve ekipmanları, vb.) dahil değildir. Bu alan yerleşimi önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere en uygun heliostat yerleşimini sağlamakla birlikte geliştirilen yazılımda kullanılan gölgeleme hesabı sayesinde olası gölgeleme olaylarının da önüne geçmiş olur. HELIOYER programı ile optimum ayna boyutları, kule yüksekliği, alan yarıçapı ve her bir aynanın koordinatları belirlenmiştir. 10 MW için 2,1'lik güneş çarpanı ile 852 adet 95m²'lik heliostat sayısı bulunmuştur. Kule yüksekliği ise 120 m olarak belirlenmiştir. Gerekli olan alan yarıçapı ise 380m olarak belirlenmiştir. Alıcı tipi ise silindir tip seçilmiştir. Ayna koordinatları ve alan yerleşimi ise şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. 10 MW örnek tesis için HELIOYER programı ile alana ayna yerleşimi [15]. (Heliostat field layout with HELIOYER software for 10 MW plant)

Çizelge 5. SDÜ-10 MW bir güneş tesisi için dizayn parametreleri [15]. (Design parameters for SDU-10 MW solar plant)

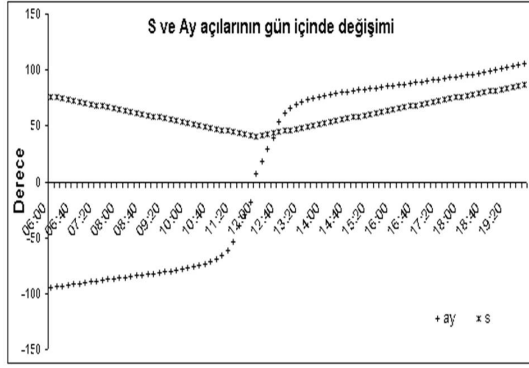
Yıllık Işınım [kWh/m ²] [16]		2430*
Dizayn noktasında gün sayısı		355
Dizayn noktasında ışınım [W/m ²]		900*
Dizayn noktasında güç [MWe]		10
Kule yüksekliği [m]		120
Heliostat sayısı/heliostat yansıtma yüzeyi [m ²]		852/95
Yıllık ortalama heliostat yansıtıcılığı [14]		0,90
Odak mesafesi [m]		380
Alıcı şekli		Silindir
Alıcı çapı [m]/alıcı yüksekliği [m]		10/10
	Dizayn Noktası	Yıllık Denge
Yansıtıcı yüzeye gelen güç/enerji	72,84 MW	177,01 GWh
Heliostat alan optik verimi [14]	0,74	0,64
Alıcıya gelen toplam güç/enerji	53,9 MW	114,5 GWh
Alıcı ve hava devresi verimi [14]	0,740	0,61
Çalışma akışkanına aktarılan güç/enerji	39,88 MW	70,30 GWh
Depolanan güç/enerji	5 MW**	
Türbin gücü/enerjisi	34,88 MW	70,30 GWh
Isıl → Elektrik Verim	0,309	0,30
Toplam elektrik gücü/enerjisi	10,77 MW	21,30 GWh
Parazitik kayıplar	0,7 MW	2,89 GWh
Net elektrik gücü/enerjisi	10 MW	18,41 GWh

*Yıllık ışınım miktarı; Işınım * ortalama günlük güneşlenme süresi [16].

**Depolanan enerji için depolama ortamına tesisin tasarımında karar verilir. Bu ortam yer altında olabileceği gibi farklı teknolojilere de sahip olabilir.

HELIOACIR programı ile her bir heliostatın gün boyu alması gereken “S” ve “Ay” değerleri belirlenmiştir. HELIOSRM yazılımı ise imal edilen mekanik heliostat sistemlerin elektronik olarak kontrol edilmesinde kullanılmak üzere geliştirilen kontrol ve güç kartlarına hükmederek heliostatların

kuledeki alıcıya odaklama yapmasını sağlamıştır. Sistemin gerçek zamanlı olarak çalışabilmesi, enerji kesintilerinden etkilenmemesi, ve herhangi bir koordinat için gerekli açıların hafızaya aktarılması



Şekil 12. 08.08.2008 tarihi için S ve Ay değerleri [15]. (S and Ay angle parameters at 08.08.2008)

kontrol işleminin yapılabilmesi sistemin avantajları arasında sayılabilir. Geliştirilen kontrol kartları her türlü motora uyum sağlayabilecek kabiliyete sahiptir. Geliştirilen kontrol kartlarının maliyeti oldukça düşüktür. Geliştirilen bu sistem, güneş güç kulelerinin uygulanabileceği her coğrafyada kolaylıkla kullanılabilir. Sistemin deneme aşamaları Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi hizmet binasının güneyinde bulunan TEKNOKENT binasının kuzey cephesinden yararlanılarak yapılmıştır. Alıcı olarak binanın kuzey cephesinde yerden 5 m yükseklikte bir nokta seçilmiştir. Alıcı ile ayna arasındaki yükseklik farkı ise 7 m olarak belirlenmiştir. Güneş enerjisi bakımından zengin olan yerlerde kurulacak küçük santraller ile yöresel olarak elektrik ihtiyacı karşılanabileceği, 10 MW - 200 MW ve daha üzeri güçlerde kurulacak olan santraller ile enerji dışa bağımlılığının azaltılabileceği ve bunun için verim artırıcı yöntemlerin geliştirilebileceği ortaya konularak toplumun yenilenebilir enerjiye olan ilgisi artırılabilir. Bu çevre dostu santrallerin hayata geçirilmesi ile; bilinçsizce ve de verimsiz olarak tükettiğimiz elektrik enerjisinin fosil kaynaklardan üretilmesi esnasında atmosfere salınan zararlı emisyonlarında önüne geçilmiş olacaktır. Çalışma, güneş güç kulesi sistemlerinin dizaynı ve uygulanması bakımından ülkemizde uygulanan literatürde bilinen ilk geniş kapsamlı analiz olması ve aynaların yansıtma işlemi için deneysel uygulamayı içermesiyle öncü konumda olup ilerideki çalışmalara da ışık tutacak niteliktedir.

Teşekkür: (Acknowledgements)

Çalışmaya verdiği destekten ötürü SDÜ BAPYB'ne ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (References)

1. Finat, A.G., Liberali, R., "Concentrating Solar Power From Research To Implementation, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities", <http://europa.eu>, Erişim Tarihi : 11.05.2009, 2007.

2. Hildebrandt, A.F., Lorin, L., Hull, V., "Power with Heliostat", *Science*, Cilt 197 (4309), 1139-1146, 1977.
3. Lorin, L., Hull, V., "Solar Thermal Central Receivers", *Energy Laboratory Newsletter*, Cilt 21, 7-12, 1989.
4. Kribus, A., Doron, P., Rubin, R., Karni, J., Reuven, R., Duchan, S., ve Taragan, E., "A Multistage Solar Receiver : The Route To High Temperature", *Solar Energy*, Cilt 67, 3-11, 1999.
5. Lorin, L., Hull, V., "An Educated Ray Trace Approach to Solar Tower Optics", *Optical Engineering*, Cilt 16, No 5, 497-504, 1977.
6. Siala, F.M.F., Elayeb, M.E., "Mathematical Formulation Of A Graphical Method For A No-Bloking Heliostat Field Layout", *Renewable Energy*, Cilt 23, 77-92, 2001.
7. Collado, F.J., "Preliminary Design of Surrounding Heliostat Fields", *Renewable Energy*, Cilt 34, No 5, 1359-1363, 2009.
8. Segal, A., Epstein, M., "Optimized Working Temperatures of a Solar Central Receiver", *Solar Energy*, Cilt 75, 503-510, 2003.
9. Chen, Y.T., Kribus, A., Lim, B.H., Lim, C.S., Chong, K.K., Karni, J., Buck, R., Pfahl, A., Bligh, T.P., "Comparison Of Two Sun Tracking Methods In The Application of A Heliostat Field", *Journal of Solar Energy Engineering*, Cilt 126, 638-644, 2004.
10. Kribus, A., Vishnevetsky, I., Yogev, A., Rubinov, T., "Closed Loop Control of Heliostats", *Energy*, Cilt 29, 905-913, 2004.
11. Eltez, M., **Sabit Yansıtıcı - Çizgisel Odaklı Kule Projesinde Yansıtıcı - Odaklayıcı Yüzeyin Şekillendirilmesi**, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, 1986.
12. Microchip Technology Inc., **PIC16F87X Data Sheet**, www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf, Erişim Tarihi: 11.05.2009.
13. Maxim Integrated Products, DS1307 Serial Real-Time Clock Datasheet, <http://www.maxim-integrated.com/datasheet/index.mvp/id/2688>, Erişim Tarihi: 11.05.2009.
14. Kreith, F., Goswami D.Y., **Energy Management and Conservation Handbook**, Mechanical Engineering Series, CRC Press, Boca Raton, 2007.
15. Şenol, R., **Güneş Kulelerinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Araştırılması ve Optimizasyonu**, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2009.
16. NASA Surface meteorology and Solar Energy, <http://eosweb.larc.nasa.gov>, Erişim Tarihi: 02.03.2009.
17. Kolb, G.J., Jones, S.A., Donnelly, M.W., Gorman, D., Thomas, R., Davenport, R., Lumia, R., **Heliostat Cost Reduction Study**, Sandia National Laboratories, Sandia Report, SAND2007-3293, 2007.

