

**SIVI PİSTONLU BİR KOMPRESÖRÜN
DİNAMİK MODELLENMESİ VE
TASARIMI**

FATİH ÖZCAN

**SIVI PİSTONLU BİR KOMPRESÖRÜN
DİNAMİK MODELLENMESİ VE
TASARIMI**

FATİH ÖZCAN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIVI PİSTONLU BİR KOMPRESÖRÜN DİNAMİK
MODELLENMESİ VE TASARIMI**

FATİH ÖZCAN

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2013

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

TARİH

imza

Fatih ÖZCAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SIVI PİSTONLU BİR KOMPRESÖRÜN DİNAMİK MODELLENMESİ VE TASARIMI

Fatih ÖZCAN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Endüstride ihtiyaç duyulan basınçlı hava ihtiyacını karşılamak için farklı tipte kompresörler mevcuttur. Kullanılan bu kompresörlerin verimleri düşük olmasından dolayı kullandıkları enerjinin büyük kısmını ısı olarak çevreye atmaktadırlar. Kompresörlerin verimlerinde yapılacak olan iyileştirmeler endüstride kullanılan enerji giderlerini düşürecektir. Bu çalışmada, sıvı pistonlu bir kompresör tasarlanmış ve kompresörün MATLAB-Simulink ortamında dinamik modeli oluşturulmuştur. Model kullanılarak silindirler içerisinde oluşan basınç ve sıcaklıklar hesaplanmıştır. Farklı sıkıştırma hızları ve farklı sıkıştırma basınçları için verimler elde edilmiştir. Yapılan tasarımın geleneksel kompresörlere göre daha verimli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sıvı pistonlu kompresör, enerji verimliliği, enerji depolama, matlab-simulink

2013, xiv + 94 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DYNAMIC MODELLING AND DESIGN OF A COMPRESOR WITH LIQUID PISTON

Fatih ÖZCAN

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Muhsin KILIÇ

Compressed air, needed in industry, is supplied by many types of compressors. Energy, used in these compressors is lost by heat transfer due to its low energy efficiencies. Enhancements in compressor efficiencies will reduce energy expensis in industry. In this study, a liquid piston compressor is designed and a dynamic model is built by MATLAB-Simulink. Pressure and temperature variations are calculated by dynamic model. Energy efficiency is evaluated for different compressing speeds and pressures. It is seen that designed liquid piston compressor is more efficient than conventional compressors.

Key Words: Compresor with liquid piston, energy efficiency, energy storage, matlab-simulink

2013, xiv + 94 pages.

TEŐEKKÖR

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen ve alıőmalarımnda yol gősteren hocam sayın Prof.Dr. Muhsin KILIÇ' a, yazım aőamasında yardımlarını esirgemeyen Araő. Gőr. Mustafa MUTLU' ya ve yaőamımın her anında yanımda bulunup, destek olan aileme ve arkadaşlarıma teőekkőrlerimi sunarım. Bu alıőma COST-111M015 numaralı "Sıvı Pistonlu Sıkıőtırılmıő Hava Süperkapasitör Kullanan Kűçük Ölçekli Hibrit Enerji Depolama Sisteminin Tasarımı, Prototip İmalatı ve Performans Analizi" baőlıklı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiőtir.

Fatih ÖZCAN

15/11/2013

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ (GENEL BİLGİLER).....	3
2.1. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Ve Kullanımı	3
2.2. Enerji Depolamanın Önemi	4
2.3. Enerji Depolama Yöntemleri	8
2.3.1. Mekanik Enerji Depolama.....	8
2.3.2. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama	11
2.3.3. Elektrokimyasal Enerji Depolama ve Bataryalar.....	12
2.3.4. Süperkapasitörler (Ultrakapasitörler)	15
2.3.5. Hidrojen ile Enerji Depolama.....	15
2.4. Kompresör	17
2.4.1. Kompresörün Tarihçesi	17
2.4.2. Kompresör Türleri.....	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM	25
3.1. Materyal.....	25
3.1.1. Sıvı Pistonlu Kompresörün Çalışma Şekli	25
3.1.2. MATLAB Simulink	26
3.2. Yöntem	27
3.2.1. Sıvı Pistonlu Kompresörün Simulink Modeli.....	27
3.2.2. Pompa Simulink Modeli.....	27
3.2.3. Hidrolik Silindirin Simulink Modeli.....	29

3.2.4. Silindirlerin Simulink Modeli.....	30
3.2.5. Tankın Simulink Modeli.....	32
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	33
4.1. Politropik Sıkıştırma Katsayısı $n = 1.01$ Alındığında Elde Edilen Bulgular.....	33
4.2. Politropik Sıkıştırma Katsayısı $n = 1.1$ Alındığında Elde Edilen Bulgular	53
4.3. Politropik Sıkıştırma Katsayısı $n = 1.2$ Alındığında Elde Edilen Bulgular	70
5. SONUÇ	91
KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	94

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Hidrolik Silindir İç Alanı
A_{sil}	Silindir Alanı
D_b	Hidrolik Silindir İç Çapı
D_p	Pompanın Geometrik Debisi
D_{sil}	Silindir Çapı
E	Enerji
g	Yerçekimi İvmesi
L_c	Cetvel Konumu
L_{seviye}	Silindirdeki Yağ Seviyesi
L_{sil}	Silindir Boyu
m_{tank}	Tank İçindeki Hava Kütlesi
n	Elektrik Motoru Devir Sayısı
P	Güç
P_{sil}	Silindir Basıncı
P_{tank}	Tank Basıncı
Q	Hacimsel Debi
R	Gaz Sabiti
T	Tank Sıcaklığı
T_{sil}	Silindir Sıcaklığı
V_h	Silindir İçi Hava Hacmi
V_{sil}	Silindir Hacmi
V_{tank}	Tank Hacmi
ΔP	Basınç Farkı
η	Elektrik Motoru Verimi
μ	Pompanın Volumetrik Verimi

Kısaltmalar	Açıklamalar
GW	Gigawatt
HES	Hidroelektrik Santrali
km	Kilometre
kWh	Kilowattsaat
MW	Megawatt
MWh	Megawattsaat
PDHES	Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali
SHDES	Sıkıştırılmış Hava Depolamalı Elektrik Santralleri
SHED	Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama
SMES	Süperiletken Manyetik Enerji Depolama
YEK	Yenilenebilir Enerji Kanunu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Sıvı pistonlu kompresörün Simulink modeli	27
Şekil 3.2. Sıvı pistonlu kompresörün pompa alt sisteminin Simulink modeli	28
Şekil 3.3. Sıvı pistonlu kompresörde hidrolik silindir Simulink modeli	29
Şekil 3.4. Sıvı pistonlu kompresörde silindirlerin Simulink modeli	30
Şekil 3.5. Sıvı pistonlu kompresörde tankın Simulink modeli.....	32
Şekil 4.1. $n = 1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	34
Şekil 4.2. $n = 1.01$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	34
Şekil 4.3. $n = 1.01$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	35
Şekil 4.4. $n = 1.01$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	35
Şekil 4.5. $n = 1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	36
Şekil 4.6. $n = 1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	36
Şekil 4.7. $n = 1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	37
Şekil 4.8. $n = 1.01$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	37
Şekil 4.9. $n = 1.01$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	38
Şekil 4.10. $n = 1.01$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	38
Şekil 4.11. $n = 1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	39
Şekil 4.12. $n = 1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	39

Şekil 4.13. n = 1.01 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	40
Şekil 4.14. n = 1.01 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	41
Şekil 4.15. n = 1.01 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	41
Şekil 4.16. n = 1.01 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	42
Şekil 4.17. n = 1.01 için pompanın 6 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	42
Şekil 4.18. n = 1.01 için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	43
Şekil 4.19. n = 1.01 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	44
Şekil 4.20. n = 1.01 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	44
Şekil 4.21. n = 1.01 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	45
Şekil 4.22. n = 1.01 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	45
Şekil 4.23. n = 1.01 için pompanın 6 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	46
Şekil 4.24. n = 1.01 için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü.....	47
Şekil 4.25. n = 1.01 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	48
Şekil 4.26. n = 1.01 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	48
Şekil 4.27. n = 1.01 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	49
Şekil 4.28. n = 1.01 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	49

Şekil 4.29. $n = 1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	50
Şekil 4.30. $n = 1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı.....	50
Şekil 4.31. $n = 1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık.....	51
Şekil 4.32. $n = 1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan hava miktarı	52
Şekil 4.33. $n = 1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan hava miktarı	52
Şekil 4.34. $n = 1.1$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	53
Şekil 4.35. $n = 1.1$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	54
Şekil 4.36. $n = 1.1$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	54
Şekil 4.37. $n = 1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	55
Şekil 4.38. $n = 1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	55
Şekil 4.39. $n = 1.1$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	56
Şekil 4.40. $n = 1.1$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	56
Şekil 4.41. $n = 1.1$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	57
Şekil 4.42. $n = 1.1$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	57
Şekil 4.43. $n = 1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	58
Şekil 4.44. $n = 1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	58

Şekil 4.45. n = 1.1 için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	59
Şekil 4.46. n = 1.1 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	60
Şekil 4.47. n = 1.1 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	60
Şekil 4.48. n = 1.1 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	61
Şekil 4.49. n = 1.1 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	61
Şekil 4.50. n = 1.1 için pompanın 6 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	62
Şekil 4.51. n = 1.1 için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	62
Şekil 4.52. n = 1.1 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	63
Şekil 4.53. n = 1.1 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	64
Şekil 4.54. n = 1.1 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	64
Şekil 4.55. n = 1.1 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	65
Şekil 4.56. n = 1.1 için pompanın 6 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	65
Şekil 4.57. n = 1.1 için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü.....	66
Şekil 4.58. n = 1.1 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	67
Şekil 4.59. n = 1.1 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	67
Şekil 4.60. n = 1.1 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	68

Şekil 4.61. $n = 1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	68
Şekil 4.62. $n = 1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	69
Şekil 4.63. $n = 1.1$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı.....	69
Şekil 4.64. $n = 1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	70
Şekil 4.65. $n = 1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	71
Şekil 4.66. $n = 1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	71
Şekil 4.67. $n = 1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	72
Şekil 4.68. $n = 1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	72
Şekil 4.69. $n = 1.2$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji	73
Şekil 4.70. $n = 1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	74
Şekil 4.71. $n = 1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	74
Şekil 4.72. $n = 1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	75
Şekil 4.73. $n = 1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	75
Şekil 4.74. $n = 1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	76
Şekil 4.75. $n = 1.2$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji	76
Şekil 4.76. $n = 1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	77

Şekil 4.77. n = 1.2 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	78
Şekil 4.78. n = 1.2 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	78
Şekil 4.79. n = 1.2 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	79
Şekil 4.80. n = 1.2 için pompanın 6 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	79
Şekil 4.81. n = 1.2 için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü	80
Şekil 4.82. n = 1.2 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	81
Şekil 4.83. n = 1.2 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	81
Şekil 4.84. n = 1.2 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	82
Şekil 4.85. n = 1.2 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	82
Şekil 4.86. n = 1.2 için pompanın 6 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü	83
Şekil 4.87. n = 1.2 için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü.....	83
Şekil 4.88. n = 1.2 için pompanın 30 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık	84
Şekil 4.89. n = 1.2 için pompanın 24 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık	85
Şekil 4.90. n = 1.2 için pompanın 18 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık	85
Şekil 4.91. n = 1.2 için pompanın 12 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık	86
Şekil 4.92. n = 1.2 için pompanın 6 cm ³ /devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık	86

Şekil 4.93. $n = 1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	87
Şekil 4.94. $n = 1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	88
Şekil 4.95. $n = 1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	88
Şekil 4.96. $n = 1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	89
Şekil 4.97. $n = 1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı	89
Şekil 4.98. $n = 1.2$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı.....	87

1. GİRİŞ

Birçok farklı enerji türü bulunmaktadır. Bunlardan önemli olan bazıları; mekanik enerji, ısı enerjisi, kimyasal enerji, nükleer enerji, yerçekimi enerjisi, elektrik enerjisidir.

Günümüzde, artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji ihtiyacı ülkemizin kısıtlı kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark hızla büyümektedir. Bu durumda, mevcut enerji kaynaklarımızdan daha etkili bir biçimde yararlanmak giderek artan bir önem kazanmaktadır. Enerji talebindeki hızlı artışın karşılanması için, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin verimli bir şekilde depolanması ve ihtiyacı karşılayacak en uygun dönüşümlerin geliştirilmesi yararlı olacaktır (Sarı 2011).

Günümüzde dünyadaki enerji ihtiyacının büyük bir bölümü kömür, doğal gaz ve petrol gibi konvansiyonel enerji kaynakları kullanılarak karşılanmaktadır. Bunun yanı sıra dünyadaki enerji ihtiyacı her geçen gün artış göstermekte, bu durum da konvansiyonel yakıt ihtiyacını giderek arttırmaktadır. Öte yandan bahsi geçen konvansiyonel yakıtların rezervleri dünya üzerinde sınırlıdır ve artan enerji ihtiyacına bağlı olarak giderek tükenmektedir. Bu durum da gelecekteki üretim/tüketim dengesinin sağlanmasını tehlikeye düşürmektedir. Bütün bunların yanı sıra konvansiyonel yakıtların kullanılması, sera gazı salınımının önemli oranda artmasına ve buna bağlı olarak küresel ısınma gibi bütün dünyayı etkileyebilecek önemli sonuçları ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu açıdan günümüzde başta güneş ve rüzgâr tabanlı sistemler olmak üzere alternatif ve yenilenebilir enerji sistemleri, çevre dostu ve sürdürülebilir bir işletim sağladıklarından dolayı gelecek açısından önemli olarak değerlendirilen enerji kaynakları konumundadırlar (Hadjiposcholis ve ark. 2009).

Yenilenebilir enerji (kaynakları), sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen enerjidir. Bu kaynaklar güneş ışığı, rüzgar, akan su (hidrogüç), biyolojik süreçler ve jeotermal olarak sıralanabilir.

En genel olarak, yenilenebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi

ile tanımlanır. Örneğin, güneşten elde edilen enerji ile çalışan bir teknoloji bu enerjiyi tüketir, fakat tüketilen enerji toplam güneş enerjisinin yanında çok küçük kalır. En genel yenilenebilir enerji şekli güneşten gelendir. Bazı formlar güneş enerjisini ve rüzgâr gücünü depolar.

Yenilenebilir enerjinin tesisler, hayvanlar ve insanlar tarafından kalıcı olarak tüketilmesi mümkün değildir. Fosil yakıtlar, çok uzun bir zaman çizelgesi göz önüne alındığında teorik olarak yenilenebilir iken, istismar edilerek kullanılması sonucu yakın gelecekte tamamen tükenme tehlikesi ile karşı karşıyadır.

Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının birçoğu doğa koşullarına son derece bağımlı durumdadır. Bu nedenle bu kaynaklar ile üretilen enerji sezonluk, günlük ve hatta anlık olarak bile büyük değişimler gösterebilmektedir. Bu durum da üretilen enerjinin genel enerji talebi ile tam olarak örtüşmemesine neden olabilmektedir. Bu açıdan, yükün enerji ihtiyacının her durumda başarı ile karşılanabilmesi için enerji depolama üniteleri oldukça büyük öneme sahiptirler. Bahsi geçen yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen fazla enerji farklı tür enerji depolanma ünitelerine aktarılmakta, depolanan bu enerji ise ana kaynakların mevcut olmadığı ya da yetersiz olduğu durumlarda yük talebinin karşılanmasında kullanılmaktadır. Özellikle şebekeden bağımsız uygulamalar için enerji depolama ünitelerinin araştırılması ve incelenmesi oldukça büyük önem arz etmektedir (İbrahim ve ark. 2008).

Bu çalışmada enerji depolama tekniklerinden biri olan Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama (SHED) için sıvı pistonlu kompresör sisteminin dinamik modeli oluşturulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ (GENEL BİLGİLER)

2.1. Türkiye’ de Yenilenebilir Enerji ve Kullanımı

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji tüketimi içindeki payı sürekli artmaktadır ve birçok ülkede yenilenebilir enerji kullanımını arttırmak için çeşitli destek programları uygulanmaktadır. Fosil yakıtların bir çok olumsuz yönü (yakın gelecekte tükenecek olması, fiyatların artması, çevre kirliliğine sebep olmaları vs), yenilenebilir enerji kullanımı için destek çalışmaları ve yeni iş imkanları oluşturmasından dolayı bu kaynakların kullanımında hızlı bir artış görülmektedir.

Türkiye’de başta hidroelektrik olmak üzere önemli ölçüde yenilenebilir enerji potansiyeli bulunmaktadır. 5346 sayılı kanunda büyük küçük ayrımı yapılmaksızın tüm HES’ lerin yenilenebilir tanımı içerisinde yer almasına rağmen rezervuar alanı 15 km²’ nin altındaki projeler YEK Kanunu kapsamına alınmıştır. Bu kapsamda 36 770 MW kurulu güçte 1238 adet HES bulunmaktadır. İlave potansiyel ile birlikte 170 milyar kWh/yıl üretim potansiyeli mevcuttur ve bunun % 28’ i kullanılmaktadır.

Rüzgar; bugünkü teknik koşullarda 10 metre yükseklikteki ortalama 6 m/s hızda, yılda 2800 saat kullanma süresi ile kurulabilecek ekonomik rüzgar potansiyeli 10 000 MW yani 28 milyar kWh (88 000 MW teknik potansiyel) düzeyindedir. Bu ekonomik potansiyelin yıllık çalışma saati en kötü rüzgar koşulunda (güvenilir üretim) 1400 saate kadar düşerek ancak 14 milyar kWh üretim gerçekleştirebileceği düşünülmektedir. 2007-2020 döneminde her yıl 125 MW olmak üzere toplam 1750 MW rüzgar santralının sisteme ilave edileceği öngörülmüştür (TEİAŞ (Anonim) 2012).

Güneş; Türkiye’ nin tüm yüzeyine isabet eden güneş gücü brüt olarak 111 500 GW kadardır. Ancak teknik potansiyel 1400 GW olup, kullanılabilir potansiyel 116 GW olarak kestirilmektedir. 5346 sayılı kanunda değişiklik yapılmak üzere bir kanun taslağı hazırlanmıştır. Bu taslağa göre özellikle rüzgar ve güneş için çok yüksek alım garantileri önerilmektedir. Oysa ülke çıkarları açısından kesintili karaktere sahip bu kaynakların yüksek alım garantisinden çok üretimlerinin sürekli hale getirilerek pazarda rekabet edebilme güçlerinin artırılması için hızla devreye girebilecek sistemlerle birlikte planlanmaları gerekmektedir.

2.2. Enerji Depolamanın Önemi

Günümüzde bütün modern enerji sistemleri arz güvenilirliği, sistem stabilitesi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması iletim-dağıtım problemlerinin ve maliyetlerinin minimize edilmesi gibi birçok nedenlerle enerjinin depolanmasını zorunlu kılar.

Eğer bir ülkenin enerji ihtiyacı büyük oranda termik santrallerden karşılanıyorsa, bunun yanında ülke kesintili karakterde yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip ve bu kaynakları verimli bir şekilde kullanmak istiyorsa, sistemde hızla devreye girip çıkabilme özelliğinde santrallere ihtiyacı vardır. Bu ihtiyaç ya büyük oranda fosil yakıt kullanan santralleri birkaç dakikada devreye girebilmesi için sıcak yedekte hazır tutarak ekonomik olmayan bir yöntemle ya da hızla devreye girip çıkma özelliğine sahip olan klasik depolamalı hidroelektrik santraller ve/veya enerji depolama sistemleri hayata geçirilerek karşılanabilir. Ülkemiz için kısmen tercih edilmekte olan yöntem bunlardan birincisidir. Bu da zaten %80'lerin üzerinde olan fosil yakıt kullanımının ve 2008 yılında genel enerjide %76 elektrik enerjisinde %60'a ulaşmış olan dışa bağımlılığımızın ve aynı zamanda fosil yakıt kullanımından dolayı oluşacak emisyonların artması anlamı taşımaktadır.

Enerjinin depolanması, dünyada son yıllarda gelişen yeni liberal piyasa modelinde, elektrik değer zincirinin en kritik bileşenlerinden birisidir ve enerji depolama sistemleri endüstrisi yeni, önemli ve tüm dünyada hızla gelişmekte olan bir endüstri seçeneğidir. Liberal piyasalarda sistem işletmecilerinin büyük ölçekte yenilenebilir enerji üretimini sisteme entegre edebilmeleri için enerjinin depolanmasına ihtiyaçları vardır. Teknik değerlendirmeler ve fizibilite çalışmaları enerji depolamanın sadece teknik bir gereklilik değil aynı zamanda maliyet kontrolü sağladığını da göstermektedir.

Elektrik depolanması, elektriğin farklı bir forma çevrilip daha sonra kullanılmasıdır. Elektrik sistemi, depolama teknikleri ile uzun zaman önce tanışmış olmasına rağmen geniş bir çerçevede kullanılması son birkaç yılda gerçekleşmektedir. Depolama ile yüksek şebeke performansı (güç kalitesi, kararlılık, regülasyon vb.) ve ekonomik kar elde edilebilir. Günümüzde üretimi temelde fosil kaynaklara bağlıdır ancak yenilenebilir

enerjilere bağlı elektrik üretimi de sürekli artmaktadır. Yenilenebilir enerjinin kullanımının sürekli artması depolama sistemlerinin kullanılmasını daha önemli hale getirmektedir. Bu enerji kaynaklarının (rüzgar, güneş, dalga vs.) dalgalı üretimleri, tüketimle aralarında dengesizliğe sebep olur. Bu dengesizlik sorunları ise depolama teknikleri ile çözülebilir. Eğer uygun bir depolama tekniği kullanılırsa yenilenebilir enerjilerin sistem içindeki yoğunlukları da arttırılır. Enerji birçok farklı formda depolanabilir. Bunlar elektrik, mekanik, ısı ve hidrojen şeklinde sıralanabilir. Elektrik ve mekanik form hem verimlilikleri hem de kolay dönüşüm sağlamaları yönünden kullanışlıdır. Isıl depolama teknikleri ise genellikle sıcak enerji kaynakları veya ısı uygulamalarında kullanılırlar. Elektrik ve mekanik depolama tekniklerinin çok geniş kullanım alanları vardır ancak elektrik depolama teknikleri mekanik tekniklerden daha çok tercih edilir çünkü kullanılması kolay, hızlı, verimli, kurulum süresi kısa ve maliyeti düşüktür.

Değişen dünyada bir yandan elektrik piyasaları özelleştirmeleri diğer taraftan elektriğe bağımlılığın artışı söz konusudur. Özelleştirmelerle birlikte oluşan piyasa, tüketicilerin enerji sağlayıcılarını seçme şansı veriyor. Elektrik piyasasında kaynak çeşitliliğinin artması ile şebeke sistemi farklı kaynaklardan (yenilenebilir) beslenir duruma gelmiştir. Yenilenebilir enerjilerin oranının şebeke içinde artması süreklilik ve güvenilirlik açısından şebekeyi olumsuz etkilemektedir. Piyasanın özelleşmesi ile birlikte, rekabetin artması, enerji kalitesi, süreklilik ve ucuzluk gibi olumlu gelişmelerin olması beklenir. Tüm yukarıda sayılanlar düşünülecek olursa depolama tekniklerinin kullanılması ile mevcut olan veya gelecekte ortaya çıkabilecek sorunlar ortadan kaldırılabilir. Bu yönleri ile depolama teknolojileri çok önemli bir konuma gelmiştir.

Elektrik kolaylıkla ve verimli bir şekilde diğer enerji formlarına dönüştürülebilmesi nedeniyle en kaliteli enerji formlarındandır. Ancak, enerjinin elektrik olarak depolanması pahalıdır ve teknolojik olarak verimli değildir. Dolayısıyla elektrik enerjisinin depolama sistemlerinin birçoğu dolaylı depolama sistemleridir. Diğer bir ifade ile elektriğin diğer enerji formlarına dönüştürülerek ihtiyaç anında hızla devreye sokacak şekilde bekletilmesidir. Elektrik ihtiyacın az fiyatın düşük ve enerjinin fazla olduğu saatlerde dönüştürülerek hava, su veya kimyasal formda depolanabilmekte ve

ihtiyacın olduğu saatlerde en fazla birkaç dakika içerisinde elektriğe dönüştürülerek kullanıma sokulabilmektedir. Talebin yüksek olduğu veya bir problem oluştuğu yada bakım gereken zamanlarda elektrik enerjisinin depolanması şebeke sistemini destekler. Ayrıca şebeke sisteminde dengeleme problemleri oluştuğunda devreye girerek enerji açığını kapatabilir. Bu yolla enerjide süreklilik sağlanmış olur.

Hidrolik, biokütle, konvansiyonel yakıtlar elektrik üretmeden önce depolanabilirken rüzgâr, güneş ve dalga enerjisi elektrik formuna çevrildikten yani elektrik üretildikten sonra depolanmayı gerektirir. Yani rüzgâr ve güneş gibi kesintili enerji kaynaklarında arz ve talebi eşleştirmek veya aynı ana denk getirmek bugünün teknolojisiyle mümkün değildir. Bu nedenle var oldukları anda ihtiyaç olmasa bile elektriğe dönüştürerek üretilen elektriği başka formlarda depolamak suretiyle ihtiyacın olduğu anlarda kullanılabilme olanağı yaratılmış olmaktadır. Aynı zamanda fosil yakıtlı elektrik santrallerin sistemdeki fazla olan enerjisi aynı yöntemlerle depolanarak kaynakların daha verimli kullanımı sağlanmış olmaktadır.

Teknolojik olarak çeşitli depolama sistemleri mevcuttur. Genel olarak üç ana başlık altında sınıflandırılabilir.

Teknolojisine göre;

Mekanik: Hazneli Pompalı Hidrolik Sistemler, Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama (SHED), Volanlar

Elektrik: Süper İletkenler

Kimyasal: Piller, Bataryalar

Manyetik: Süper Kapasitörler

Güç ve Enerji Sınıfına göre ;

Büyük Ölçekli

Küçük Ölçekli

Uygulama Alanlarına göre;

Kısa dönem arz güvenliği için

Enerji kalitesi ve güvenilirliği için

Şebeke uygulamaları için

Kaynakların verimli kullanılması için

Yukarıdaki sınıflandırmalar ile birlikte depolama tekniklerinin değerlendirilmesinde aşağıdaki kavramlar depolama tekniğinin performansını tanımlamada kullanılmaktadır; Güç Kapasitesi (MW): Depolama tekniğinin şarj ve deşarj esnasındaki birim zamandaki maksimum enerji depolayabilme ve deşarj edebilme oranıdır.

Enerji Kapasitesi (MWh): Depolama sisteminin depolayabileceği toplam enerji miktarıdır.

Güç Yoğunluğu: Her birim hacim depolamanın enerji kapasitesidir.

Enerji depolama teknolojileri yukarıda da gösterildiği gibi birçok farklı form ve uygulamalara ayrılabilir. Ancak kullanıcılar için teknik ve ekonomik ölçütler en uygun teknoloji seçimi için çok önemlidir. Her bir teknoloji farklı uygulama alanları, cevap süreleri, fiyatlar gibi özellikleri ile birbirinden ayrılmaktadır. Örneğin depolanması gereken enerji miktarı çok fazla, uygun coğrafi koşullar mevcut ise hazneli pompalı sistemler kullanmak uygun olabilir. Yada çok kısa süreler (milisaniye(ms)) için büyük enerji ihtiyacı olabiliyorsa bu durumda süperkapasitörler kullanılabilir. Bunun yanında kimyasal batarya yada pillerin her durumda kullanılacak bir depolama sistemi olduğunu da belirtmek gerekir. Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santraller (PDHES) ve Sıkıştırılmış Hava Depolamalı Elektrik Santraller (SHDES) istenilen büyüklükte saatlik, günlük, haftalık veya mevsimlik depolamalar yapılabilmektedir. Bu santralardan 20 MW' ın üzerinde kurulu güce sahip olanlar genellikle kısa dönem arz güvenliği, sistem stabilitesinin sağlanması ve frekans kontrolü gibi amaçlar için kullanılırken, küçük ölçekli olanları kesintili enerji kaynaklarının sistemi bozucu etkilerini azaltmak, süreklilik kazandırmak verimliliklerini ve pazarda rekabet gücünü artırabilmek için birlikte planlanmaktadır. Kullanıcılar ihtiyaçlarına göre en uygun teknolojiyi seçmelidirler.

Volanlar, yakıt pilleri, süper kapasitörler gibi sistemler ise çok daha küçük ölçekli kW boyutunda depolama yapabilen sistemlerdir. Uzay araçlarında, meteoroloji istasyonlarında, büyük parklarda, kırsal alanlarda, bazı askeri uygulamalarda, laptop bilgisayarlarda, küçük elektronik cihazlar için portatif sarj istasyonu olarak, yerleşim alanlarından uzak bölgelerde güç kaynağı olarak, kullanılabilen, ulaşım ve

haberleşme alanlarının yanında son yıllarda kesintili karaktere sahip yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi yapan santraller ile hibrit olarak planlanmaktadır. Teknik ve ticari anlamda henüz istenilen olgunluğa ulaşamamıştır. ABD ve Avrupa'da çok ciddi çalışmalar yapılmakta yakın gelecekte ticari olarak yaygınlaşabilecek düzeye geleceği düşünülmektedir. Bununla beraber elektrik enerjisi depolama teknolojilerinin gelecekte daha da gelişerek kullanım alanları daha fazla arttırılarak şebeke içindeki yararlanma oranları yükseltilebilecektir. Bu alanda küçük ölçekli birkaç çalışma dışında Türkiye'de kayda değer herhangi bir çalışma bulunmamaktadır

2.3. Enerji Depolama Yöntemleri

Depolama sistemleri teknolojik açıdan incelenecek olursa, aşağıdaki başlıklar altında sıralanabilir.

2.3.1. Mekanik Enerji Depolama

Hazneli Pompalı Hidrolik Sistemler

Ticari hayatın tümünde şu an itibariyle kullanılmakla beraber en eski ve en büyük enerji depolama teknolojisi olan hazneli pompalı hidrolik sistemler, mevcut donanımlarla kapasitesi 1000 MW veya üzerinde olabilmektedir. Ayrıca, geleneksel hazneli pompalı hidrolik sistemlerde dikey şekilde konumlanmış iki adet su rezervuarı bulunmaktadır. Enerji, düşük rezervuardan yüksek rezervuara çıkarılarak depolanır. Daha sonra, ihtiyaca göre düşük rezervuardan enerji geri çekilebilir. Bu haliyle depolanan enerji, fiziğin önemli prensiplerinden olan potansiyel enerjiye dönüştürülmektedir. Depolanan enerji Joule cinsinden formüleştirelirse:

$$E_s = V \cdot \rho \cdot g \cdot h$$

ile ifade edilebilir. Formülde V pompalanan su miktarını (m^3), ρ suyun yoğunluğunu ($1000 \text{ kg}/m^3$), g yerçekimi ivmesini ($9,81 \text{ m}/s^2$) ve h (m) rezervuarlar arası mesafeyi göstermektedir.

Hazneli pompalı hidrolik sistemler ne kadar mekanik depolama teknolojisi olarak anılsa da en fazla elektrik üretim amacıyla kullanılmaktadır. Elektriğin çok az kullanıldığı

zamanlarda su düşük seviyeden yüksek seviyeye pompalanarak enerji depolanır ve ihtiyaç olduğu zamanlarda tekrar elektrik üretilir. Bazı seviyesi yüksek hidrolik barajlarda hazneli hidrolik pompalı sistemler kullanarak depolama kapasiteleri artırılır. Böylece üretecekleri enerji miktarı artar. Yeraltı Hazneli Pompalı Sistemler akışı için mağara veya maden oyukları kullanılır ancak bu yol pahalıdır. Açık denizde eğer uygun bir yer varsa alçak rezervuardan yüksek rezervuara deniz suyu taşınarak kullanılabilir.

1999 yılında Japonya'nın Yanbaru kentinde 30 MW'lık deniz suyu pompa santrali kurulmuştur. Hazneli pompalı büyük ölçekli santrallerde deşarj olma süresi birkaç saatle birkaç gün arasında değişmektedir. Günümüzde dünyada 90 GW'ın üzerinde hazneli pompalı depolama sistemleri çalıştırılmaktadır ve yaklaşık olarak dünya elektrik üretim kapasitesinin %3'üne karşılık gelmektedir. Hazneli pompalı depolama sisteminin en olumsuz tarafı coğrafi olarak uygun yerlerin az olması bunun yanında kurulum süresinin ve maliyetinin yüksek olması denilebilir. Ayrıca hazneli pompalı depolama sisteminin uygun maliyetli olabilmesi için çok büyük depolama kapasitesine sahip olması gerekir. Ancak birçok enerji üretim santralinde depolama sistemi olarak kullanılmaktadır. Günümüzde hazneli pompalı depolama sisteminin verimliliği % 80 civarındadır. Uygun motor ve bölümlendirmeler ile titreşimler azaltılarak sistemin kullanım süresi de arttırılabilir.

Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama

Hava enerjisi 19'uncu yüzyıldan beri maden ocaklarındaki güç lokomotiflerinde, bir zamanlar da savaş gemilerinin torpidolarına itici güç sağlanmasına temel teşkil etmiştir. Hava enerjisi ve bu enerjiyi kullanma fikri pek de yeni sayılmaz.

Sıkıştırılmış havayı depolama sistemi, bir hava depolanma tankının içinde enerjinin yoğun kullanımın gerektirmediği yani düşük kullanımın olduğu zamanlarda bir kompresör vasıtasıyla enerjinin depolanmasını sağlar. Enerji türbinine takılmak üzere, jeneratör için gerekli biri yükleme komutu ve diğeri de boşaltma komutu olacak şekilde çifte komut vermek amacıyla sızdırmayan özel bir tutacak gereklidir. Üç rezervuar çeşidi genellikle şunları içerir: doğal yeraltı kaynakları, erimiş tuz solüsyonları ve kayalardan oluşan fiziksel oluşumlar. Şarj olma esnasında, sıkıştırılmış hava rezervuara

gönderilirken santral jeneratörü kompresör ile tersine hareket ederek mekanik enerji ihtiyacı sağlar. Santral deşarj olduğu zamanlarda ise sıkıştırılan hava içten yanmalı türbinleri çalıştırmak için kullanılır ve bu süreçte doğal gaz yakılarak aynı yolla türbinler hareket ettirilerek elektrik üretilir.

Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama (SHED) mevcut teknolojilerle uygulanan yeni bir depolama tekniğidir. SHED içten yanmalı türbinle ortak çalıştığı sistemler mevcuttur. Geleneksel bir gaz türbini, üç temel bileşenden oluşur. Bunlar kompresör, yanma odası ve genişleticidir. Sıkıştırılan hava ve yanma hücresindeki yanan yakıtın genişleticide türbin kanatlarını çevirmesi ile güç üretilir. Yaklaşık olarak genişletici ile oluşturulan mekanik gücün %60' ı yanma odasına sağlanan sıkıştırılmış hava ile tüketilir. Bir SHED tesisinde kompresör işlerini ayrı ayrı yapar. Sıkıştırılan havayı depolar ve daha geç bir zamanda basitleştirilen bir yanma türbinine onu şırınga eder. Basitleştirilen türbin, yanma odası ve genişleme türbini içerir. Basitleştirilmiş bir türbin konvansiyonel bir türbinden aynı yakıtta daha fazla enerji üretir. Çünkü sıkıştırılmış hava kompresöre harcanan işe gerek kalmadan yanma odasına gönderilir.

Bir SHED santralinin depolama net verimliliği sıkıştırmada meydana gelen sıcaklıktan dolayı sınırlanır. Enerji depolama verimliliği yaklaşık %75 civarındadır. SHED tesislerinde sıkıştırılmış havanın genişlemesi esnasında çok düşük sıcaklıklar oluşabilmekte bu durum malzemelerde kırılabilirlik veya donmaya sebep olabilmektedir. Eğer %100 yenilenebilir enerji üretimi olması istenirse, biyo yakıtlar gaz türbinlerinde kullanılabilir. Sistemden karbon salınımı, sıfır konumuna gelecektir ancak diğer emisyonlar hala salınmaya devam edecektir. Sıkıştırılan hava, yeraltında uygun olan maden ocaklarında, büyük mağaralarda, tuzlu kayaların içinde depolanabilir. Tipik olarak sıkıştırılmış hava kullanımı ile üretilen elektrik, konvansiyonel olarak üretilen elektriğin üçte biri kadar daha ucuzdur. Almanya'da 290 MW'lık sıkıştırılmış hava ile elektrik üretimi tesisi 1980'lerden beri faaliyet göstermektedir. ABD'de Alabama Elektrik Şirketi'nin işlettiği sıkıştırılmış hava tesisi, 558 milyon litrelik hava depolama kapasitesine sahip bir mağarada bulunan basınçlı hava ile 110 MW'lık bir tesis işletmektedir. Tesis 26 saat süre ile elektrik üretebilmektedir.

Günümüzde rüzgar enerji santralleri ile SHED sistemlerinin ortak çalıştırılmasına yönelik çeşitli araştırma geliştirme çalışmalarının yapılmakta olduğu görülmektedir.

Volan Enerji Depolama Sistemi (Atalet Depolama)

Yüksek devir sayısı ile dönen bir rotorun sağladığı atalet ile volan sistemi enerji depolar. Enerjinin korunumu kanununa göre sistemden enerji alındığında devir sayısı azalır. Ters olarak da sisteme enerji verildiğinde devir sayısı artar. Devir sayısı yaklaşık 75.000 devir/dakika'yı bulabilir.

Volan ile enerji depolama sistemi bazı uygulamalarda kullanılsa da halen araştırma ve geliştirme aşamasındadır ve birkaç yıl sonra ticari olarak kullanıma hazır hale geleceği düşünülmektedir. 1950'lerde İsveç Yverdon'da volan enerji depolama sistemi kullanan ve ismine gyrobus denen araçlar kullanılmıştır. 1990'larda Rosen Motor firması 55.000 devirli bir volanın kullanıldığı gaz türbinli hibrid bir otomobil geliştirmiştir. Bu otomobil aynı zamanda rejeneratif frenleme de yapıyordu. 1997 yılında bu araç test edilmesine rağmen seri üretime geçmemiştir. 2010 yılında İngiltere'de volan enerji depolama sistemini kullanan 'Flybus' isimli bir otobüs geliştirilmiştir. Akülü hibrid sistemlere alternatif olarak geliştirilen bu otobüs, şehir için kullanımında %20 daha az yakıt kullanımı sağlamıştır. Bunun dışında elektrikli lokomotiflerde de kullanılan volan sistemi aynı zamanda demir yollarının elektrifikasyonunun sağlanmasında da kullanılmıştır.

2.3.2. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama

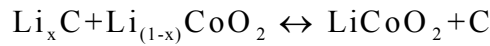
Bu sistemlerde depolama şekli en basit anlatımla, süperiletken bobin içerisindeki akan akım ile oluşan manyetik alan içerisinde enerjinin depolanmasıdır. Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES) sisteminin temel olarak içinde şu bileşenler vardır; süperiletken bobin (cryostat), enerji dönüşüm sistemi (bobin içi ve dışına enerji transferi için) ve soğutma sistemidir. SMES' nin avantajları, çok yüksek verimlilik (yaklaşık %97-98), çok kısa sürede isteklere cevap verme (20-30 ms), aktif ve reaktif gücün

bağımsız kullanılabilmesi, uzun ömürlü olmaları diye sıralanabilir. Yukarıda bahsedilen özellikleri ile birçok alanda kullanılan depolama tekniğidir. Özellikle elektrik şebeke sisteminde pik yüklerin karşılanması, frekans kontrolü, sistem kararlılığı ve yük akışı kontrolü gibi önemli noktalar için kullanılacak özellikleri ile diğer depolama tekniklerinden ayrılan yegane depolama birimi denilebilir.

2.3.3. Elektrokimyasal Enerji Depolama ve Bataryalar

Lityum-İyon Piller

Günümüzde bu çeşit piller elektronik cihazların yaklaşık hepsinde kullanılmaktadır. Lityum iyon pil, yüksek enerji depolama kapasiteleri, düşük iç direnç ve %90' ın üzerinde verimliliğe sahip olmalarından dolayı kullanımları yaygındır. Teknik olarak uygun sıcaklık ve maksimum kapasitelerine dikkat edilerek çalıştırılmalı aksine halde lityum iyon pillerin verimleri azalır. Yüksek verimleri ve enerji yoğunlukları ile lityum iyon piller enerji kalitesinin önemli olduğu yerlerde, dağıtım sistemlerinde ve otomotiv alanlarında kullanım için çok uygundur. Teknik yapısı ise; pilin eksi kutbu lityum metal oksit (LiCoO_2 , LiMO_2 , vs.) ve artı kutbu grafik karbon tabakası ile yapılmıştır. Lityum tuzu (LiPF_6) içeren elektrotlar organik karbonatlarla çözülmektedir. Örnek olarak lityum iyon pilin kimyasal formülü ise şöyle verilebilir

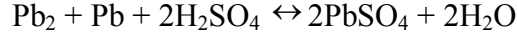


Pil şarj edilirken, katottaki lityum atomları iyonlaşır ve elektronlar ile birleşirler daha sonra lityum atomları olarak karbon tabakaları arasında depolandıkları karbonatlar anot yönünde elektrolit boyunca ilerlerler. Bu süreç boşalma sürecinde tersine hareket eder/ettirilir. Lityum iyon pillerinin birçok avantajı vardır. Bunlar; uzun süreli kullanım ömrü, yüksek enerji yoğunluğu, küçük taşınabilir olmaları, bakım gerektirmemesi, geniş sıcaklık aralığında çalışabilme diye sıralanabilir. Dezavantajları ise yüksek kurulum maliyeti ve kapasiteden fazla şarj olma tehlikesi denilebilir.

Kurşun Asit Pilleri

Kurşun asit pilleri en eski ve olgun teknolojiye sahiptir. Temel formda, negatif elektrotta kurşun (Pb) içerir. Pozitif elektrotta kurşun dioksit (PbO_2) ve elektrik yalıtım

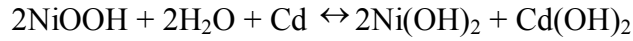
tabakası bulunur. Deşarj için sulandırılmış sülfürik asit (H₂SO₄) sülfat iyonları sağlar. Kimyasal olarak aşağıda görüldüğü gibi ifade edilebilir.



Güç kalitesi için düşük maliyetli depolama uygulamalarında genellikle kurşun asit piller kullanılır. Uygulamaları sınırlıdır. Çünkü kısa bir kullanım ömrü vardır. Kurşun asit piller otomobillerde, motosikletlerde, botlarda ve çeşitli diğer endüstrilerde, çalışma, aydınlatma ve ateşleme amacı ile kullanılırlar. Avantaları ise düşük maliyet, yüksek güç yoğunluğu, yüksek ve düşük sıcaklıklarda yüksek performans, servis ağının yüksek olması ile bakımının kolay olmasıdır. Dezavantajları ise kısa süreli kullanım ömrü, enerji saklama süresinin az olması (kendi kendine deşarj olması) ve deşarj olurken depolama yapmadaki zayıflığı olarak sıralanabilir

Nikel-Kadmiyum Pilleri

Nikel-Kadmiyum (NiCd) pilleri kullanım olarak çok yaygın değildir ve yaklaşık verimlilikleri %75' tir. NiCd pillerinin reaksiyonu kimyasal olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir

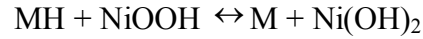


Nikel Kadmiyum pilleri kadmiyum adı verilen malzeme ile kaplıdır. Kadmiyum zehirli ağır bir metaldir. Son 30 yıla bakıldığında dünya üzerindeki kadmiyumun 2/3 ü NiCd pillerde kullanılmıştır. Kasım 2003' te Avrupa Komisyonunun yeni pil direktifleri ile NiCd pillerinin %75 oranında geri kazanımı amaçlanmıştır. Ancak NiCd' dan şarj edilebilir pil yapılmasının yasaklanması istenmesine rağmen hala kullanılmaya devam edilmektedir. Gelecek yıllarda da kullanılmaya devam edeceği öngörülmektedir. Nikel-Kadmiyum pillerinin devamlı şarjda tutulup kısa süreler için kullanılması çalışma verimliliğini azaltır. Eğer devamlı kullanılıp deşarj ve ardından şarj edilmiyorsa belirli aralıklarla tam olarak deşarj edilmesi gerekir. Aksi halde hücrelerdeki plakalar üzerinde kristalleşme oluşur (buna aynı zamanda hafıza etkisi de denir) ve bunun sonucu olarak zamanla pilin verimi düşmeye başlar. NiCd pilleri hala çok geniş bir kullanım alanına

sahiptir. Örneğin acil aydınlatmalar, telekomünikasyon sistemi, güneş enerji istasyonları, uzay araçları vs. diye sıralanabilir.

Nikel-Metal Hibrit Pilleri

Nikel Metal Hibrit (NiMH) pilleri aşağıda gösterilen kimyasal formüle göre çalıştırılır



NiMH pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve içinde çevreyi kirletmeyen bileşim ve metallerin bulunması en önemli özelliğidir. Günümüz Nikel metal hibrit pili normal bir nikel kadmiyum pille karşılaştırıldığında %40 saha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Aslında bileşimleri göz önüne alındığında daha yüksek verim elde edilebilir ama bu kazanç ne yazık ki bazı yan etkileri de ortaya çıktığı için tercih edilmemektedir. Hala bu piller yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ancak diğer pil teknolojileri (Lityum İyon gibi) çıkmasıyla birlikte aynı piyasada yer almaları kendi önünde bir engel oluşturabilir. NiMH pillerin avantajlarına bakılacak olursa Nikel kadmiyum pillerden %30-40 daha fazla kapasite ve bunun yanında bu değerlerin çok daha üstünde bir enerji yoğunluğuna erişilebileceği de öngörülmektedir. Hafıza etkisine nikel-Kadmiyum pillerden daha az eğilimlidirler ve daha az sayıda periyodik deşarj-şarj döngüsü gerektiriyorlar. Çevre dostu çok hafif zehirli madde içeriri, geri dönüşümü kolay ve etkindir. Kullanım alanları çok geniştir.

Akümülatörler

Enerji depolamak için yaygın olarak kullanılır. En iyi bataryalar kurşun asit akümülatörlerdir. Bunlar azar azar şarj için çok uygundur. Elektriksel çıkışın miktarı, verimliliği aşağı yukarı %80 -%90, enerji %70 -%80 arasındadır. Büyük tesisler için kalın plakalı bataryalar kullanılır. Küçük tesisler için traksiyoner akümülatörler yeterlidir. Akülerin çabuk bozulmasının ana nedenleri aşırı şarj, aşırı deşarj ve uzun süre boş durumda bırakmaktır. Nikel kadmiyum bataryalar tavsiye edilmez çünkü küçük güçlerde verimleri çok düşüktür ve kurşun asit bataryalarinkinden daha azdır. Bunun

yanında ne aşırı şarjdan ne de düzensiz aşırı deşarjdan etkilenmezler, kendi kendine deşarj olmazlar ve kurşun asit tipe göre soğuktan daha az etkilenirler.

2.3.4. Süperkapasitörler (Ultrakapasitörler)

Elektrik enerjisi kondansatörlerde depolanabilir. Kondansatörler enerjiyi pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla depo eden cihazlardır. Kapasitörler iki tane iletken plaka ile bunları ayıran ve dielektrik olarak adlandırılan yalıtkanlardan oluşmaktadır. Dielektrik malzeme iki levha arasında ark oluşmasını önleyerek daha fazla şarj yapılmasına yardım eder. Klasik kapasitörlerin güç yoğunlukları çok yüksektir (yaklaşık olarak 10^{12} W/m³). Fakat enerji yoğunlukları çok düşüktür (yaklaşık olarak 5 Wh/m³). Klasik kapasitörler genel olarak elektrolitik kapasitörler olarak adlandırılırlar. Süperkapasitörler (Ultrakapasitör diye de adlandırılır) ise klasik kapasitörlerin geliştirilmiş olanlarıdır. Bu kondansatörlerin güç yoğunlukları 10^6 W/m³ ve enerji yoğunlukları 10^4 Wh/m³ değerindedir. Enerji yoğunlukları az fakat deşarj süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha fazladır. Ancak kapasitörlerin asıl olarak boyut problemleri vardır. Kapasitörlerin kapasitesi ve dielektrik malzeme arasında lineer bir bağıntı vardır. Bu yüzden büyük kapasite gerekli olduğunda zorunlu olarak dielektrik malzeme de büyük olmak durumunda olmalıdır. Süperkapasitörler yapıldıktan sonra çok büyük kapasiteler gayet küçük boyutlardaki kapasitörlerle yüksek enerji depolamaya olanak sağlanmıştır.

Süperkapasitörler geliştirilmiş birçok özelliklerinden dolayı enerji depolama yetenekleri konvansiyonel kapasitörlerden daha fazladır. Ek olarak süperkapasitörler şarj edilme hızı konvansiyonel kapasitörlerden hızlıdır, pillere göre çok daha kısa sürede tekrar şarj olma özelliğine sahiptir ve kullanım süresi uzun olduğu gibi, piller gibi depolama kapasitesi azalmadan şarj, deşarj yapılmaktadır ve -25°C ' ye kadar çalışmasını sürdürebilir.

2.3.5. Hidrojen ile Enerji Depolama

Hidrojen, arz fazlası elektrik enerjisi ya da rüzgar türbini gibi yenilenebilir enerji sistemleri tarafından üretilen enerji ile suyun elektroliz edilmesi ile elde edilebilir.

Hidrojen daha sonra sıkıştırılır ve silindirlere veya düşük basınçta gaz tutucularda depolanarak ısıtma, yemek pişirme veya bir motoru çalıştırmakta kullanılabilir. Diğer bir yol, sıkıştırıldıktan sonra gerektiğinde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine doğrudan dönüştüren yakıt hücrelerine hidrojen vermektir. Verimlilik %60 ile %70 dir.

Hidrojen, sıvı veya gaz bir kimyasal bileşik içinde depolanabilir. Genellikle gaz halinde depolanmaktadır. Yoğunluğunun düşük olmasından dolayı çok yer kaplamasını önlemek için basınçlı tank veya sıkıştırılmış tüplerde depolanır. Aynı zamanda mevcut hacme her bir ilave m³ hidrojen depolaması için 0.068 atm' lik basınca ihtiyaç vardır. Gaz şeklinde depolama için kullanılacak tankların yapımı için en uygun malzeme karbon/alüminyum karışımı olan malzemelerdir. Bu malzemeler hafif ve güvenlidir. Ancak fiyatı çok yüksektir.

Sıvı halde depolama ise gaz halindeki yoğunluğun yaklaşık 845 katı olmaktadır. Ancak sıcaklık çok düşük derecede (-253 °C) olmaktadır. Hidrojen sıvılaştırıldığında çok soğuktur ve enerjisinin yaklaşık %30 u soğumaya ve sıvılaşmak için sıkıştırılmaya harcar. Sıvı tip depolamaların en büyük dezavantajı ise tank maliyetleri ve buharlaşma kayıplarıdır. Çünkü 0 °C' de sıvı hidrojen kaynamaya başlar.

Metal hibrit depolama şeklinde ise hidrojenler granüler metallerin atomları arasındaki boşluklara depolanır. İnter metalik bileşikler denilen bu tür maddeler hidrojeni bir sünger gibi emip bünyesi içerisinde saklayabilmektedir. Daha çok hidrojen depolayabilmeleri için yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip olmaları gerekmektedir. Ancak bu durumda bile aracın enerji tüketiminin yarısı metalden hidrojeni açığa çıkarmak için harcanmaktadır. Diğer yöntemlere oranla daha ılımlı basınçlara gereksinim duyan bir yöntemdir ve oldukça ağırdır. Sıkıştırılmış gaz veya sıvı depolamanın aksine metal hibrit yeniden doldurmada çok az enerji gerektirir. Bunun yanında yanma ya da oksidasyon olmadan hidrojenin açığa çıkarılması gerekir.

Kimyasal depolama tekniği olarak ise yapılan çalışmalarda sodyum potasyum veya lityum bileşikleri üzerinde depolama yapılabilmesidir. Bu çalışmalarla sulu ortamda

hidrojen açığa çıkarılır ve sodyum hidroksit, potasyum hidroksit vb. gibi geri dönüşümlü maddeler ortama verilir.

Hidrojen Depolama, hidrojen, rüzgâr türbini tarafından üretilen doğru akımla suyun elektroliz edilmesi ile elde edilir. Hidrojen daha sonra sıkıştırılır ve silindirlere veya düşük basınçta gaz tutucularda depolanarak ısıtma, yemek pişirme veya bir motoru çalıştırmakta kullanılabilir. Diğer bir yol, sıkıştırıldıktan sonra gerektiğinde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine doğrudan dönüştüren yakıt hücrelerine hidrojen vermektir. Verimlilik %60 ile %70' dir.

2.4. Kompresör

Genel olarak havayı veya diğer gazları atmosfer basıncından daha yüksek basınçlara sıkıştırmak için kullanılan makina. Belirli bir oranda kompresörler kısmi vakum elde etmede veya atmosfer basıncının altına inmek için de kullanılır. Bu durumda pompa havalı yerdeki hava veya gazı dışarı atar.

2.4.1. Kompresörün Tarihçesi

Kompresörün tarihçesi oldukça eskidir. Ancak 1650 Otto von Guericke'nin kompresör ve vakum pompalarında önemli gelişmeler yaptığı bilinmektedir. 1829'da William Mann basınçlı hava kompresör makinasının patentini aldı. Bu gelişmelerle, ekonomik alanda daha hafif makineler elde edildi.

1872'den sonra sıkıştırma ile beraber soğutma da yapıldı. Bu yöntemde, silindirin içinde su jeti fişkırtılmaktaydı. Bu sistemde çalışan kompresörler bazı problemleri de yanında getirdi. Bu tür işlem terk edilerek etrafında su elbisesi bulunan kompresörler kullanılmaya başlandı. Bu tür ıslak kompresörler günümüzde hala kullanılmaktadır

2.4.2. Kompresör Türleri

Pistonlu Kompresörler

Bu türde, pistonun ileri-geri hareketi ile hava sıkıştırılır. Pistona bağlı havanın içeri girmesi ve çıkması için kapakçıklar bulunur. Genel olarak, kompresörde dönme hareketini gel-git doğrusal harekete çeviren, biyel mekanizması bulunur. Sıkıştırılacak akışkan, pistonun giriş kapakçığı ile emilerek alınır. Piston hacmi en büyük olduğu

zaman giriş kapakçığı kapanır ve piston ileri doğru hareket eder. Akışkana basınç tatbik edilir ve basınç arttığı zaman çıkış kapakçığı açılır ve akışkan dışarı atılır. Kompresör tek yönlü çalışan türden ise, gaz veya hava olan akışkan tek bir taraftan emilerek basılır. İki yönlü çalışan kompresörlerde pistonun bir tarafından akışkan emilirken, diğer taraftan dışarı basılır. Daha sonra bu işlem yön değiştirerek devam eder. Eski kompresörler buhar makinasındaki büyük silindir hacmine, düşük hıza, iki yönlü çalışmaya ve yatay eksene sahiptirler. Ancak otomobillerdeki içten yanmalı motorun gelişmesiyle, küçük hacimli kısa hareket mesafeli, çok silindirli, yüksek hızlı ve düşey eksenli kompresörler yaygınlaşmıştır.

Eğer hava yüksek basınçlara çıkarılırsa, sıcaklığı artar ve silindir ve pistonun yağlama sisteminde problemler doğurur. Bu sebepten ve güçten tasarruf sağlamak amacıyla birden fazla silindirli pompalar kullanılır. Birinci silindir, geçen basıncı biraz yükseltmiş havanın soğuk su kullanılarak sıcaklığı düşürülür. Daha sonra bu hava yüksek basınç silindirine basıncının daha yükseltilmesi için gönderilir.

Genel olarak bu türler az miktardaki havayı yüksek basınca çıkarmak için en uygun türlerdir. Sabit hızla çalıştığı zaman, belirli miktardaki havayı yüksek basınçta ve en yüksek verimde verir. Ancak sıcaklıkla, silindirdeki yağın buharlaşıp sıkıştırılan gaza karışması bazen arzu edilmeyebilir. Mesela, besin hazırlanması hususu böyle bir duruma örnek sayılabilir.

Bu tür kompresörler, yaygın bir şekilde, az miktarda yüksek basınçlı havaya ihtiyaç duyulan aletlerin işletilmesi, dökümlerin temizlenmesi gibi işlerde kullanılır. Ayrıca benzer ilkelere göre benzin veya buharla çalışan üfleyici motorlar, demir cevherinden, dökme demir elde edilmesi sırasında yüksek fırınlarda kullanılmaktadır. Mesela 0,9 tonluk demir yaklaşık 4 ton veya 2800 metre küp havaya ihtiyaç gösterir. Çelik yapımında kullanılan Bessemer fırınlarına hava temin etmekte de benzer kompresörler kullanılır.

Dönel kompresörler

Bunların da esas olarak üç türü vardır: Merkezkaç kompresörler, eksenel akımlı kompresörler, dönel pozitif yer değiştirmeli kompresörler.

Merkezkaç kompresörler: Bu tür kompresörde hava veya başka gaz merkezi olarak dairevi hazneye alınır. Buradaki hava dönme hareketi sonucu, merkezkaç kuvveti tesiri altında hızlanır. Ancak dış kısma ulaştığında hızı düşer. Bernouilli ilkesine göre hızın düşmesi basıncın artmasına sebep olur. Buradan hava toplanma halkasına alınır ve dışarı sevk edilir.

Makine yüksek hızla döndüğü için, dengelenmiş, yani ağırlık merkezinin dönme ekseninde olması gerekir. Küçük bir sapma bile makinede büyük titreşimlere ve hasarlara sebep olur.

Bu tür kompresörler basit kullanışlı olup, kapakçıklara ihtiyaç göstermezler. Yağlama olmadığı için basınçlanmış havada yağ buharı bulunmaz. Dönme yataklarından başka sürtünen parça olmadığı için çalışma masrafı da düşüktür. Yüksek hızdan dolayı büyük miktardaki havayı fazla yüksek olmayan basınca getirmek mümkündür. Basıncı hava sürekli olarak çıkar ve basınç dalgalanmalarını düzenleyecek bir ana hazneye ihtiyaç duyulmaz. 0,5 kgf/cm²lik basınca kadar tek kompresör yeterse de, daha yüksek basınçlar için seri şeklinde düzenlenmiş kompresöre ihtiyaç duyulur. 2,5 kgf/cm²nin üstündeki basınçlar için ise ana soğutması gerekli olabilir. Bu durumda bir devreden diğer devreye geçen havanın sıcaklığı düşünülerek soğutulur.

Eksenel akımlı kompresörler: Bu tür kompresörde hava dönme eksenine paralel olarak hareket ederek, helisel şekilde ilerler. Bu sırada da sürekli basınç artar. Bir anlamda çalışma sistemi türbinin tersine uygundur.

Tipik bir eksenel akımlı kompresörünün parçaları:

1. Pervane veya türbin kanatları olan ve kompresörün iç cidarını meydana getiren kısım.
2. Çıkış kısmını meydana getiren ve dönen kısmı mesnetleyen yatak bölümü.

3. Duran ve kompresörün dış cidarlarını meydana getiren kısım. Montaj kolaylığı bakımından iki yarı daire şeklinde imal edilir. İçinde helisel olan ve pervane kısımları ile uyuşan kanallar mevcuttur.
4. Çalışması sırasında giren hava hızlandırılır ve daha sonra hızı düşürülür, bu arada Bernouilli ilkesine göre basınç yükselir.

Birbirine eklenebilen bölümlerden ibaret olması, küçük hacim kaplaması, dönen kısımların merkezi bulunması ve bu sebepten merkezkaç kuvvetinin düşük olması bu türün tercih sebebidir.

Dönel pozitif yer değiştirmeli kompresörler: Bu tür pompada, hava dış merkez pompalarla birbirini takip eden küçük hacimlere alınır. Hacim azaldıkça basınç artar. Motorun dönen parçası, akışkanı girişten çeker, etrafında döndürür ve çıkıştaki yüksek basınç kısmına verir. Doğalgaz endüstrisinde gaz ölçüsü olarak kullanılır ve içinde is gibi yabancı madde bulunan gazlar, kolaylıkla bu kompresörden geçirilebilir.

Jet kompresörleri:

Genel olarak iki türü mevcuttur. Hidrolik kompresörler ve gaz ve buhar kompresörleri.

Hidrolik kompresörler: Düşen suyu veya basınç altındaki suyu, mekanik hareketli bir parça kullanmadan, havaya basınç uygulamak için kullanan kompresörlerdir. En basitinde yüksek seviyeli su kütlesi, düşük seviyeye getirilirken havaya da basınç uygulanır. Daha sonra basınçlı havadan su ayrılır. Bunların en yenileri Taylor kompresörü olarak isimlendirilir. İlk kurulma masrafı yüksek olmasına karşılık, verimi yüksek, işletme masrafları düşüktür.

Gaz ve buhar kompresörleri: Esas olarak basınçlı havanın veya buharın çıktığı bir ağız mevcuttur. Buradan yüksek basınçlı hava çıkarken genişler ve hızlı hareketi sırasında havayı da beraberinde sürükler. Daha sonra azalan kinetik enerji, basıncın artmasını doğurur. Bu tür pompa özellikle buharın zararlı etkisinin bulunmadığı yerlerde hava üfleyici ve ısı pompalarında ve havalandırma cihazlarında termo

kompresör olarak kullanılır. Kompresör basit olup, hareketli bir parçası yoktur. Kullanımı kolay ve bakım masrafı düşüktür. Buna karşılık pompa olarak verimi düşük olması en önemli sakıncasını teşkil eder.

Literatürde enerji depolama konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Sıkıştırılmış hava depolama sistemlerinin uzun dönem projeksiyonlarını Glendenning incelemiştir ve 1976 yılında yayınlamıştır (Glendenning 1976).

Enerji ağları için elektrik enerjisi depolama sistemlerinin araştırıldığı ve tartışıldığı bir çalışmada enerji depolama sistemlerinin karakteristikleri ele alınmış, elektrik enerjisini depolamada kullanılan pompalı hidrolik, sıkıştırılmış hava, ikincil bataryalar, süper iletken mıknatıslar, volanlar yada kapasitörler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve uygun kullanım alanları açıklanmıştır (Kondoh ve ark. 2000).

Büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin sera gazı salınımı ve yaşam çevriminde enerji gereksinimlerini incelenmiştir (Denholm ve Kulcinski 2004).

Chphelly ve ark. sıkıştırılmış hava ile enerji depolamanın en ucuz yöntemlerden biri olduğuna dikkat çekmiştir. Ancak basınçlı havayı elde ederken kullanılan dönüştürme yöntemlerinin fosil yakıtlar kullanılarak yapılmasının çevresel sorunları da beraberinde getirdiğini belirtmiştir. Yaptıkları çalışmada izotermal şartlarda çalışan pozitif yer değiştirmeli bir dönüşüm sistemi kullanarak bu olumsuz durumu gidermeyi hedeflemişlerdir (Chphelly ve ark. 2004).

Rüzgâr enerji sistemleriyle birlikte sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemlerinin enerji depolama tekniği olarak kullanılmasının ele alındığı çeşitli çalışmalara örnek olarak gösterilebilir (Denholm 2006), (Cavollo 2007), (Swider 2007).

Lemofouet ve Rufer çalışmalarında sıkıştırılmış hava enerjisini esas alan uzun ömürlü hibrit enerji depolama sistemini ele almışlardır. Enerji depolama ve boşaltmanın maksimum verimde yapıldığını öne sürmüşlerdir. Sistemin genel kavramını, güç-

elektronik ara yüz devrelerini ve özellikle maksimum verim noktası izleme algoritmasını ve çıkış gücünü değiştirmek için kullanılan stratejiyi tanımlamışlardır. İlave olarak hava makinesinin hidro-pnömatik dönüştürücü sistem ile yer değiştirdiği yüksek verimli depolama sistemi prensiplerini tanımlamaktadır (Lemofouet ve Rufer 2006).

Cavallo yaptığı çalışmada bir rüzgar enerjisi sisteminin sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemi ile beraber kullanılmasını incelemiştir. Yaptığı çalışmada teknik, ekonomik ve temin edilebilirlik açısından kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayabileceğini öngörmüştür. Bu sistemlerin sıkıştırılmış hava depolama sistemleri ile beraber kullanılması durumunda bu hibrit sistemlerden elde edilecek elektrik enerjisinin teknik ve ekonomik boyutlarda nükleer ve fosil yakıt güç sistemleri ile denk olabileceğini de belirtmiştir. Rüzgar /SHED/iletim sisteminin enerji fiyatlarını Avrupa elektrik fiyatları ile karşılaştırmış ve kontrol edilebilir rüzgar enerjisinin modern endüstride uygun ücretlerle kullanılacak kadar uygun olduğunu göstermiştir (Cavollo 2007).

Enerji depolama sistem karakteristiklerinin incelendiği en son çalışmalardan biri Ibrahim ve ark. tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışmada en göze çarpan nokta güç şebekesini desteklemek ve yükleme seviyelerini korumak için enerji depolama ihtiyacını tanımlamasıdır. Farklı tipte enerji depolama yöntemleri vardır. Bunlardan bazıları halen geliştirme aşamasında iken bazıları hali hazırda kullanılmaktadır. Ibrahim ve ark. yaptıkları çalışmada farklı enerji depolama tekniklerinin temel karakteristikleri ve uygulama alanlarını (kalıcı veya geçici, uzun veya kısa süreli depolama, maksimum güç ihtiyacı, vb.) karşılaştırmalı olarak ele almışlar ve en uygun tekniği belirlemek için çeşitli çalışmalar yürütmüşlerdir (Ibrahim ve ark. 2008).

Lund ve Salgi tarafından yayınlanan çalışmalarda sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri ele alınmıştır. Bu sistemlerin yenilenebilir enerji sistemlerinin de yer aldığı sürdürülebilir enerji sistemleri içindeki durumu Danimarka için incelenerek araştırılmıştır. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemini analiz etmek ve diğer esnek teknoloji sistemleri ile karşılaştırmak için belirleyici bir model kullanmışlardır Detaylı benzetimler içeren enerji istatistikleri ile bu sistemin günümüzde ve gelecekte

Danimarka enerji sistemi üzerinde uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçları ısı pompası ve hidrojen depolamayı içeren diğer alternatif sistemler ile karşılaştırmıştır. Diğer bir çalışmada ise verilen bir SHED düzeneği için verilen bir spot piyasada ve verilen bir yılda optimum çalışma stratejisini belirlemek için kullanılabilir bilgisayar destekli üç farklı yöntem tanımlamışlardır (Lund ve Salgi 2008).

Swider çalışmada stokastik piyasa modelini, sistem operasyonları üzerinde rüzgar enerjisi üretiminin etkilerini ve Almanya' da ki SHED yatırımlarının ekonomik değerlerini saptayabilmek için uygulamıştır. Çalışmada rüzgâr enerjisi sistemlerin yüksek bir esneklik ihtiyacını karşılayabildiğini ve bu esnekliğin SHED sistemi ile ekonomik boyutta gerçekleştirileceğini belirtmiştir (Swider 2007).

Mazhari ve ark. fotovoltaik sistemler (PV) ve depolama ünitelerini incelemiştir. Çalışmalarında bu karma sistemlerin kapasitesini optimum yapacak, elektrik enerjisinin gelecekteki ücretlerini ve akım değerlerini de hesaba katarak operasyonel karar politikası elde edilebilecek esnek bir araç tasarlamışlardır. Üç farklı senaryo için hedeflenen araç karma benzetim ve meta-heuristic optimizasyon temellidir (Mazhari ve ark. 2011).

Grazzini ve ark. adyabatik şartlarda çalışan, yanma olmayan enerji depolama sistemi (SHED) için termodinamik analiz yapmışlardır (Grazzini ve ark. 2008).

Baker yaptığı çalışmada enerji depolama sistemlerindeki gelişmeleri incelemiştir. Elektrokimyasal, mekanik ve termal enerji depolama sistemleri üzerinde çalışmıştır (Baker 2008).

Zafirakis ve ark. Yunanistan' daki Crete adasındaki rüzgar enerjisi depolama sistemini incelemiştir. İnceledikleri çift modlu SHED sisteminin optimum performansı vermesi için ekonomik değerlendirme modeli üzerine çalışmışlardır (Zafirakis ve ark. 2009)

Milazzo termal enerji depolamalı SHED sisteminin sıkıştırma fazının analizini ele almıştır. Termodinamiğin ikinci kanunundan hareketle ısıl iyileştirmeli bir kompresör sisteminin termodinamik analizini incelemiştir (Milazzo 2008).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Sıvı Pistonlu Kompresörün Çalışma Şekli

Sıvı pistonlu kompresör modelinde ana elemanlar şunlardır; Pompa, Hidrolik silindir, Hava sıkıştırma silindiri, Hava depolama tankı.

Pompa, hidrolik yağ tankından aldığı hidroliği basarak hidrolik silindire (Booster) gönderir. Burada pompa sabit veya değişken debili seçilebilir. Değişken debili pompa seçilmesi sistem için daha verimlidir çünkü bu pompaların özelliği üstüne takılan modüller ile yüke duyarlı hale getirilmeleri ve sistemin ihtiyacı olan debiyi anlayıp pompadan basılan akışkan miktarını arttırıp azaltabilmeleridir. Burada debisi istenilen büyüklüğe çekilen hidrolik yağ yön valflerinden geçer ve hidrolik silindire ulaşır.

Hidrolik silindir akışın yönüne göre sağa ve sola gidebilen bir yapıdadır. İçine konulan cetvel ile konumu kullanıcı tarafından takip edilebilmektedir. Hidrolik silindirin amacı hava sıkıştırma silindirlerindeki yağın yükselme oranını dengelemektir. Bunun için hidrolik üniteden gelen hidrolik yağ debisi düşürülerek hava sıkıştırma silindirlerine iletilir.

Hava sıkıştırma silindirlerine iletilen hidrolik yağ bir silindiri doldururken diğerinden boşalmakta ve hidrolik silindire dönmektedir. Böylece bir sağ silindir bir sol silindir hava sıkıştırma işlemi yapabilmektedir. Burada hava sıkıştırma silindirlerinin hava emmesi, sıkıştırılmış havanın hava tankına gönderilmesi gibi karmaşık bir süreç söz konusudur.

Hidrolik silindir orta konumdayken, hava sıkıştırma silindirleri eşit seviyede hidrolik yağ ile doludur. Hidrolik silindirin hidrolik üniteden gelen debi ile sağa veya sola hareketiyle, hava sıkıştırma silindirlerinin birisindeki hidrolik yağ seviyesi yükselirken, diğerininki de azalmaktadır. Yani hidrolik yağ seviyesi yükselen silindir hava sıkıştırma işlemine başlamış, diğeri ise dış ortamdan hava emmek için genişlemiştir. Sıkışan hava, hava tankındaki havanın basıncını yendiğinde aradaki bağlantı açılır. Böylece sıkışarak basıncı arttırılan hava, hava tankına gönderilir. İçinde bir miktar basınçlı hava kalan

silindir, hidrolik silindirin hareket yönünü değiştirmesinden dolayı hidrolik yağ seviyesini düşürür. İçindeki basınçlı havanın basıncı azalır ve hava emme ağzını açarak içeri hava emer. Bu arada diğer silindir sıkıştırma işlemeine başlamıştır. Aynı süreci bu sefer ikinci silindir gerçekleştirir.

Sıkıştırma işlemi esnasında basıncı artan havanın sıcaklığının yükselmemesi istenmektedir. Bu da sıkıştırma işlemi izotermal şartlarda yapmak demektir. Bunu sağlayabilmek için sıkışan havanın ısısı bir an önce uzaklaştırılmalıdır. Oluşan ısının bir kısmının hidrolik yağa aktarılması için hava ile hidrolik yağ arasına hiçbir şey konmamış, hava sıvı sıkıştırma ile sıkıştırılmıştır. Isının bir kısmı da metal silindir yüzeyinden dışarı atılmaktadır.

30-40 bar gibi bir sıkıştırmada izotermal şartlar söz konusu değildir. Bu yüzden sıkışmış hava sıcaklığı yükselmektedir. Böyle bir durumda sıkışmış havanın ısısını en iyi şekilde atabilmesi için belli bir süreye ihtiyacı vardır. Aynı zamanda sistemin belli bir hızda hareket etmesi gerekmektedir çünkü sistem ne kadar yavaş çalışırsa kullandığı enerji artmaktadır. Bu iki zıt durum optimum hızı belirleme gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

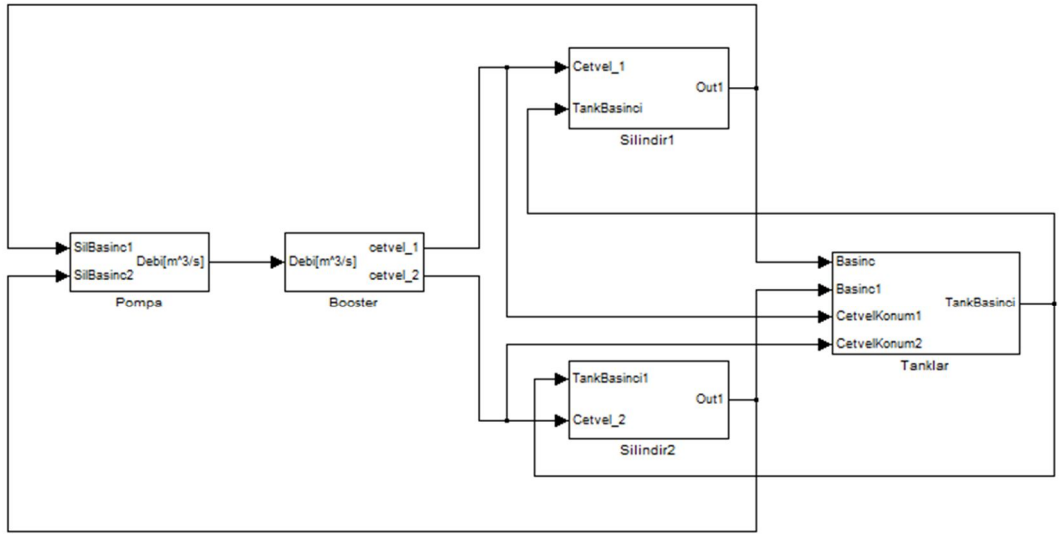
3.1.2. MATLAB Simulink

Simulink karmaşık sistemleri tasarlama ve simülasyon yapma olanağı vermektedir. Mühendislik sistemlerinde simülasyonun önemi gün geçtikçe artmaktadır. Sistemlerin tasarımında büyük oranda bilgisayar simülasyonlarından faydalanılmakta, mümkün olduğunda tasarımın test aşamaları da bilgisayarlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu da prototiplere olan ihtiyacı azaltarak maliyetlerin büyük oranda düşmesini sağlamaktadır. Günümüzde mühendislik alanında en çok kullanılan programlardan birisi MATLAB'dır. Simulink, MATLAB ile birlikte bütünleşik olarak çalışan bir simülasyon ortamıdır. Sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı sistemleri ,veya her ikisini de içeren hibrit sistemleri desteklemektedir. İçinde birçok alt sistemi blok olarak barındırdığından sürükle bırak yöntemiyle birçok sistemi bir kaç dakikada kurarak simüle edip, değişik durumlardaki cevabını test edilebilir. Bunun için Simulink zengin bir blok kütüphanesi sunmaktadır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Sıvı Pistonlu Kompresörün Simulink Modeli

Sıvı pistonlu kompresörün Simulink'te modelini oluşturmak için sistemin ana elemanlarının tek tek alt sistemleri oluşturulmuştur. Ana elemanlar; Pompa, Hidrolik silindir(Booster), Silindirler ve Tanklardır. Şekil 3.1 sistemin Simulink modelini en genel haliyle göstermektedir. Ana elemanlar tek tek incelenerek kurulan sistem, kullanılan formüller ve algoritma açıklanacaktır.

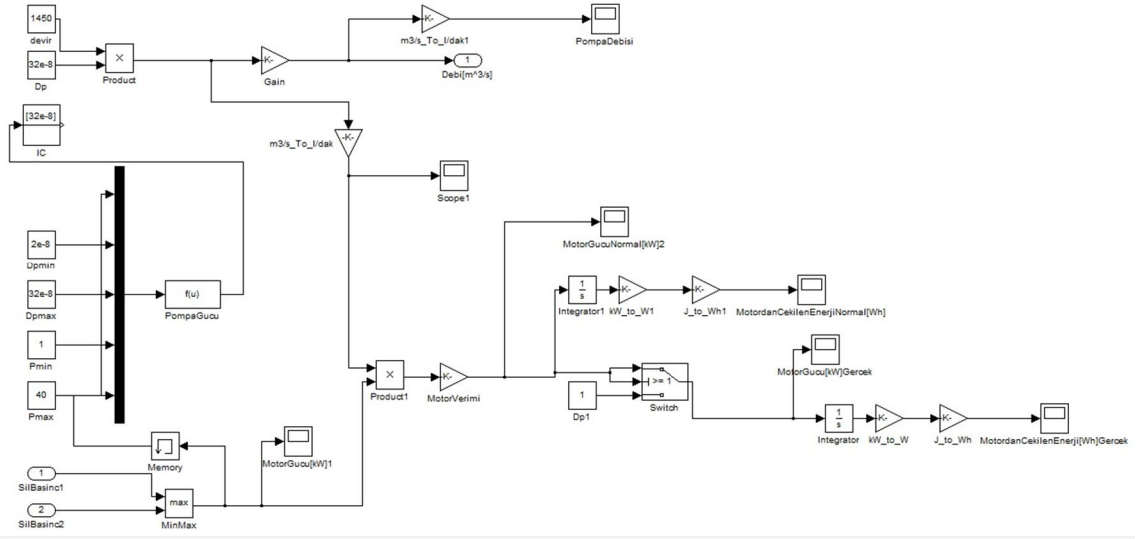


Şekil 3.1 Sıvı pistonlu kompresörün Simulink modeli

3.2.2. Pompanın Simulink Modeli

Sistemin hidrolik yağ kısmını basan eleman olarak bir pompa kurgulanmıştır. Pompanın bağlı olduğu elektrik motorunun devir sayısının sabit olduğu düşünülmüştür. Pompanın geometrik debisi oluşturulan senaryolara göre farklı şekillerde kurgulanmıştır. Bu senaryolarda farklı sabit geometrik debiler alınarak sabit deplasmanlı pompa modeline ve lineer bir denklem kurularak değişken deplasmanlı pompa modeline göre sistemin davranışı incelenmiştir. Pompanın bu senaryolara göre bastığı hacimsel hidrolik yağ debisi 1 numaralı denklem kullanılarak bulunmuştur. Sistemin hava sıkıştırmak için

kullanılan enerji ve güç hesabı da pompa alt bloğunda incelenmiştir. Bunun için 2 ve 3 nolu denklemler kullanılmıştır. Şekil 3.2 modellenen pompayı göstermektedir.



Şekil 3.2. Sıvı pistonlu kompresörün pompa alt sisteminin Simulink modeli

Hacimsel debi;

$$Q = \frac{nD_p\mu}{60} \quad (1)$$

Bu eşitlikte Q m³/s cinsinden hacimsel debiyi, n, elektrik motoru devir sayısını, D_p pompanın geometrik debisini, μ pompanın volümetrik verimini ifade etmektedir. Elektrik motoru devir sayısı 1450 devir/dakika, volümetrik verim 0,95 kabul edilmiştir.

Güç hesabı;

$$P = \frac{\Delta P Q}{600\eta} \quad (2)$$

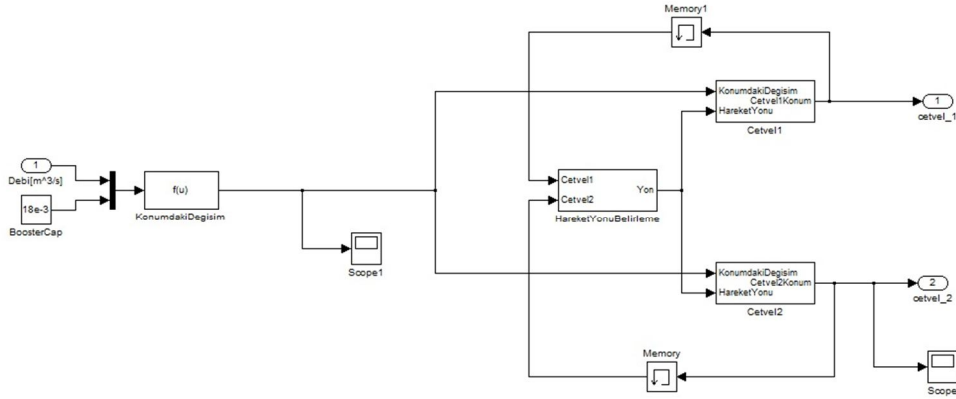
Bu denklemden P kiloWatt (kW) cinsinden gücü, ΔP bar cinsinden basınç farkını, η elektrik motoru verimini ifade etmektedir. Motor verimi 0,85 kabul edilmiştir.

Kullanılan enerji hesabı;

$$E = \int P \Delta t \quad (3)$$

3.2.3 Hidrolik Silindirin (Booster) Simulink Modeli

Farklı geometrik debi senaryolarıyla çalıştırılan pompadan hidrolik silindire farklı hacimsel debilerde basma gerçekleştirilir. Bu belirlenen debi ile gelen hidrolik yağ kurulan mantıksal operatörlerle hidrolik silindir içindeki pistonu önce 1 yönünde harekete geçirir. Hidrolik silindir içinde piston ilerlemesi yönünde pistonun konumunu izleyen bir cetvel olduğu kurgulanmıştır. Belirlenen mesafeye kadar gelen piston yönünü değiştirir ve ters istikamette hareket eder. Bu da yön 2 olarak kabul edilmiştir. Öngörülen geometrik debiye göre hidrolik silindire ulaşan hacimsel debi pistonun hareket hızını belirler. Pistonun konumundaki değişim oluşturulan cetvel modeliyle takip edilir. Böylece pistonun nerede olduğu ve hangi yöne doğru hareket ettiği belirlenir. 4 numaralı denklem konumdaki değişimi ifade etmektedir.



Şekil 3.3. Sıvı pistonlu kompresörde hidrolik silindir Simulink modeli

Konumdaki Değişim;

$$x = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Bu eşitlikte x, hidrolik silindir içindeki pistonun ilerlediği mesafeyi, A, hidrolik silindir içinin alanını ifade etmektedir. Hidrolik silindir içindeki cetvel ile içerideki pistonun

konumu ve gittiği yön belirlenmektedir. Piston cetvele göre 0,06 ile 0,528 metre arasında 0,468 metrelik mesafede hareket etmektedir.

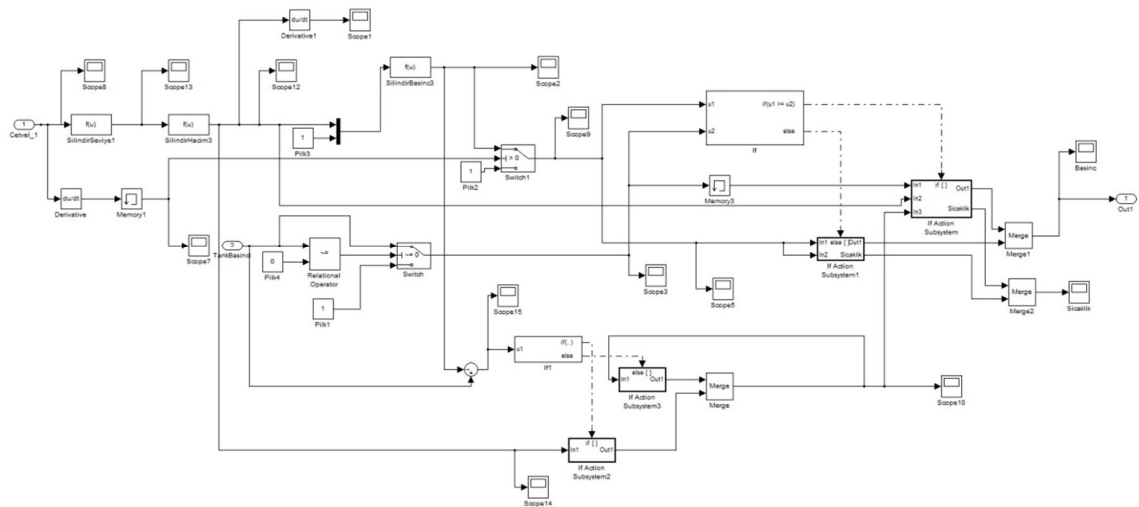
Hidrolik Silindir İç Alanı;

$$A = \frac{\pi D_b^2}{4} \quad (5)$$

Hidrolik silindirin alanını bulmak için kullanılan alan formülünde D_b , hidrolik silindirin iç çapını ifade etmektedir ve 0.18 metre alınmıştır.

3.2.4 Silindirlerin Simulink Modeli

Hidrolik silindir içindeki pistonun hareket hızı ve yönüne bağlı olarak iki silindir sırayla hava sıkıştırma işlemi yapar. Piston 1 yönüne gittiğinde Silindir 1 hidrolik yağ ile dolar ve içindeki havayı sıkıştırır. Bu sırada Silindir 2' deki yağ boşalarak hidrolik silindire geri döner ve hava emer. Piston 2 yönüne gittiğinde bu olayın tersi olur. Böylece sürekli sıkıştırma işlemi tekrar eder. Bu işlemi modellemek için piston hareketiyle silindirde yükselen ve diğer silindirde alçalan hidrolik yağ seviyesini tespit etmek gerekir. Bunun için 6 numaralı denklem kullanılmıştır. Havanın sıkıştırılmasını modellemek için hidrolik yağın ve havanın silindirde kapladığı hacmin takip edilmesi gerekir. Bunun için 7, 8 ve 9 numaralı denklemler oluşturulan modelde kullanılmıştır. Hidrolik yağın hava içinde yükselmesiyle sıkışan havanın basınç değişimi de 10 numaralı denklemin modellenmesiyle sağlanmıştır. Sıkışan havanın silindir içindeki sıcaklığı artmaktadır. Bu artışı 11 numaralı denklem ifade etmektedir



Şekil 3.4. Sıvı pistonlu kompresörde silindirlerin Simulink modeli

Sıkıştırma Silindiri Seviyesi;

$$L_{seviye} = (L_c - 0,06) \frac{D_b^2}{D_{sil}^2} \quad (6)$$

Bu eşitlikte L_{seviye} , sıkıştırma silindirinde hidrolik yağın silindir boyuna göre hangi konumda olduğunu gösterir. Bunun için hidrolik silindir içindeki cetvel konumundan pistonun konumu belirlenir. Hidrolik silindir ve sıkıştırma silindirinin alan oranlarından sıkıştırma silindirindeki yükseklik bulunur.

Sıkıştırma Silindiri Alanı ve Hacmi;

$$A_{sil} = \frac{\pi D_{sil}^2}{4} \quad (7)$$

$$V_{sil} = A_{sil} L_{sil} \quad (8)$$

Sıkıştırma silindirinin alanı ve toplam hacminin verildiği bu iki denklemde D_{sil} sıkıştırma silindirinin çapını ifade etmektedir ve 0,2 metredir. A_{sil} sıkıştırma silindirinin alanını ifade etmektedir. L_{sil} ise sıkıştırma silindirlerinin toplam boyunu vermektedir ve bu boy 1,3 metredir.

Sıkıştırma Silindirindeki Hava Hacmi;

$$V_h = (L_{sil} - L_{seviye}) A_{sil} \quad (9)$$

Bu eşitlikte V_h sıkıştırma silindirlerindeki havanın hacminin hidrolik yağa göre değişimini vermektedir

Sıkıştırma Silindirindeki Havanın Basıncı;

$$P_{sil,2} = P_{sil,1} \left(\frac{V_{sil}}{V_{hava}} \right)^n \quad (10)$$

Sıkıştırma silindirinde havanın sıkışma işlemi 10 numaralı denklem ile modellenmiştir. Bu denklem havanın basınçlanmasını politropik olarak ifade etmektedir. $P_{sil,1}$ havanın ilk durum basıncını, $P_{sil,2}$ ikinci durum basıncını ifade etmektedir. Sıkıştırma başlangıcında $P_{sil,1}$ 1 bar kabul edilmiştir. Denklemdeki n ifadesi 1,4 kabul edildiğinde izentropik hal denklemi, 1 kabul edildiğinde izotermal hal denklemi ifadeleri olur.

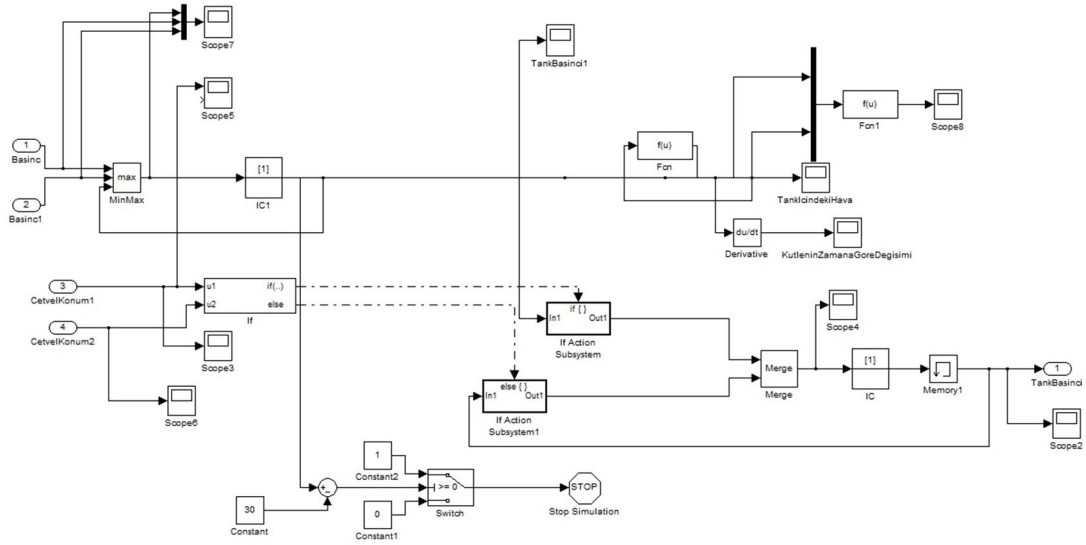
Sıkıştırma Silindirindeki Havanın Sıcaklığı;

$$T_{sil,2} = T_{sil,1} \left(\frac{V_{sil}}{V_{hava}} \right)^{(n-1)/n} \quad (11)$$

Bu denklem silindirler içindeki havanın sıcaklık değişimini veren ifadedir. $T_{sil,2}$ ve $T_{sil,1}$ silindirdeki havanın sıcaklığını Kelvin cinsinden ifade etmektedir.

3.2.5. Tankın Simulink Modeli

Havanın basınçlandırılıp depolandığı sistemin son ana elemanı tanktır. Burada silindirlere sıkıştırılıp gönderilen hava miktarı, basınçtaki artış grafiği gösterilmiştir. Basıncın istenen değeri aşmaması sağlanmıştır. Sistemin doğru çalışması için geri bildirimler oluşturularak diğer ana elemanlarla ilişkilendirilmiştir. Denklem 12 tankta depolanan havanın kütesinin belirlenmesinde esas alınmıştır.



Şekil 3.5. Sıvı pistonlu kompresörde tankın Simulink modeli

Tankta Depolanan Kütle Hesabı;

$$P_{\text{tank}} V_{\text{tank}} = m_{\text{tank}} RT \quad (12)$$

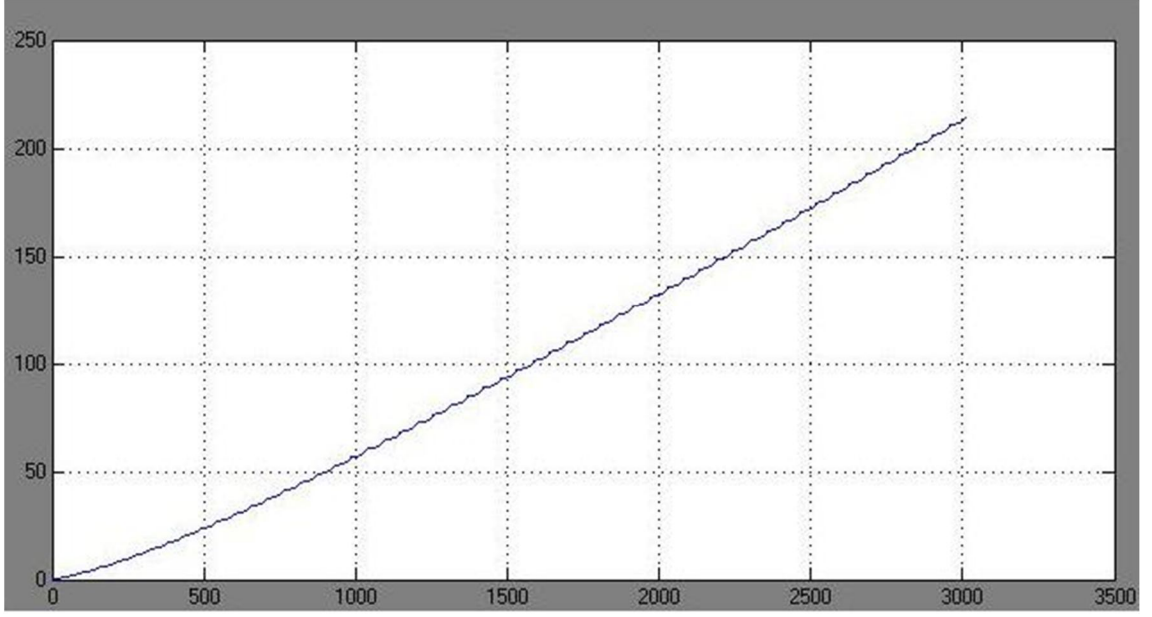
Bu denklemde P_{tank} tanktaki havanın basıncını, V_{tank} tankın hacmini ifade etmektedir. Tankın hacmi 60 litre kabul edilmiştir. m_{tank} tanktaki hava kütesini kilogram cinsinden vermektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

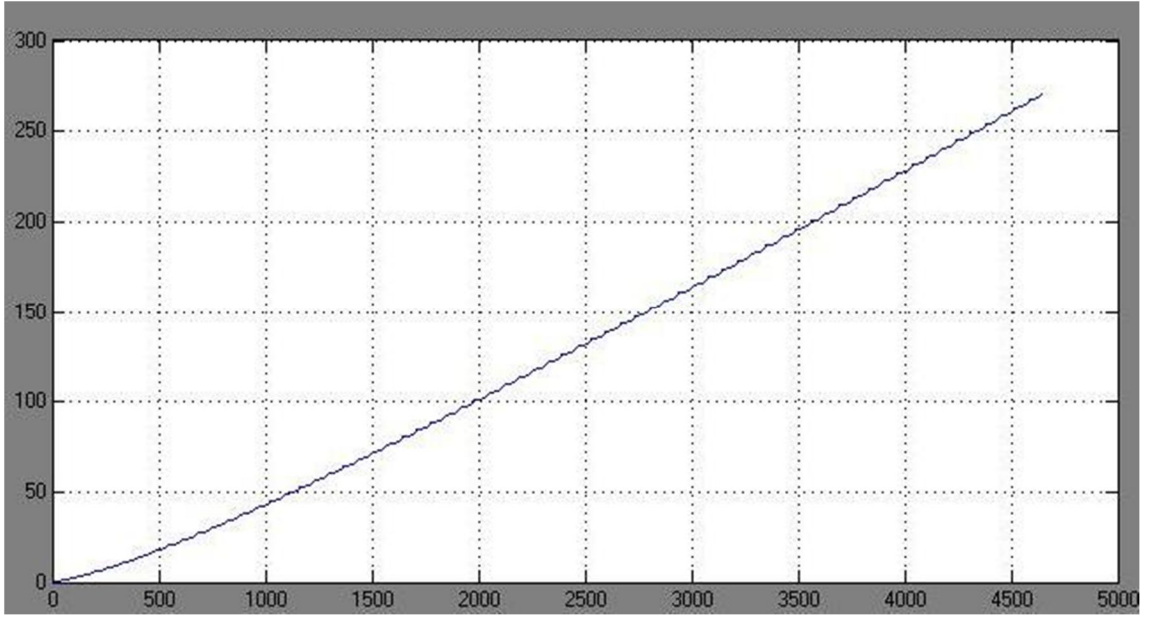
Oluşturulan Simulink modelinde pompa geometrik debisi sırasıyla 6, 12, 18, 24, 30, cm^3/devir sabit değer alınmıştır. Bununla birlikte $32 \text{ cm}^3/\text{devir}$ geometrik debi ile başlayan ve basınç arttıkça geometrik debisi $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ e kadar düşen bir algoritma oluşturulmuştur. Böylece basınç arttıkça lineer şekilde azalan bir değişken debili pompa kurgulanmıştır. Politropik sıkıştırma katsayısı (n) 1.01, 1.1, 1.2 alınarak sistem analizi yapılmıştır. Sistem içinde elektrik motorunun sıkıştırma işlemi gerçekleşmez iken bile 1 kW'lık güç çektiği kabul edilmiştir. Buna göre 30 bar hava depolamak için elektrik motorunun çıktığı güç iki farklı şekilde hesaplanmıştır. Böylece sistemin kendi başına tükettiği enerji elektrik motorundan bağımsız bir şekilde görülebilmektedir. Bütün şekillerde yatay eksen saniye cinsinden zamanı vermektedir.

4.1.Politropik Sıkıştırma Katsayısı n= 1.01 Alındığında Elde Edilen Bulgular

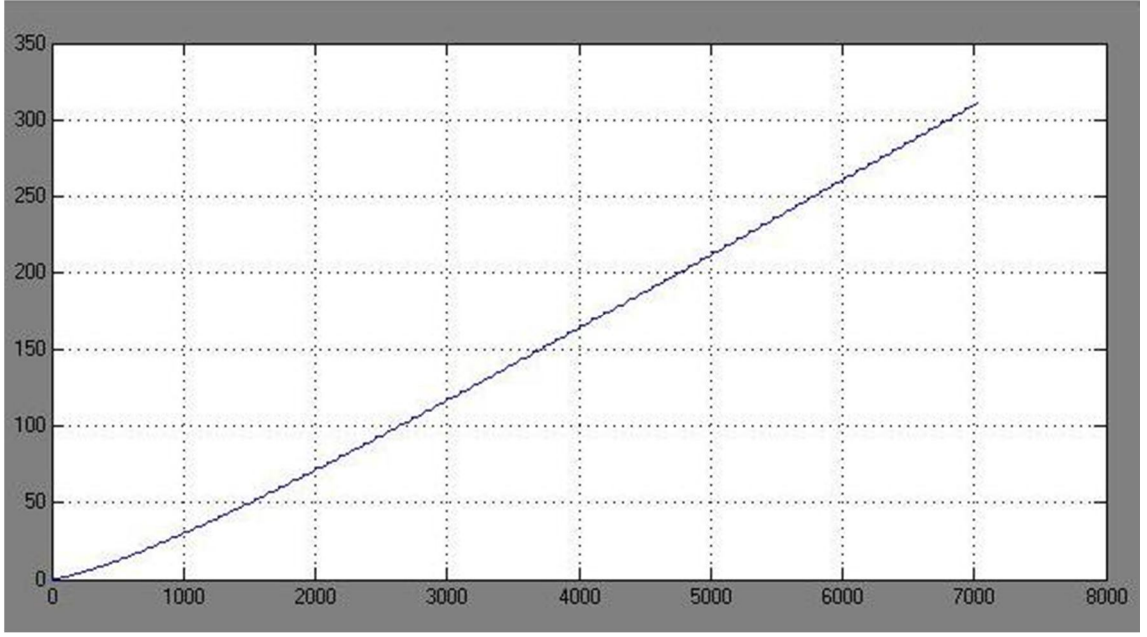
Şekil 4.1' den Şekil 4.6' ya kadar sistemin elektrik motorundan bağımsız kendi başına tükettiği enerji gösterilmiştir. Dikey eksenler enerji birimini Wattsaat (Wh) cinsinden göstermektedir. Geometrik debi düşürüldükçe sistemin 30 bar basınçta hava depolaması için geçen süre artmaktadır. Geçen sürenin artması da tüketilen enerjinin artmasına neden olmaktadır. $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışan pompada sistemin işlemi tamamlaması 3000 saniye civarında sürmekteyken, pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin işlemi tamamlaması 25000 saniye civarında sürmektedir. Bu süre farkından 220 Wh tüketilen enerji 370 Wh'a kadar çıkmaktadır. Şekil 4.6' da görüleceği üzere değişken geometrik debili pompa kullanarak hem işlem süresi azaltılmakta hem de tüketilen enerji miktarı azaltılmaktadır.



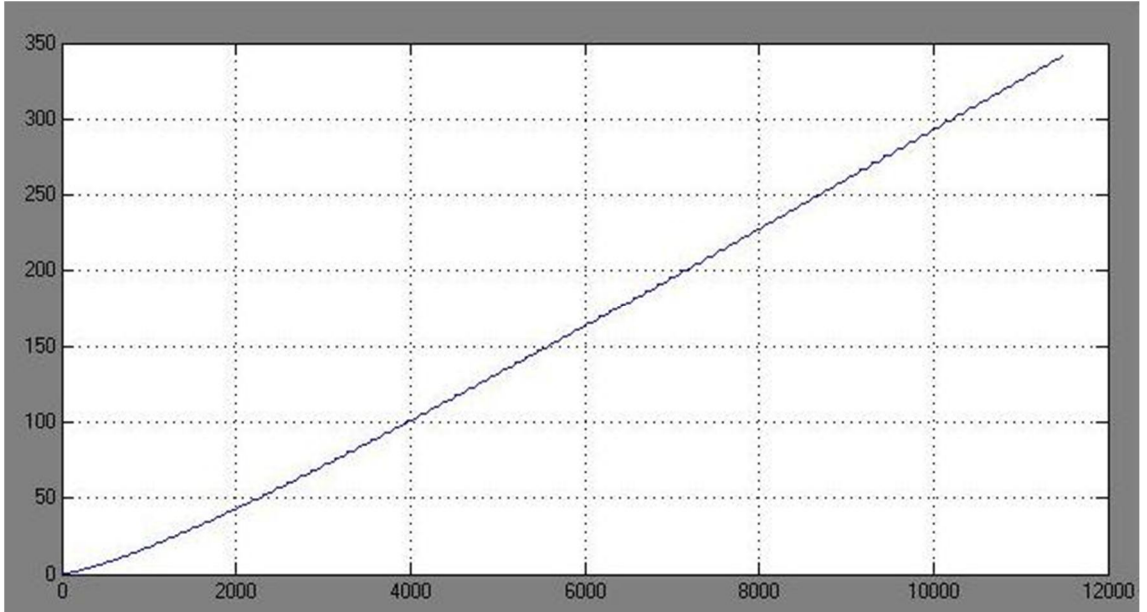
Şekil 4.1. $n=1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



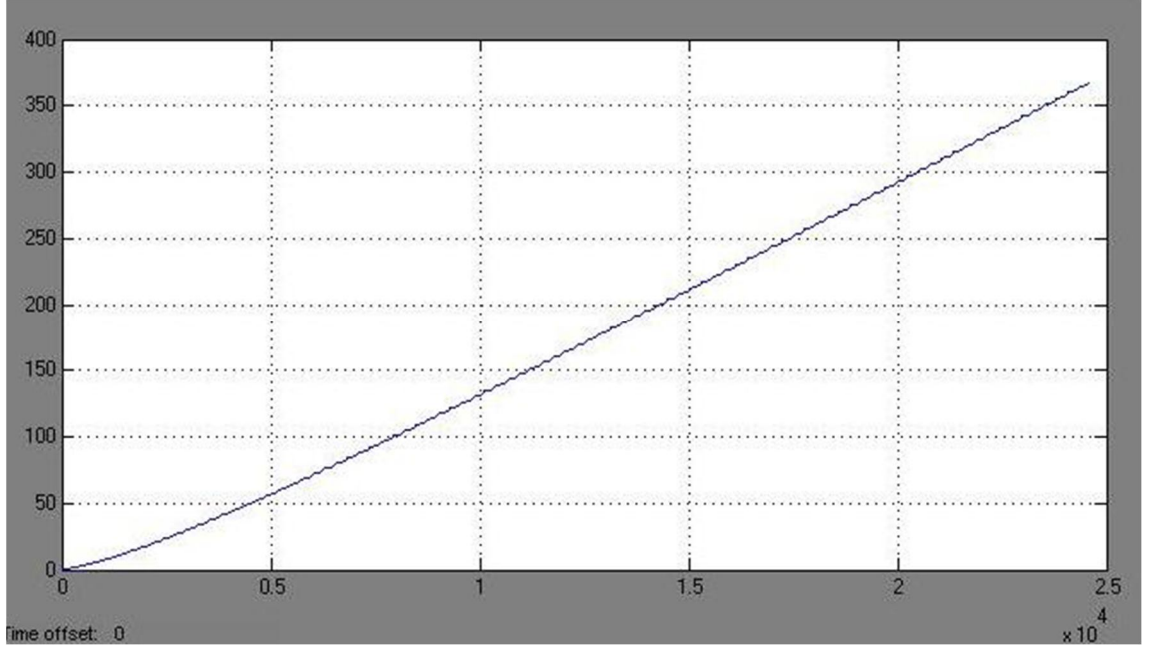
Şekil 4.2. $n=1.01$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



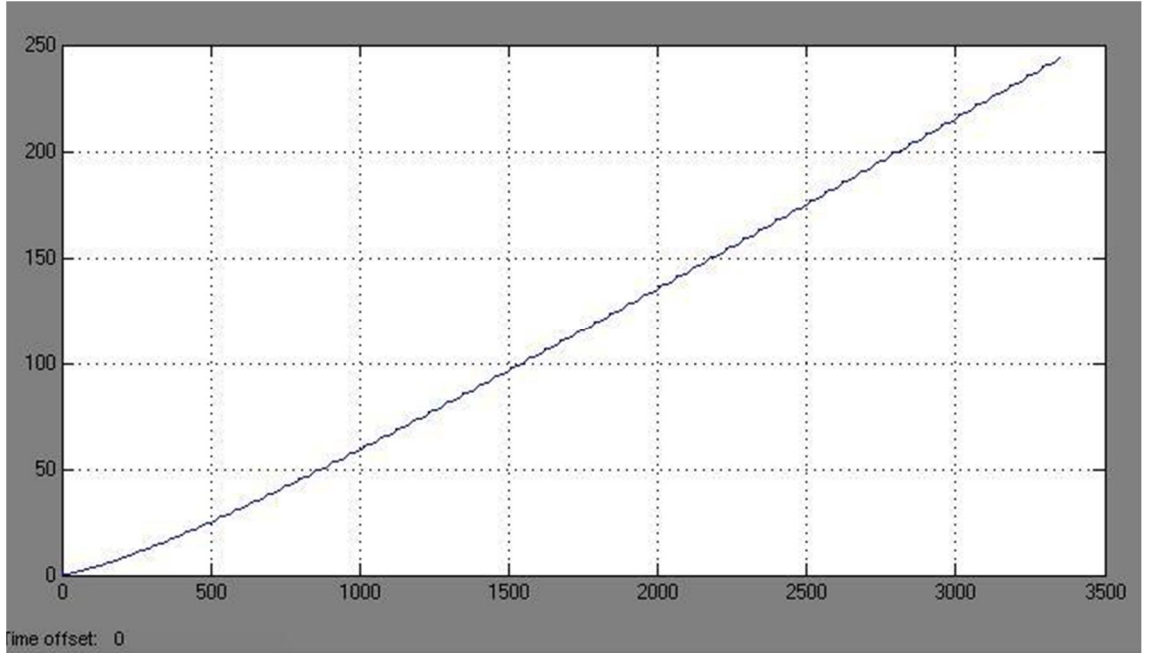
Şekil 4.3. $n=1.01$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



Şekil 4.4. $n=1.01$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

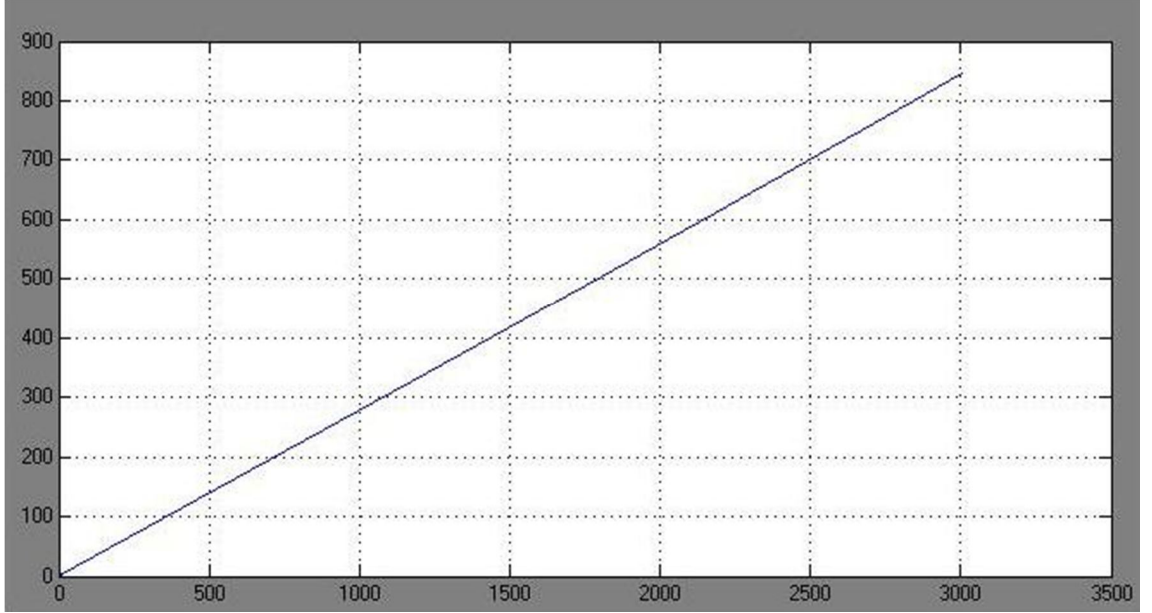


Şekil 4.5. $n=1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

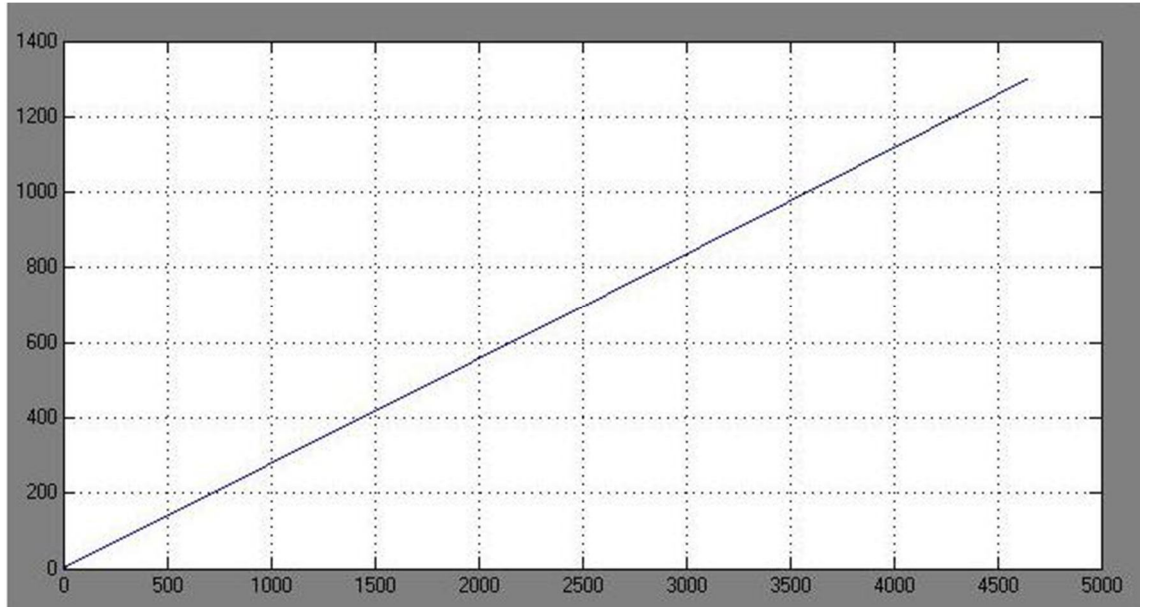


Şekil 4.6. $n=1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

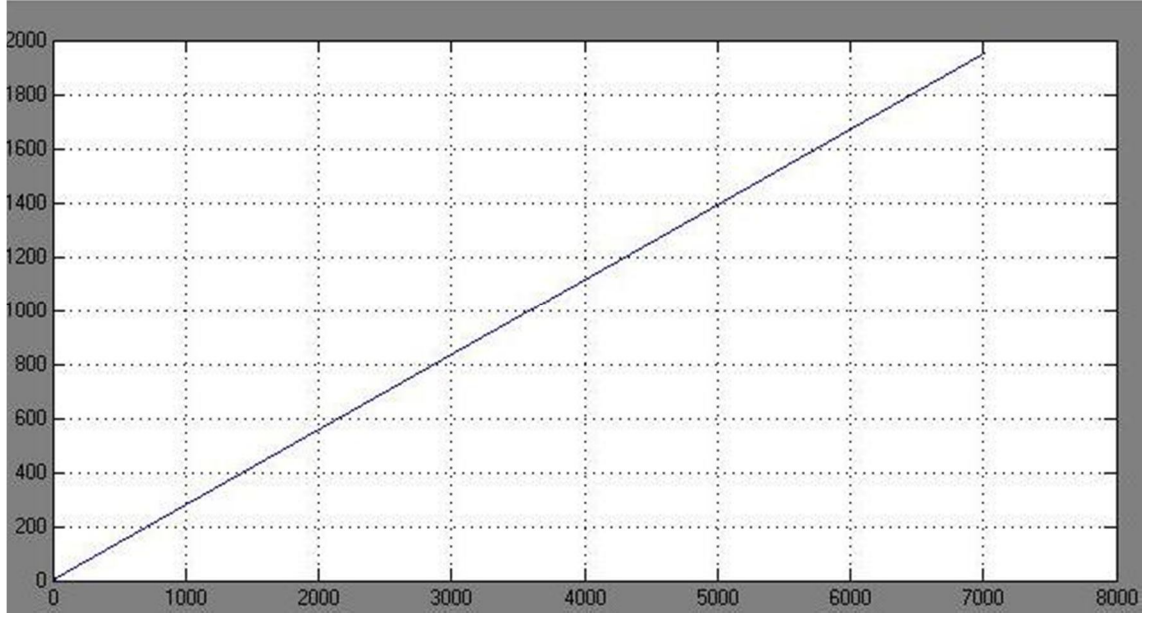
Şekil 4.7' den Şekil 4.12' ye kadar sistemin toplam tükettiği enerji gösterilmiştir. Geometrik debi düşürüldükçe sistemin 30 bar basınçta hava depolaması için geçen süre artmaktadır. Geçen sürenin artması da tüketilen enerjinin artmasına neden olmaktadır.



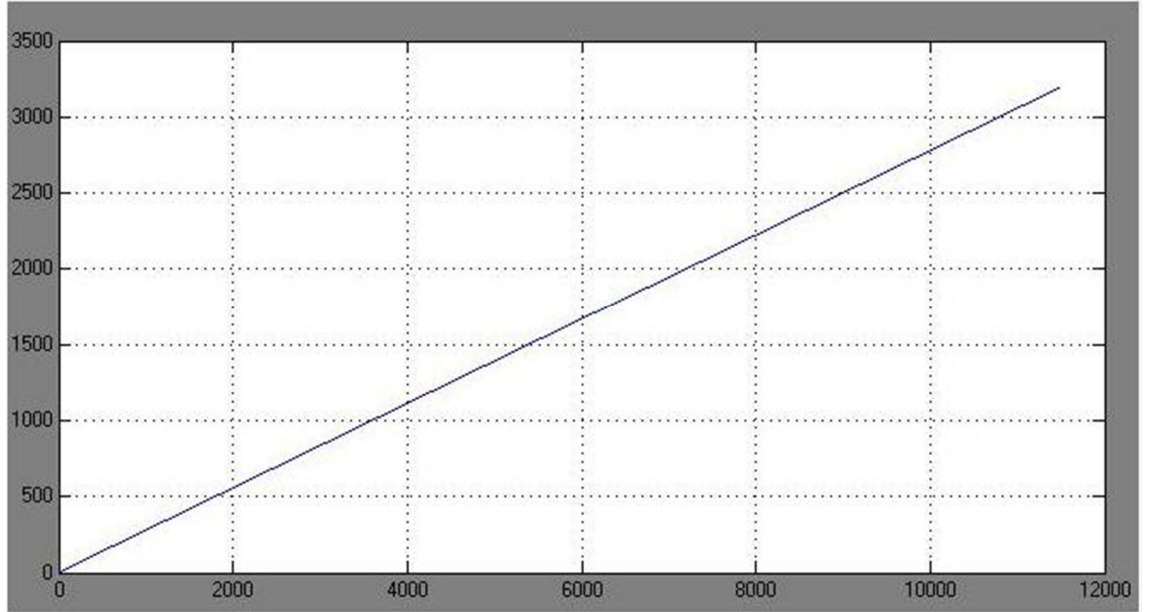
Şekil 4.7. $n=1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



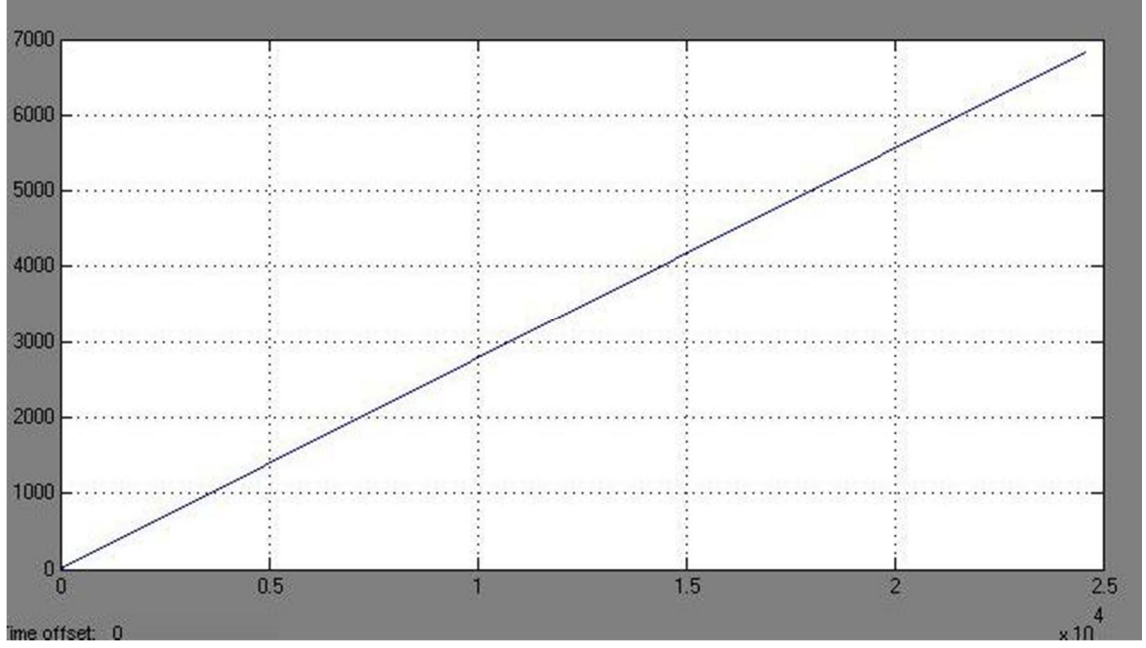
Şekil 4.8. $n=1.01$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



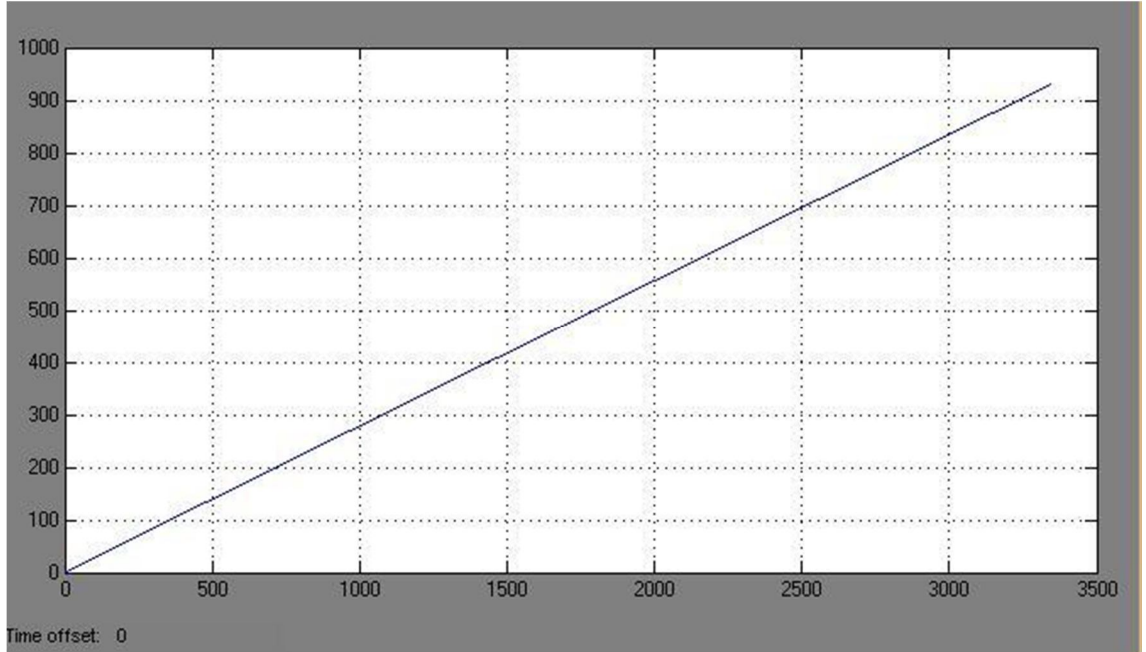
Şekil 4.9. $n=1.01$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



Şekil 4.10. $n=1.01$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



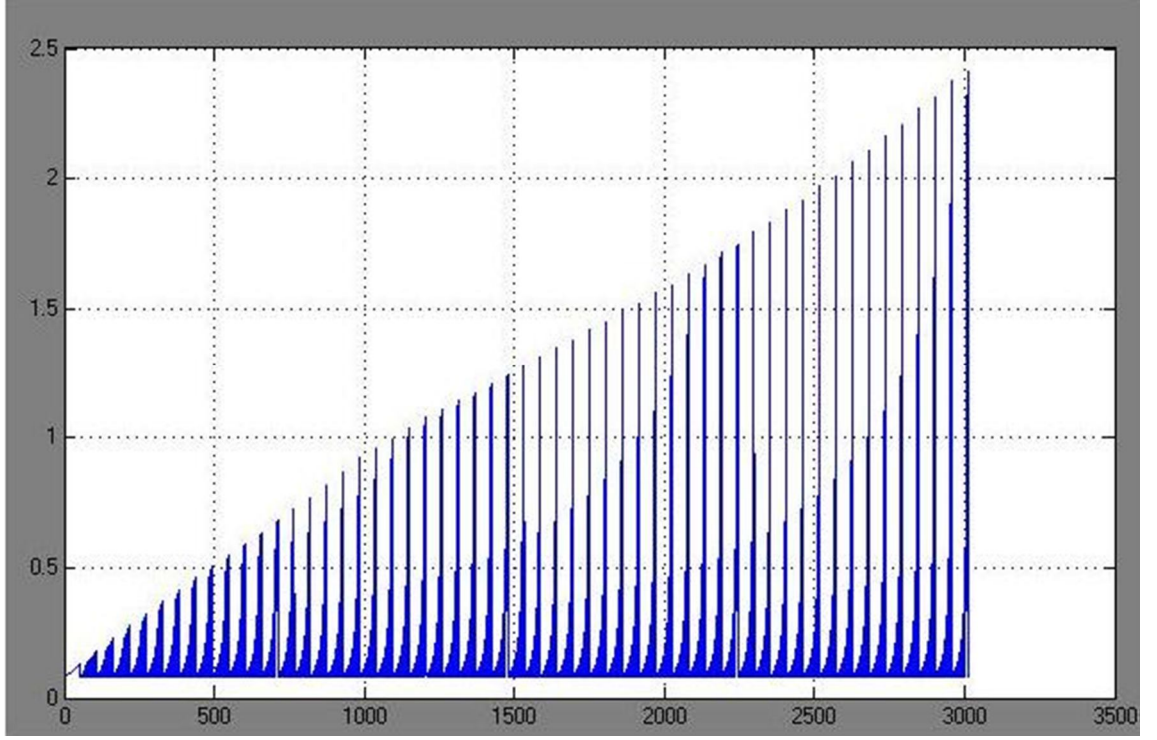
Şekil 4.11. $n=1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



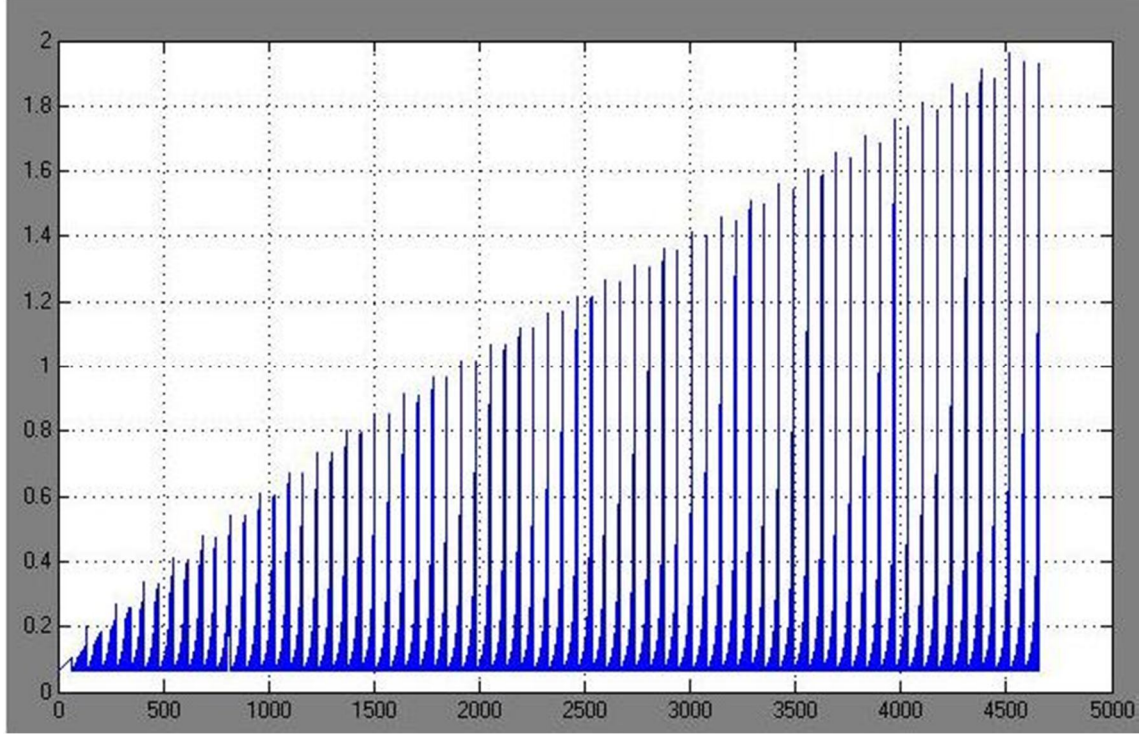
Şekil 4.12. $n=1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji

Elektrik motorunun çıktığı güç farklı geometrik debiler için Şekil 4.13' den Şekil 4.18'e kadar gösterilmiştir. Dikey eksen gücü kiloWatt (kW) cinsinden vermektedir. Büyük

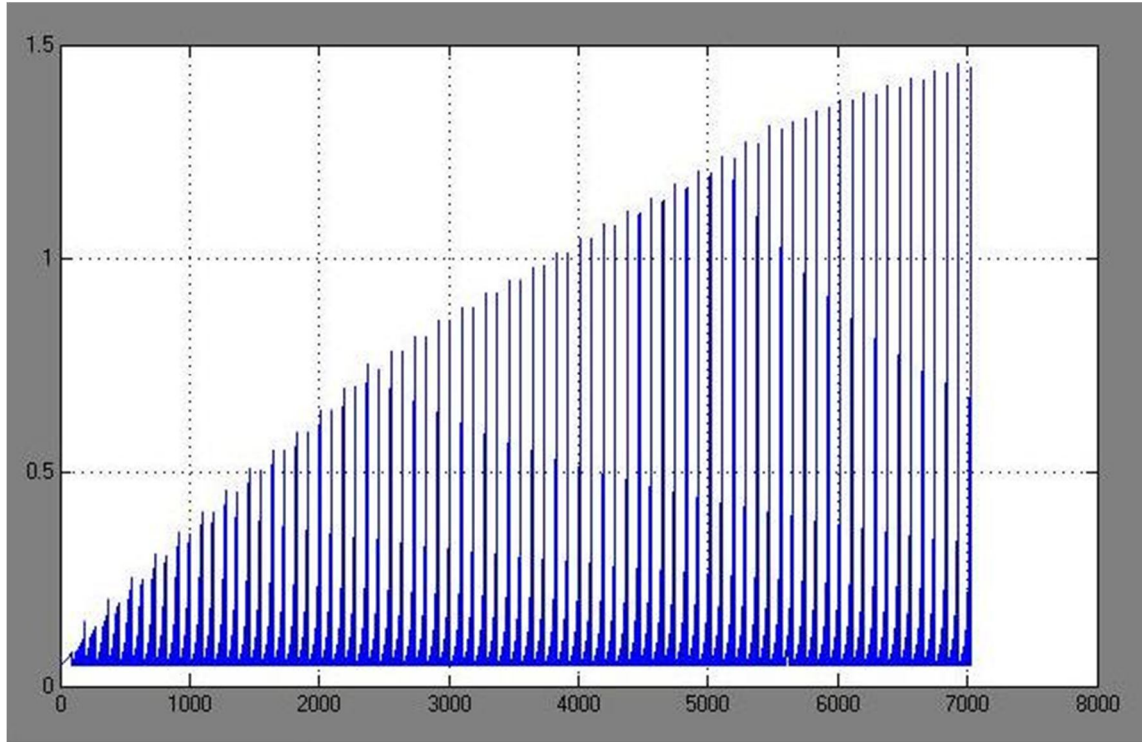
geometrik debilerde 2,5 kW' a kadar çıkan güç, küçük geometrik debilerde 1 kW'ı geçmemektedir.



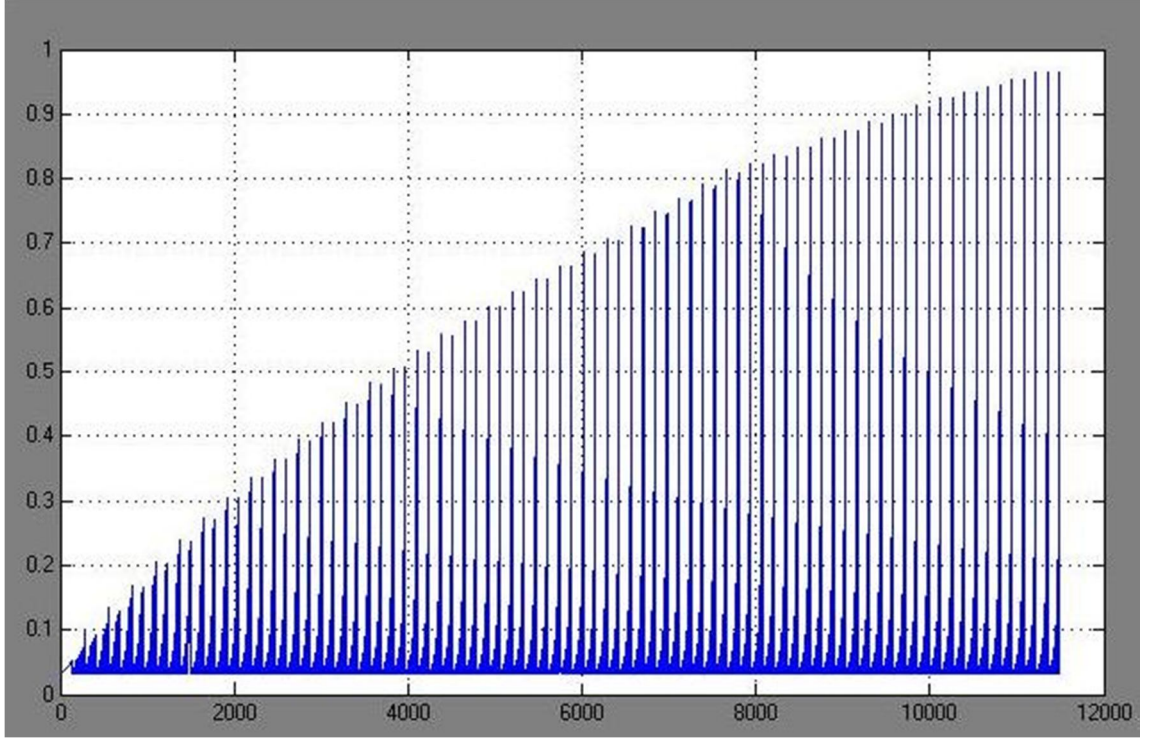
Şekil 4.13. $n=1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



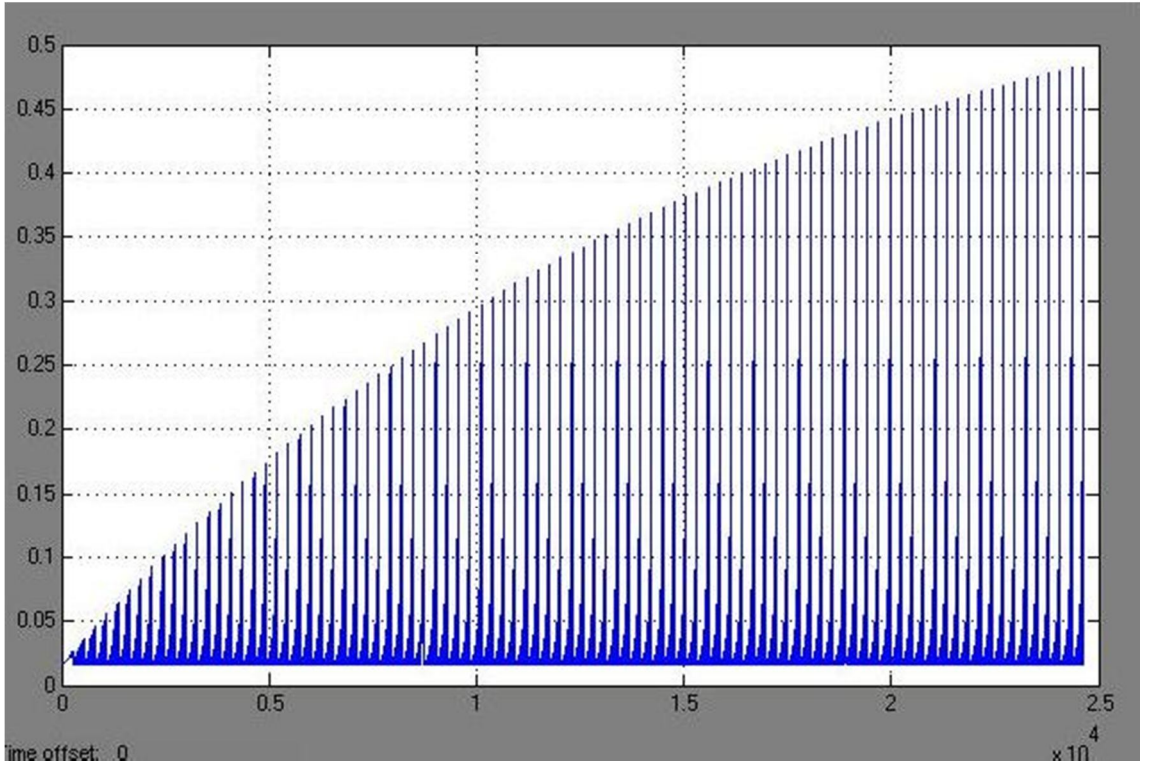
Şekil 4.14. $n=1.01$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



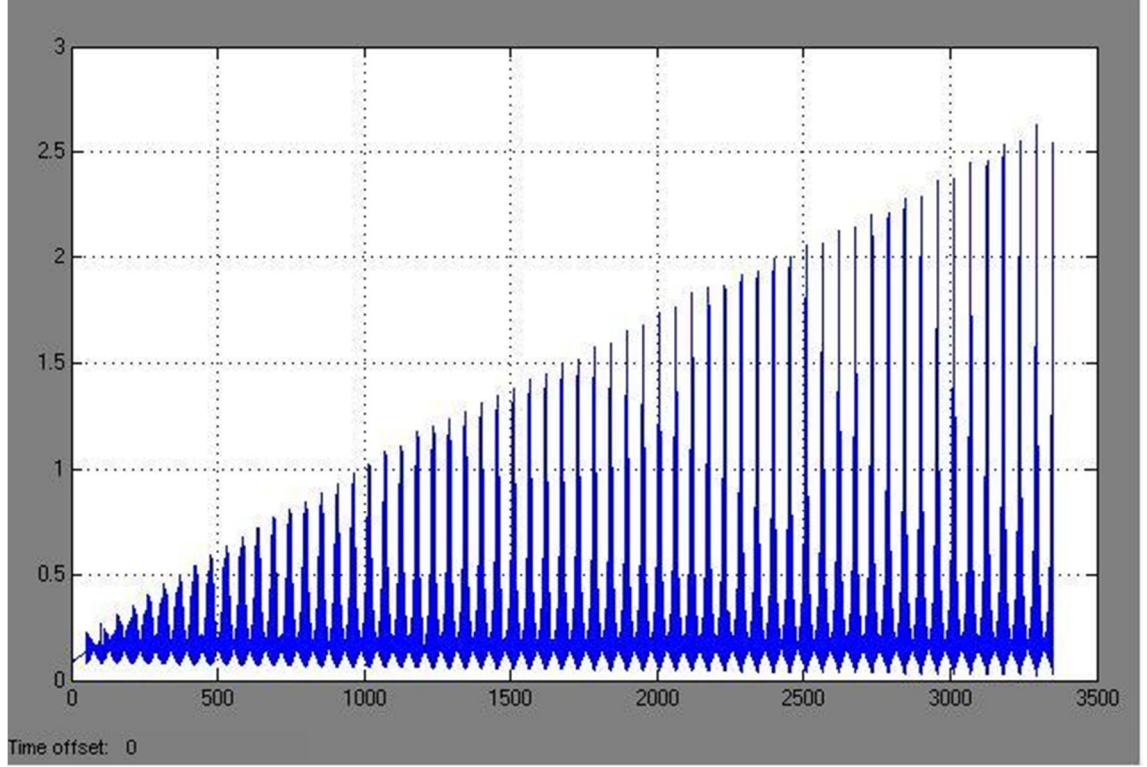
Şekil 4.15. $n=1.01$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



Şekil 4.16. $n=1.01$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

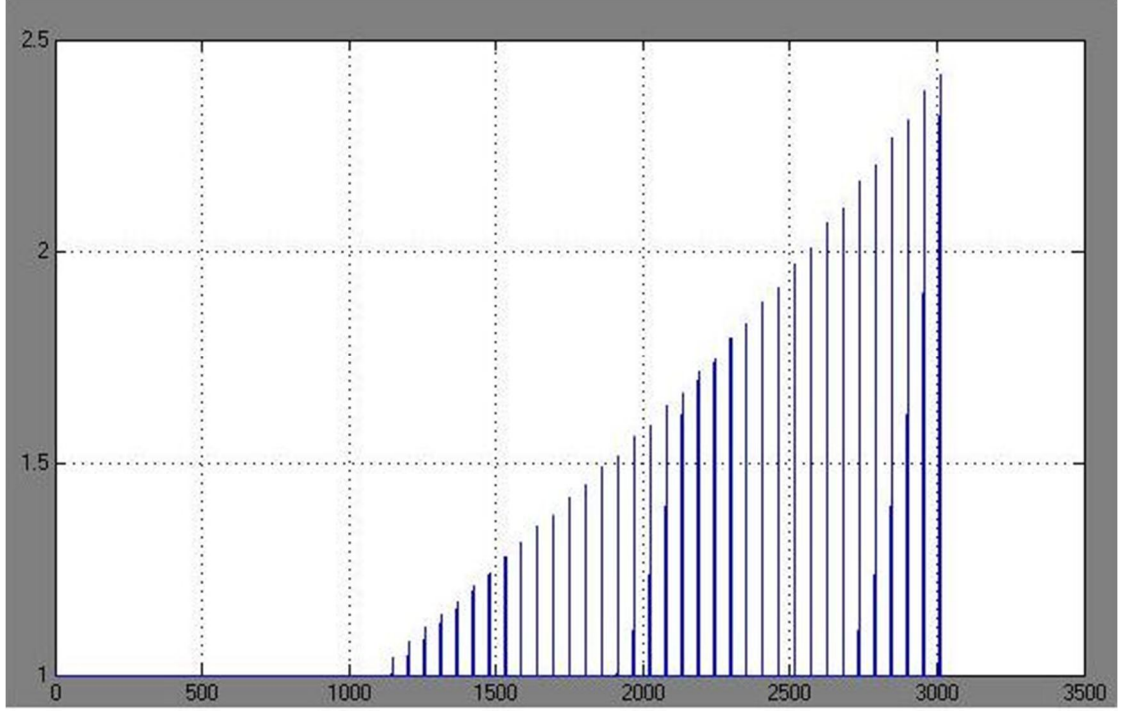


Şekil 4.17. $n=1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

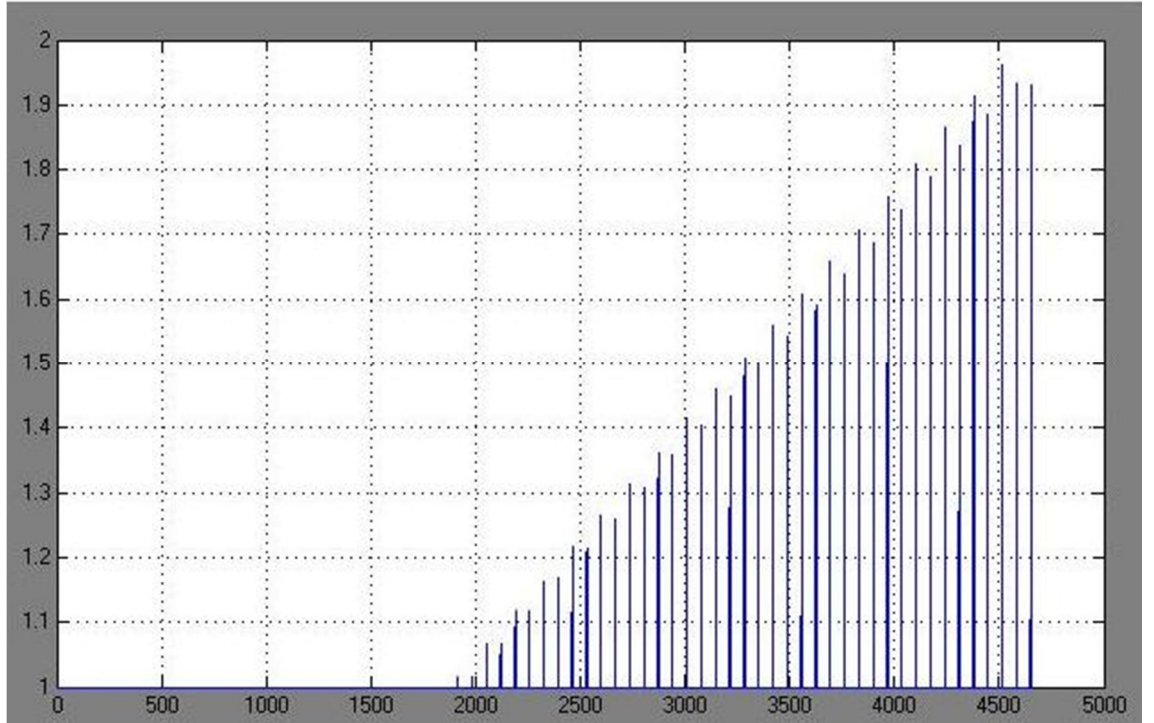


Şekil 4.18. $n=1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

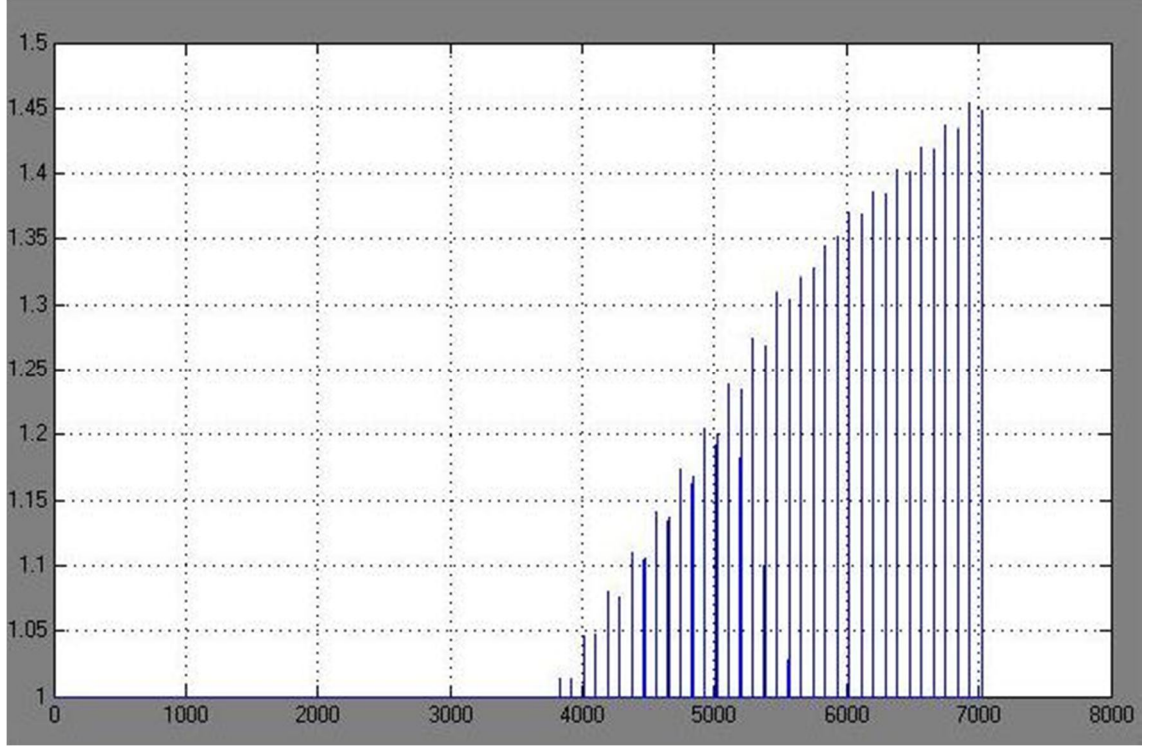
Elektrik motorunun boşa dahi 1 kW güç çektiği kabulüne göre 1 kW gücün üstünü sistemin işlemini sürdürmek için çekmektedir. Küçük geometrik debilerde (12 ve 6 cm^3/devir gibi) elektrik motoru boşa çalıştığından daha az güce ihtiyaç duymaktadır. Şekil 4.19' dan Şekil 4.24' e kadar bu durum gösterilmiştir.



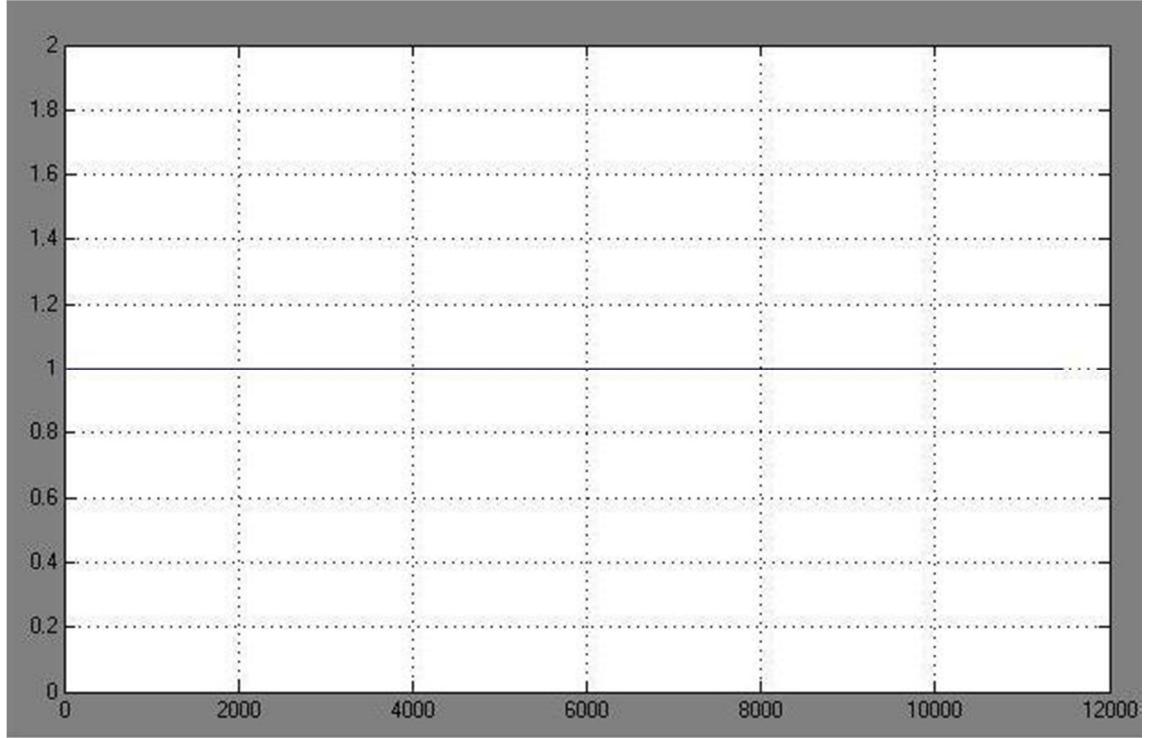
Şekil 4.19. $n=1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



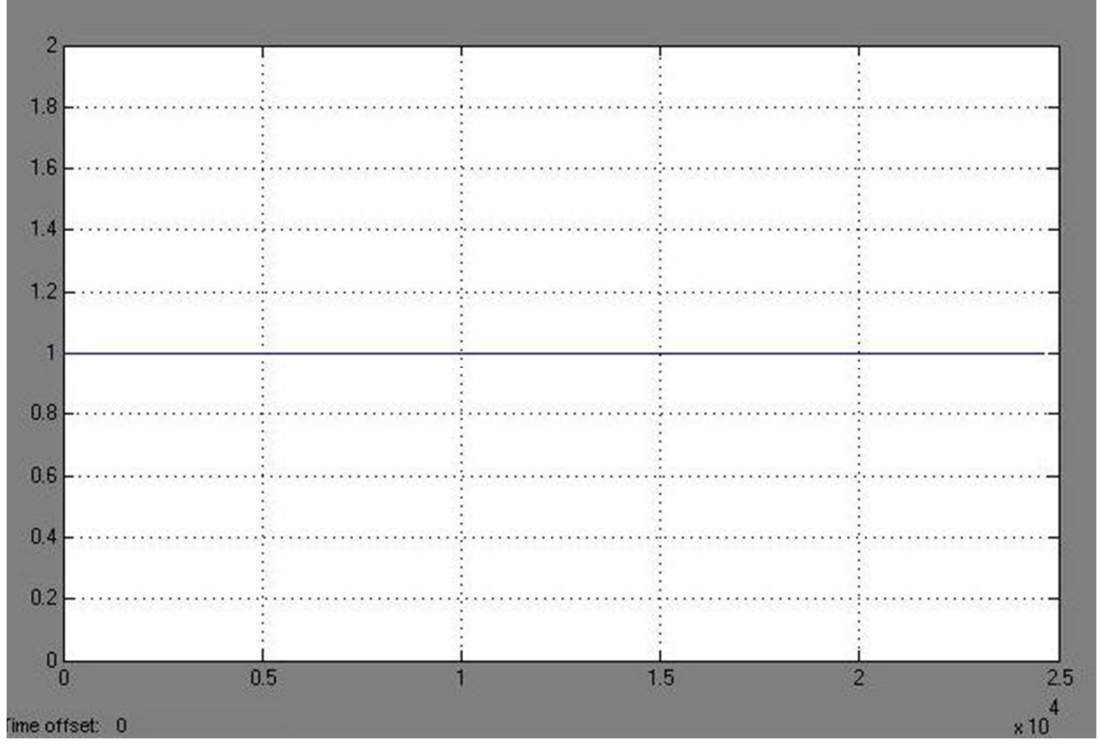
Şekil 4.20. $n=1.01$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



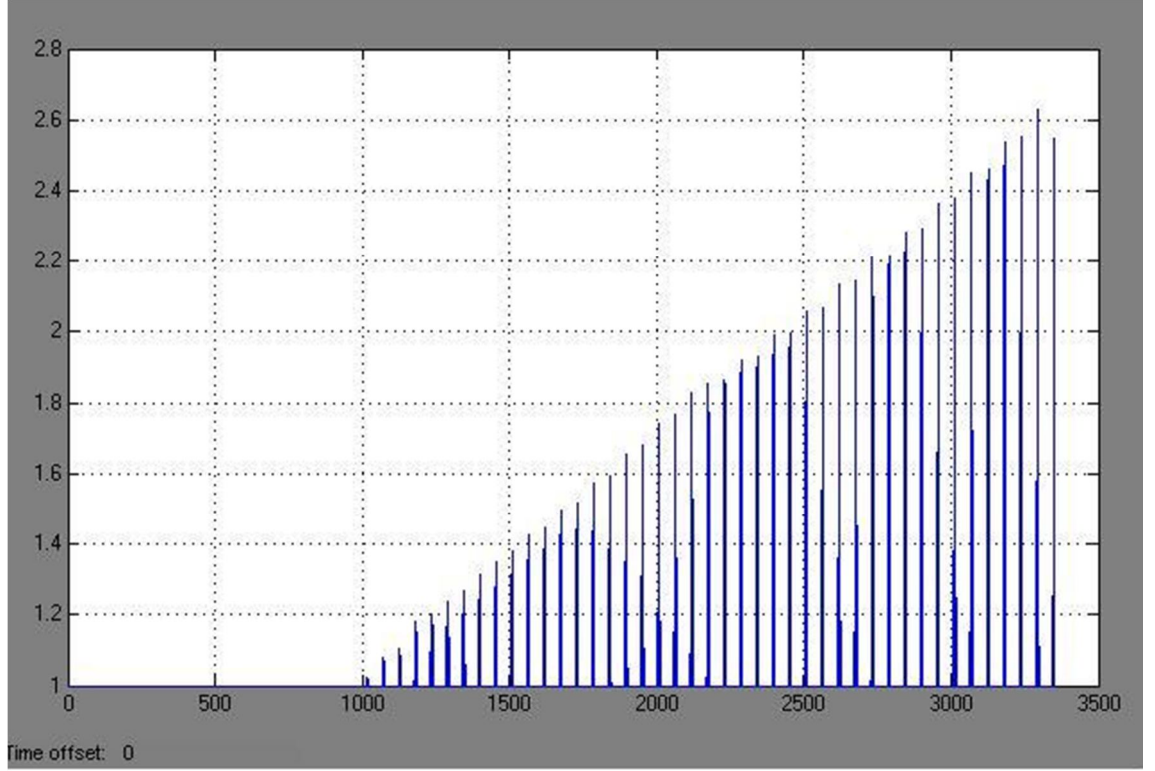
Şekil 4.21. $n=1.01$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



Şekil 4.22. $n=1.01$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

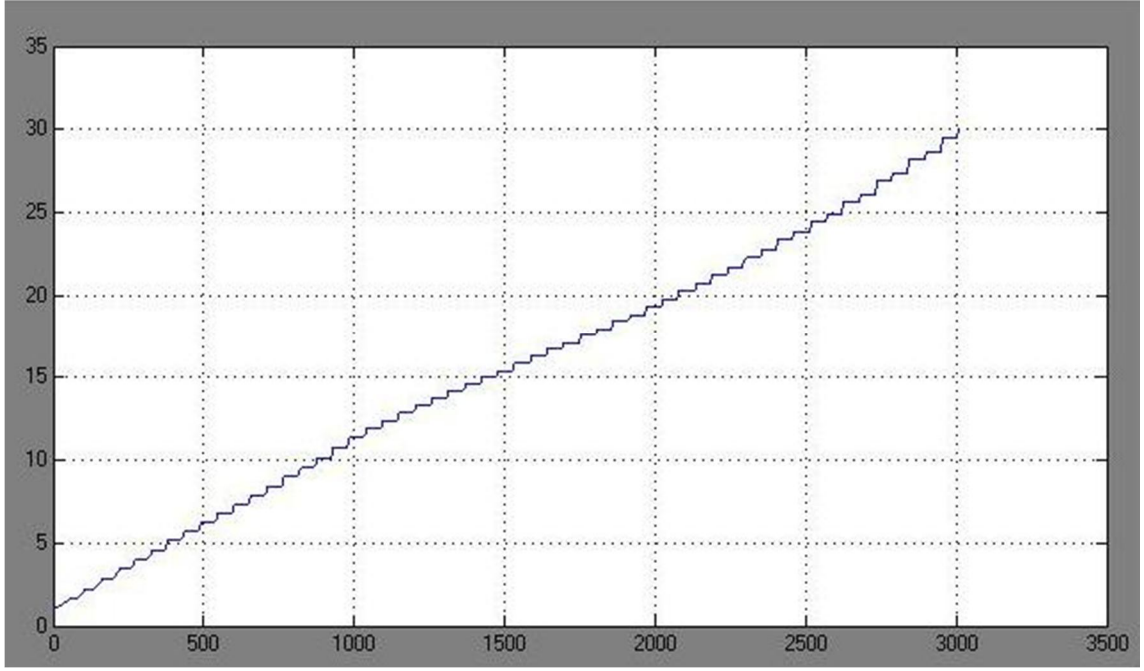


Şekil 4.23. $n=1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

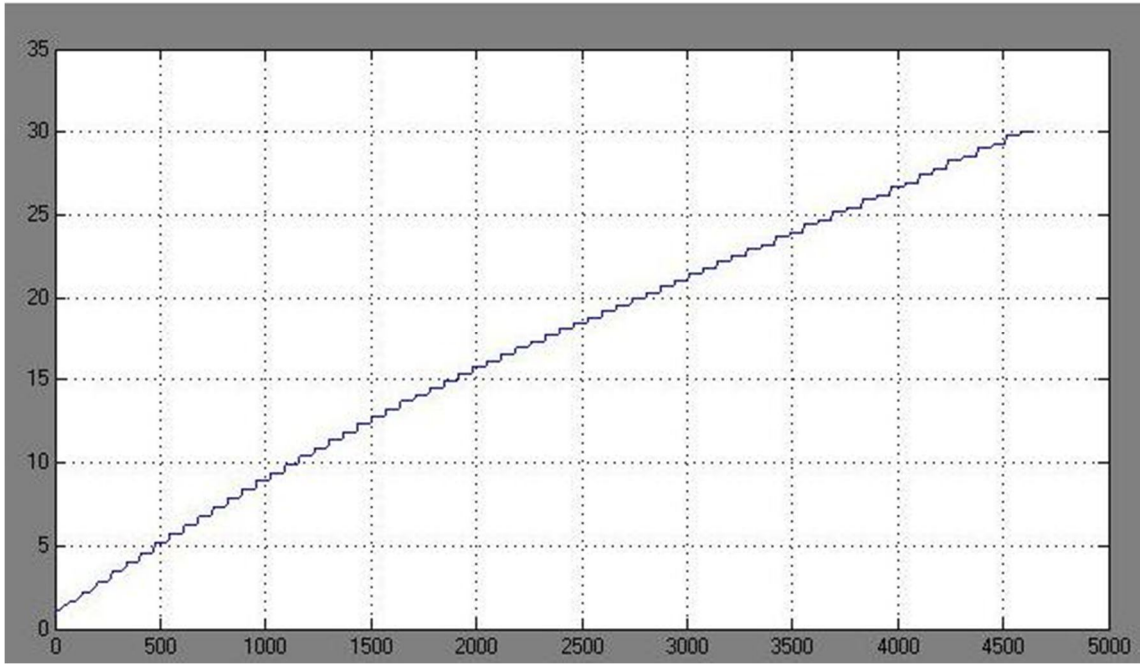


Şekil 4.24. $n=1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

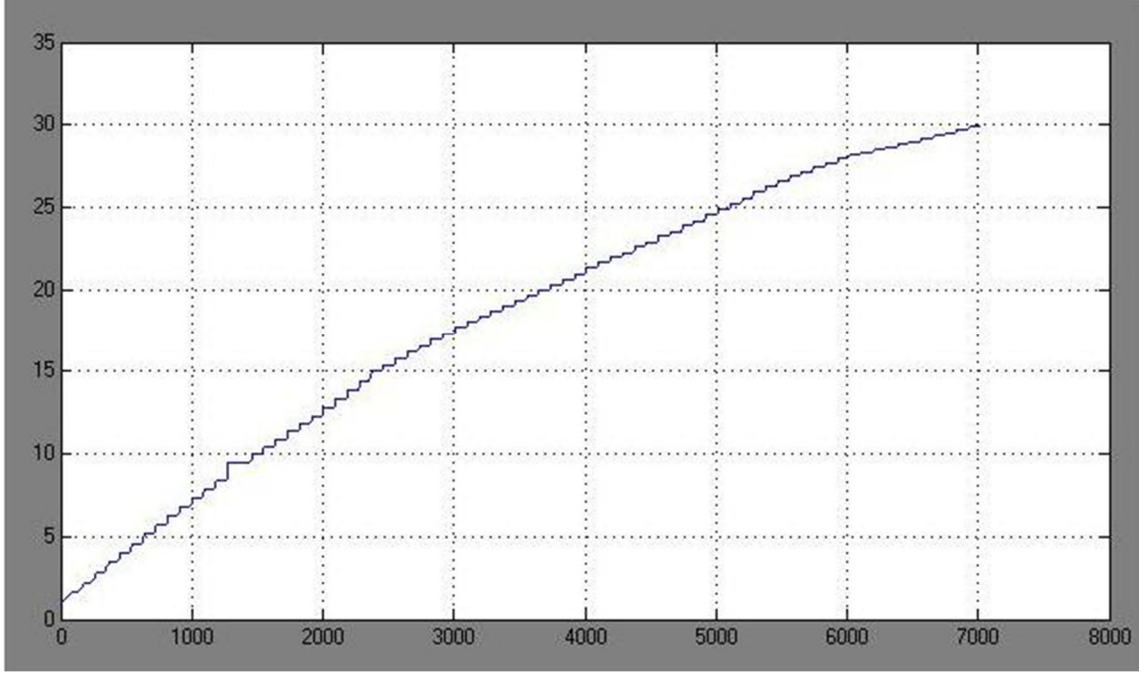
Şekil 4.25'dan Şekil 4.30' a kadar farklı geometrik debiler için depolama tankında depolanan havanın basınç artışı gösterilmiştir. Dikey eksen basıncı bar cinsinden göstermektedir.



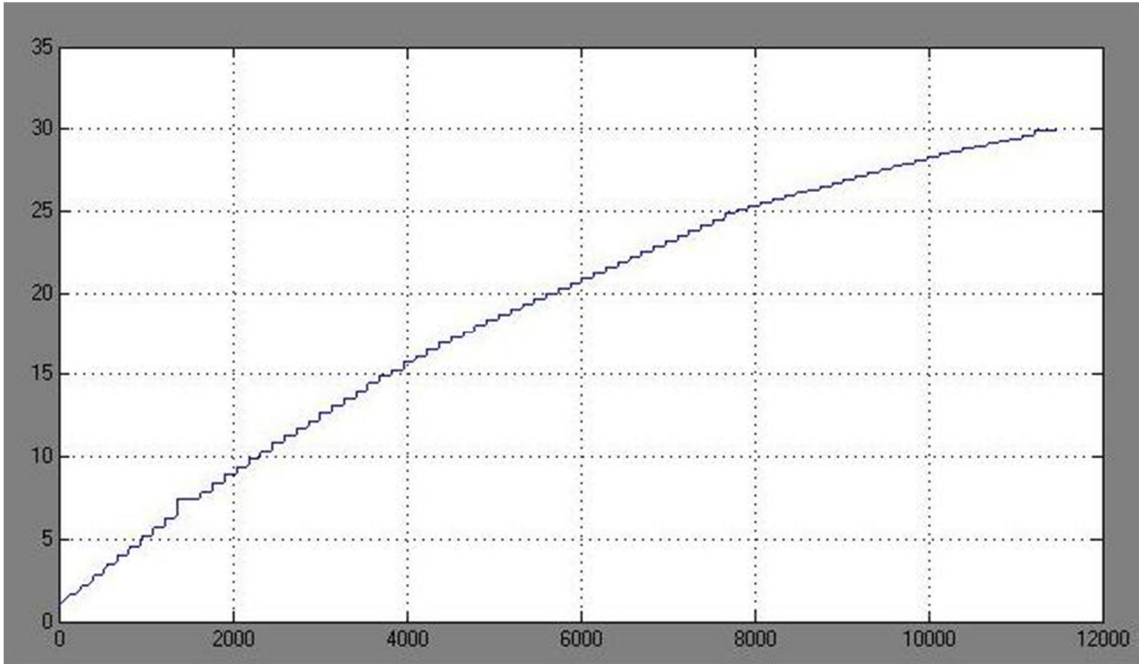
Şekil 4.25. $n=1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



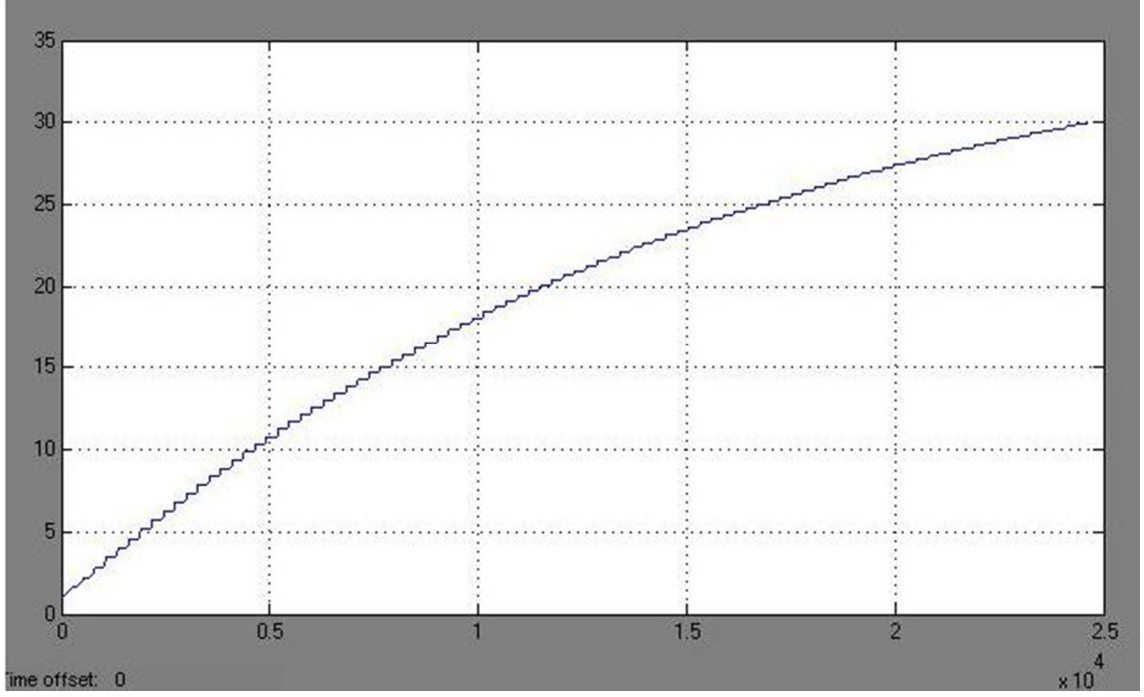
Şekil 4.26. $n=1.01$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



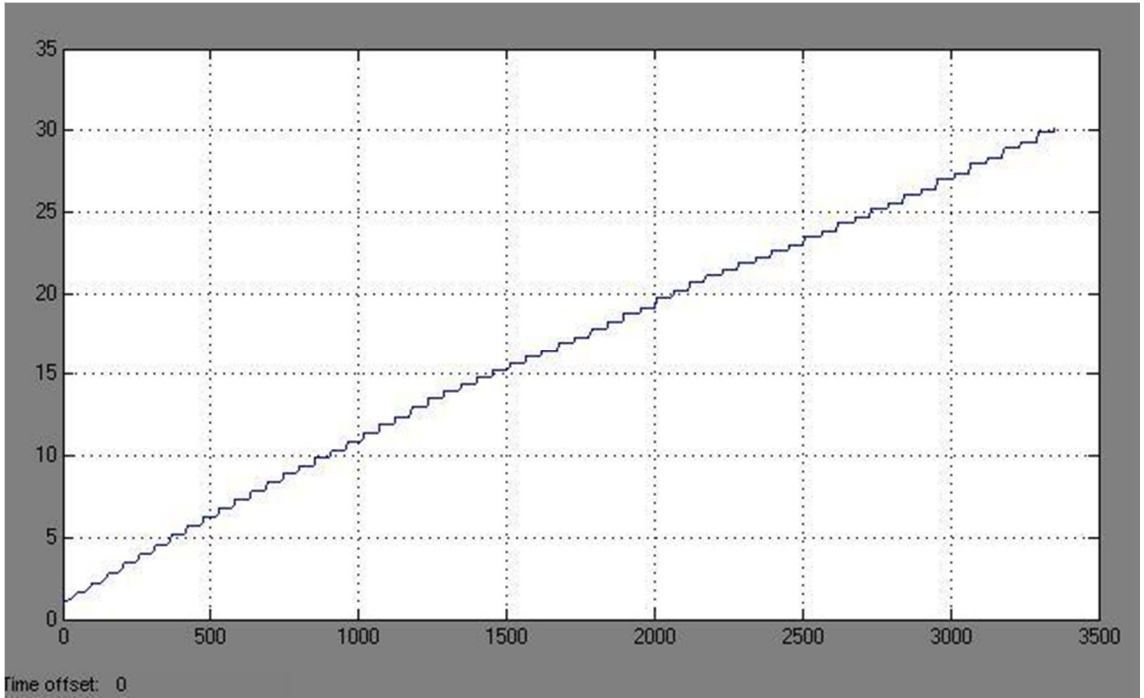
Şekil 4.27. $n=1.01$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



Şekil 4.28. $n=1.01$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı

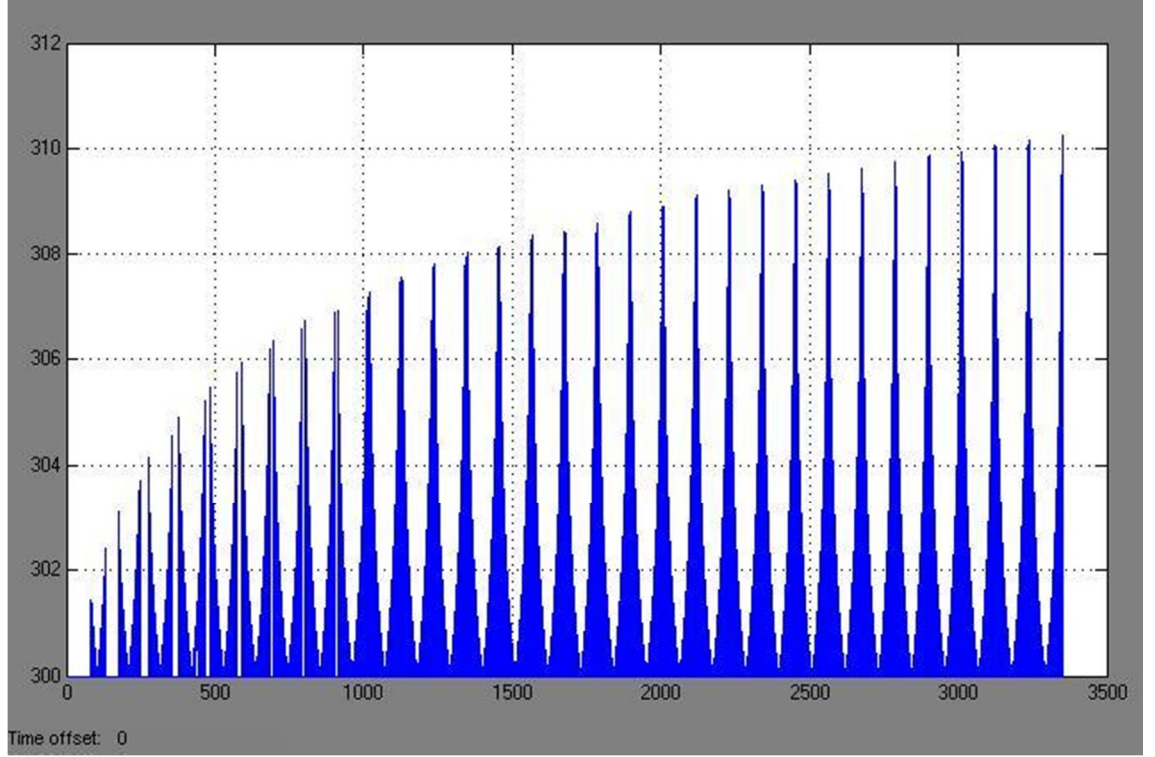


Şekil 4.29. $n=1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



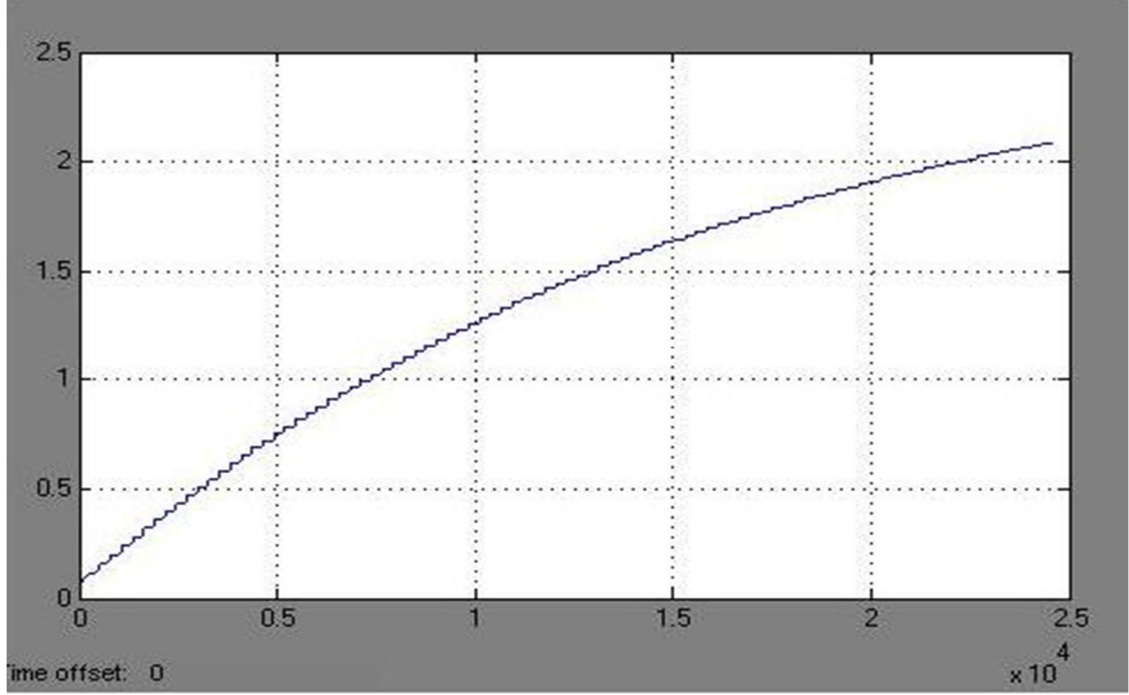
Şekil 4.30. $n=1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı

Politropik sıkıştırma katsayısı 1' e çok yakın olduğu için kullanılan formüle göre (11) sıkıştırma silindiri içindeki sıcaklık çok yükselmemiştir. Şekil 4.31'de bu durum gözükmektedir. Dikey eksen Kelvin cinsinden sıcaklığı vermektedir.

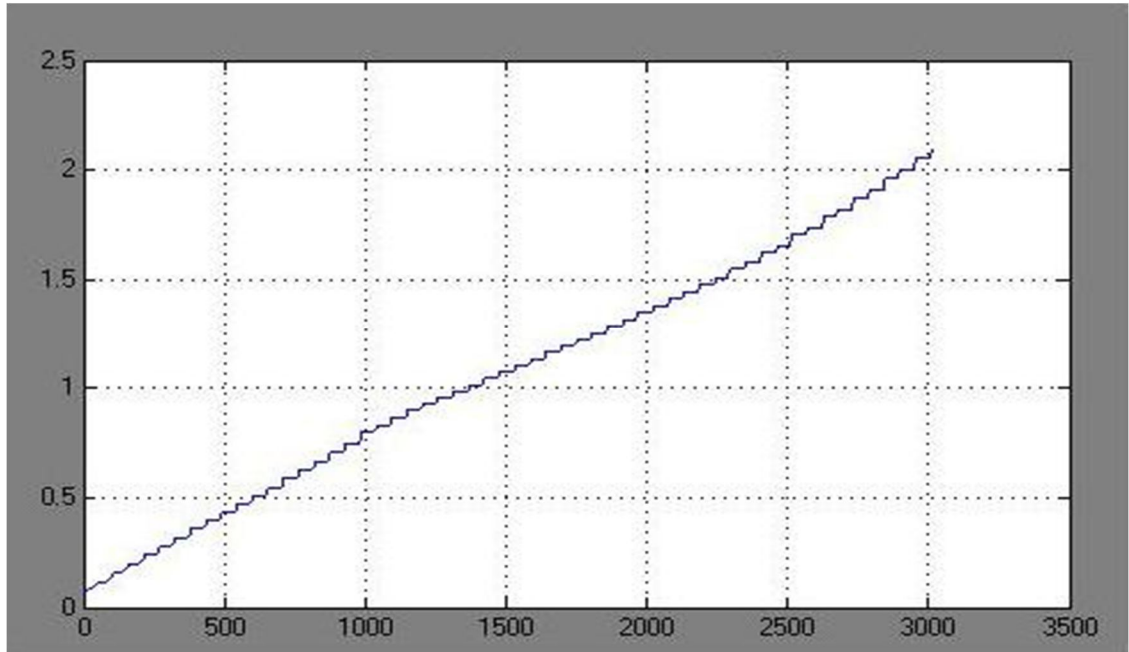


Şekil 4.31. $n=1.01$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık

Hava depolama tankında toplanan hava kütlesi Şekil 4.32 ve Şekil 4.33' te görülmektedir. Dikey eksen kg cinsinden kütleyi vermektedir.



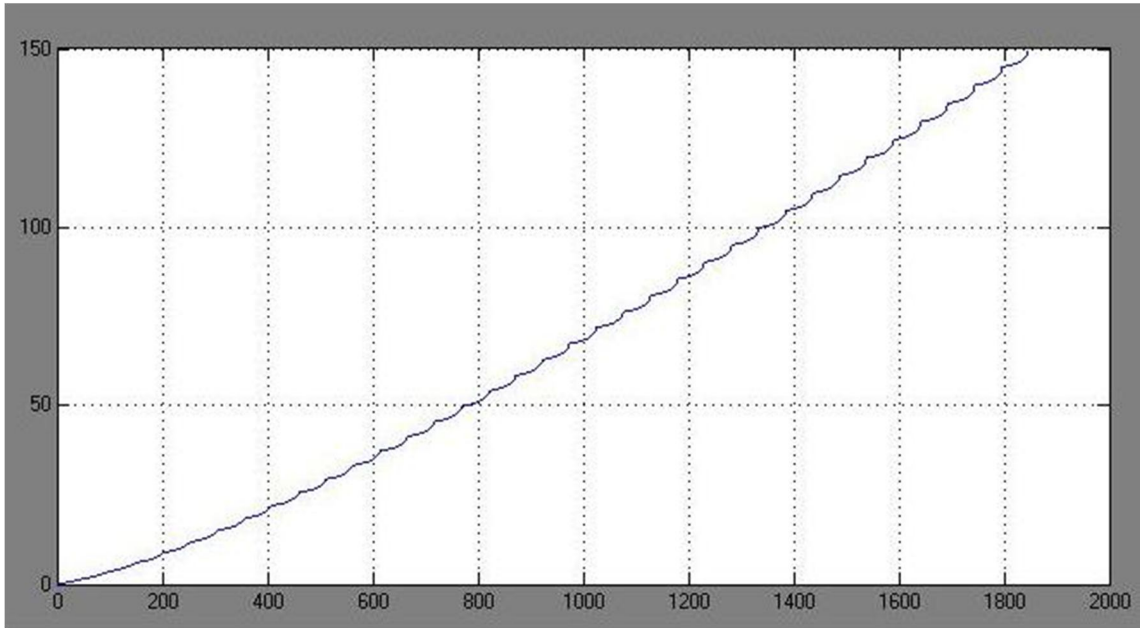
Şekil 4.32. $n=1.01$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan hava miktarı



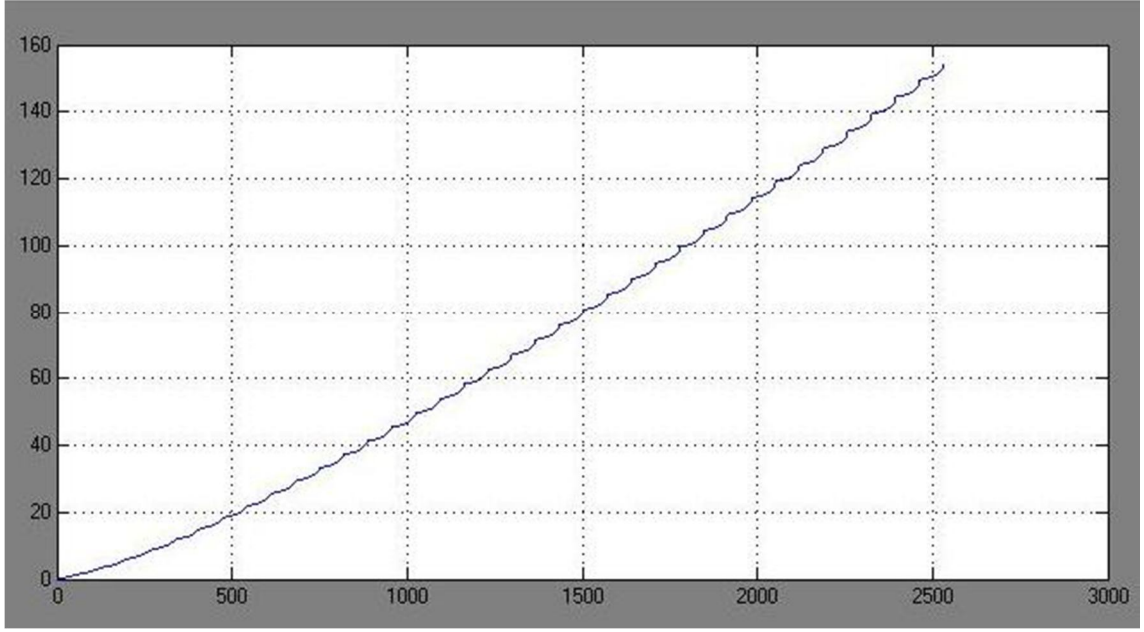
Şekil 4.33. $n=1.01$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan hava miktarı

4.2.Politropik Sıkıştırma Katsayısı $n= 1.1$ Alındığında Elde Edilen Bulgular

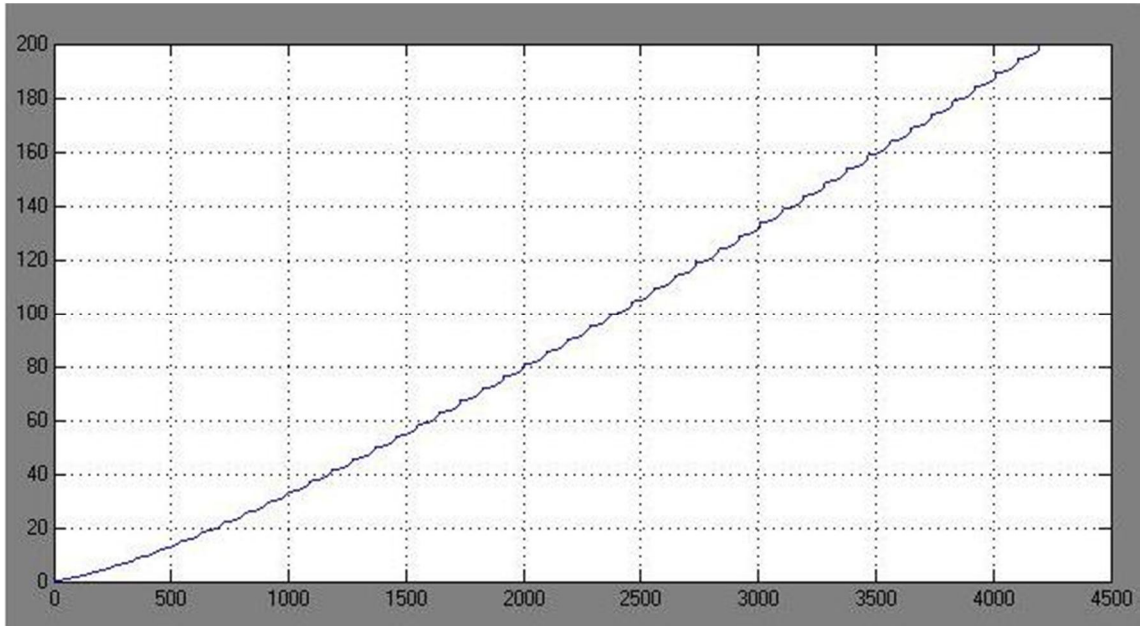
Şekil 4.34' den Şekil 4.39' a kadar sistemin elektrik motorundan bağımsız kendi başına tükettiği enerji gösterilmiştir. Dikey eksenler enerji birimini Wattsaat (Wh) cinsinden göstermektedir. Geometrik debi düşürüldükçe sistemin 30 bar basınçta hava depolaması için geçen süre artmaktadır. Geçen sürenin artması da tüketilen enerjinin artmasına neden olmaktadır. 30 cm³/devir sabit geometrik debi ile çalışan pompada sistemin işlemi tamamlaması 1800 saniye civarında sürmekteyken, pompanın 6 cm³/devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin işlemi tamamlaması 14000 saniye civarında sürmektedir. Bu süre farkından 150 Wh tüketilen enerji 220 Wh'a kadar çıkmaktadır. Şekil 4.39' da görüleceği üzere değişken geometrik debili pompa kullanarak hem işlem süresi azaltılmakta hem de tüketilen enerji miktarı azaltılmaktadır.



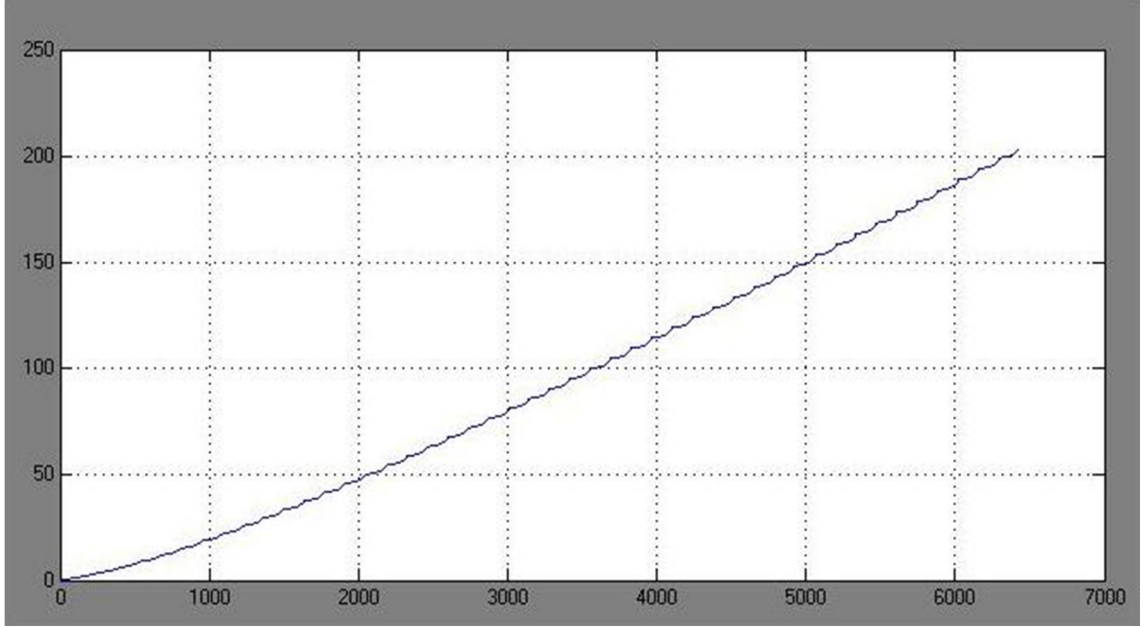
Şekil 4.34. $n=1.1$ için pompanın 30 cm³/devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



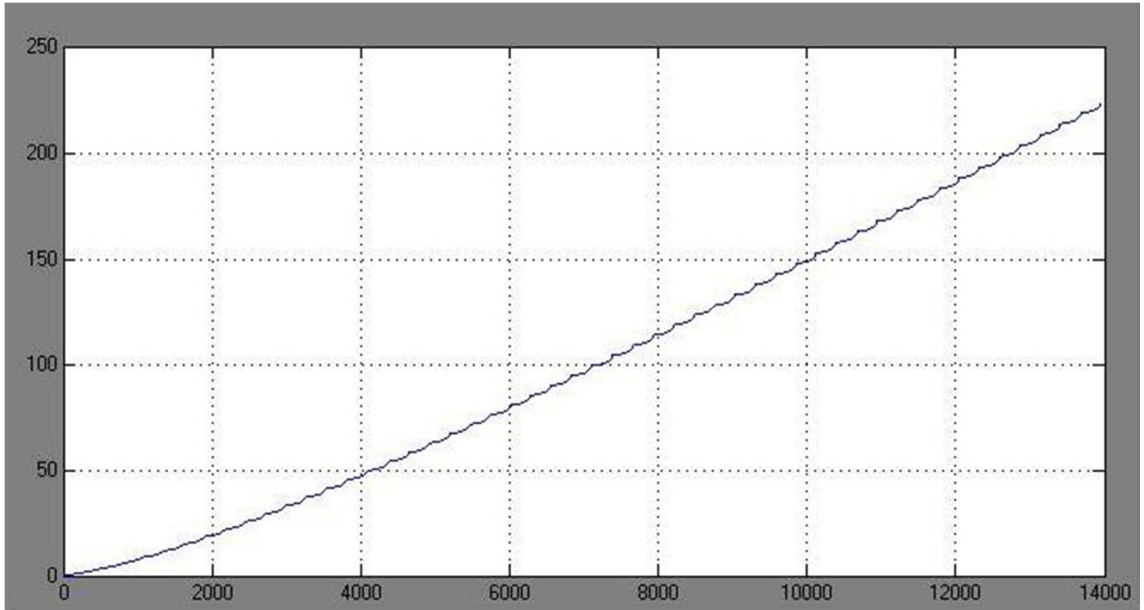
Şekil 4.35. $n=1.1$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



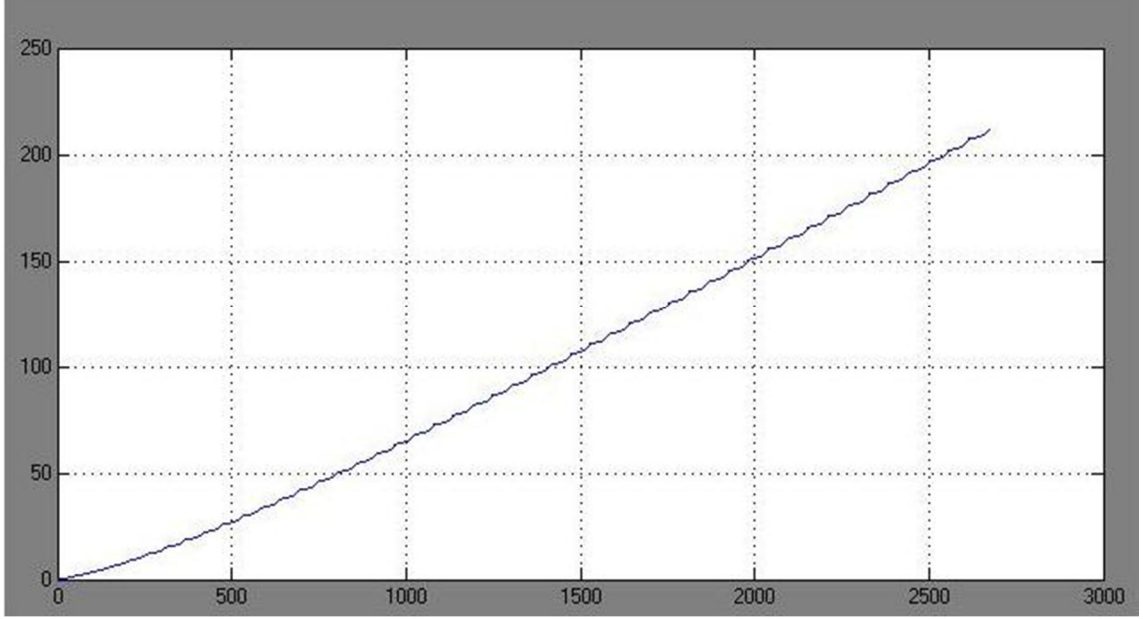
Şekil 4.36. $n=1.1$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



Şekil 4.37. $n=1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

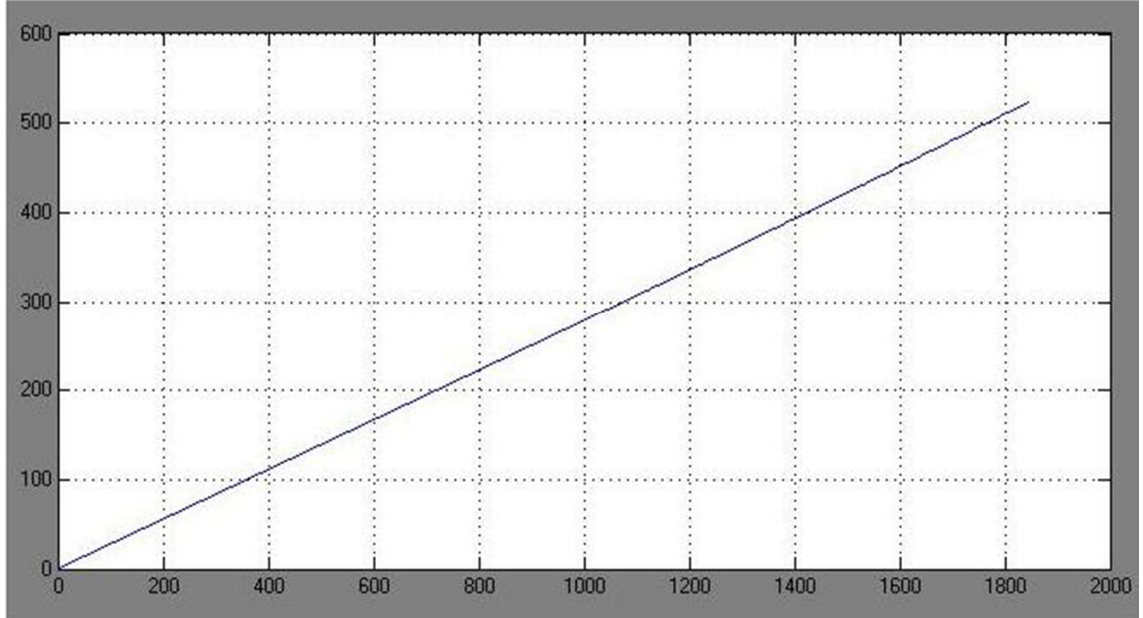


Şekil 4.38. $n=1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

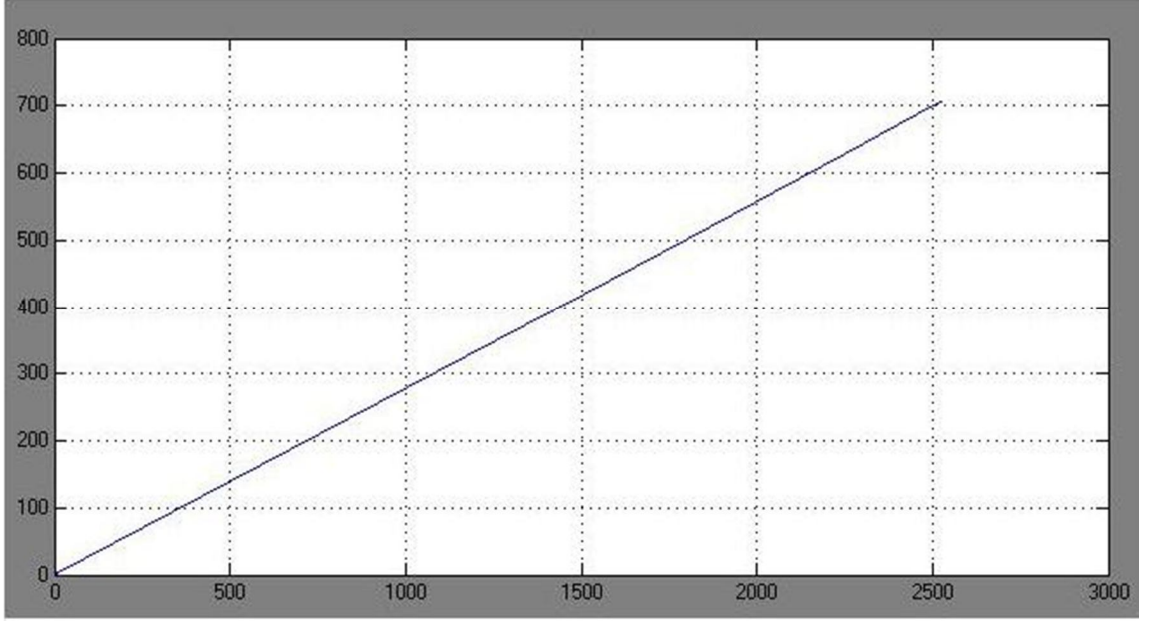


Şekil 4.39. $n=1.1$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

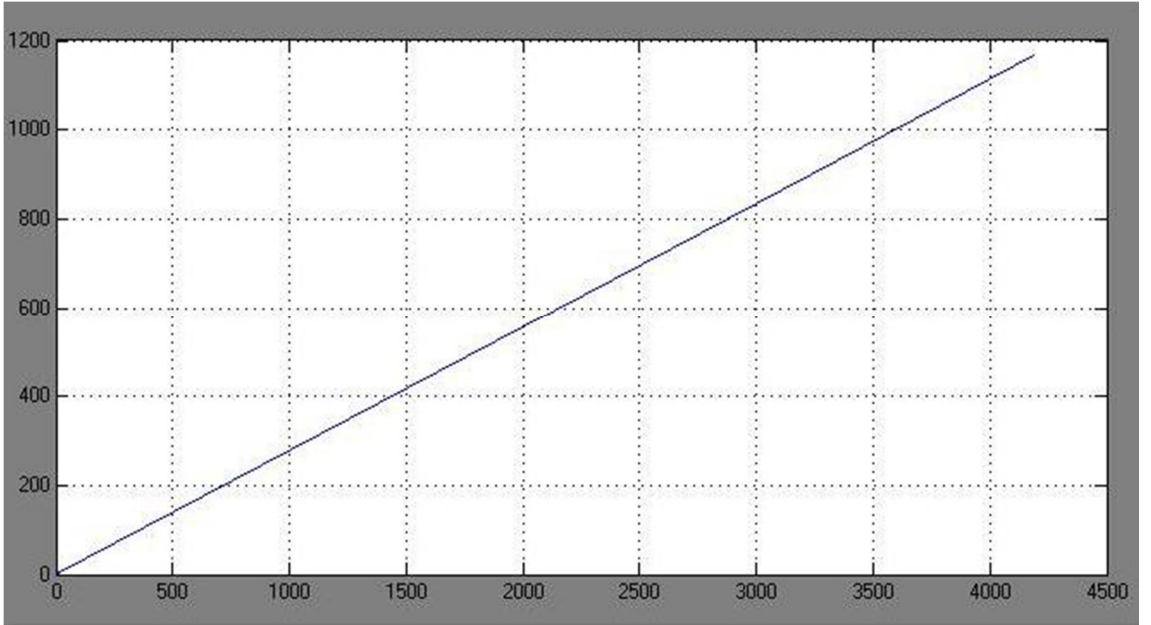
Şekil 4.40' dan Şekil 4.45' e kadar sistemin toplam tükettiği enerji gösterilmiştir. Geometrik debi düşürüldükçe sistemin 30 bar basınçta hava depolaması için geçen süre artmaktadır. Geçen sürenin artması da tüketilen enerjinin artmasına neden olmaktadır.



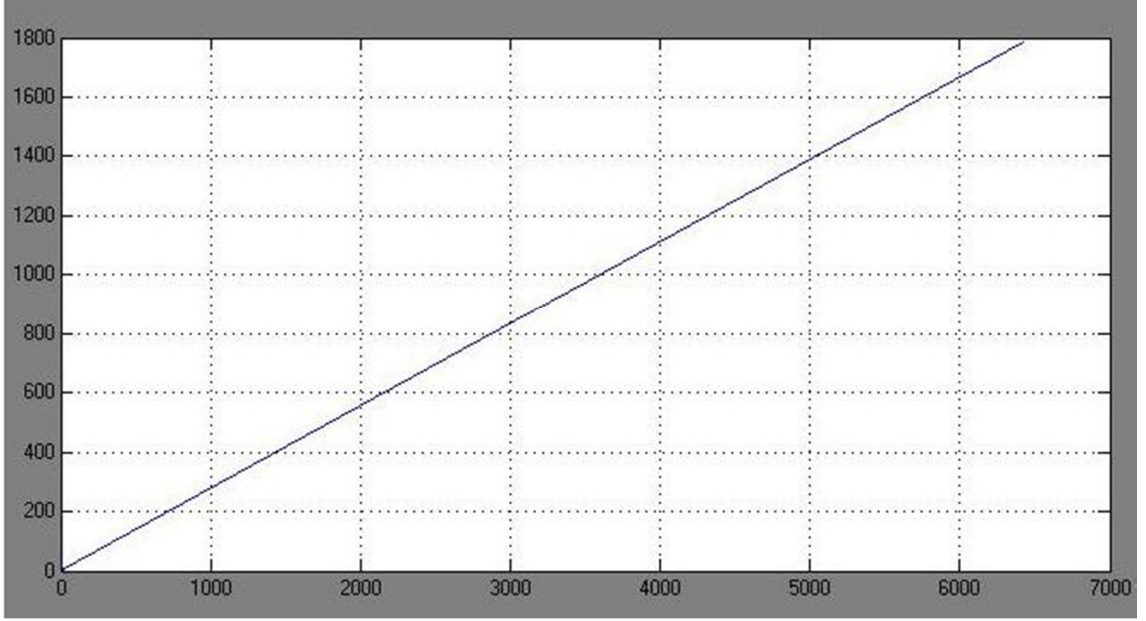
Şekil 4.40. $n=1.1$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



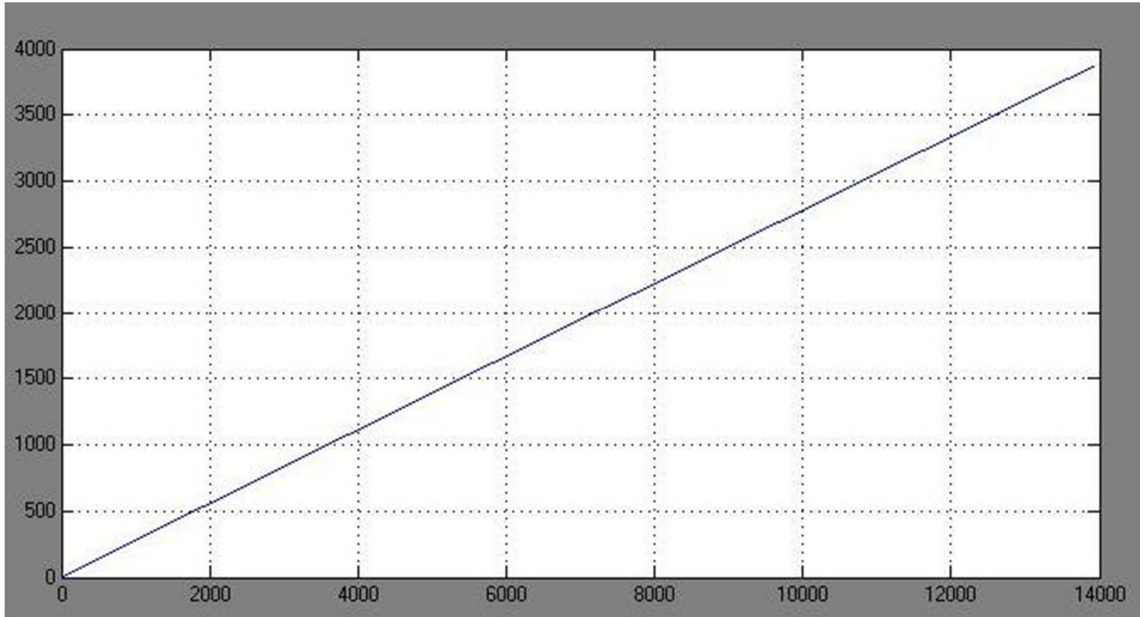
Şekil 4.41. $n=1.1$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



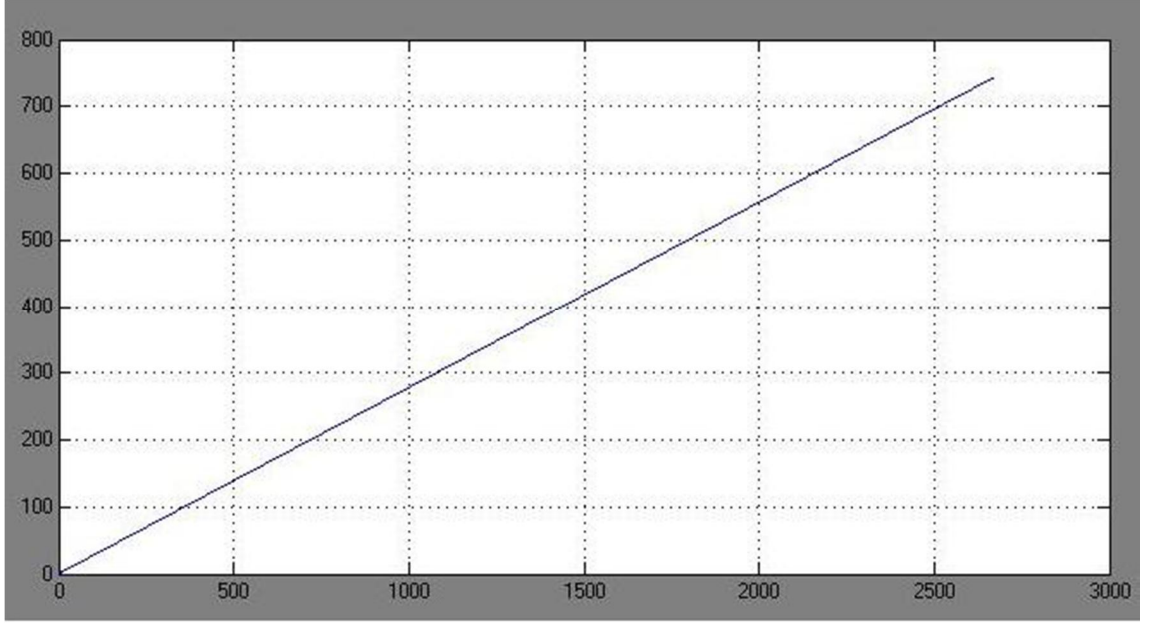
Şekil 4.42. $n=1.1$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



Şekil 4.43. $n=1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji

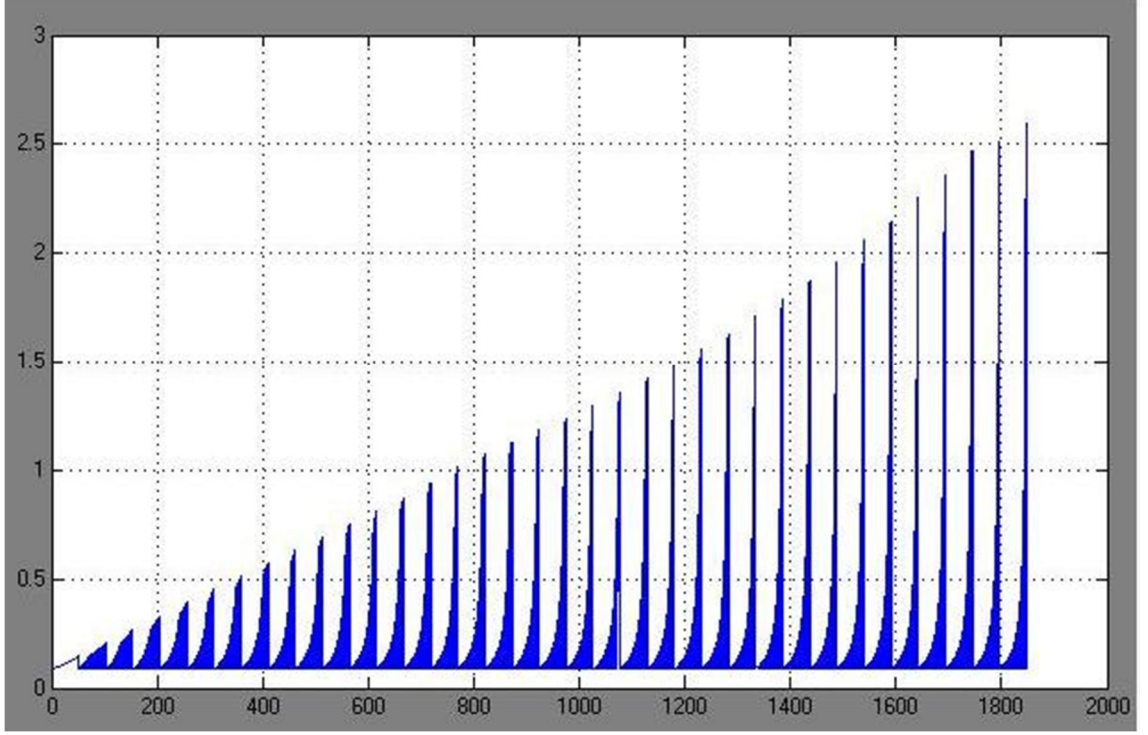


Şekil 4.44. $n=1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji

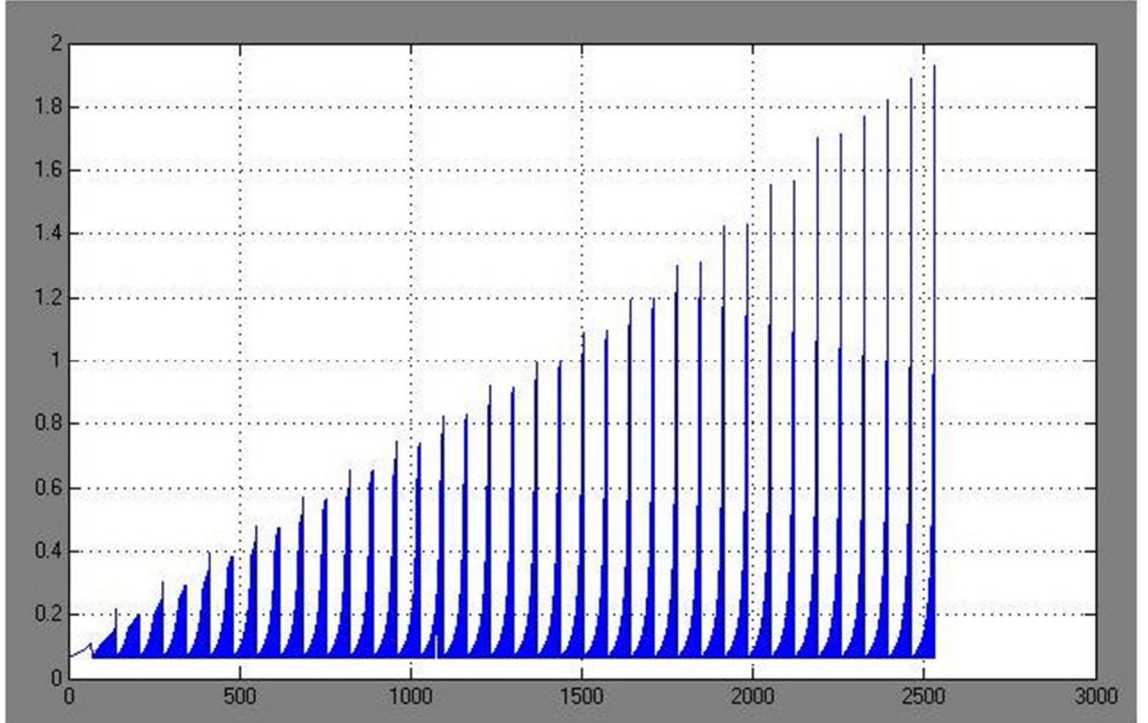


Şekil 4.45. $n=1.1$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji

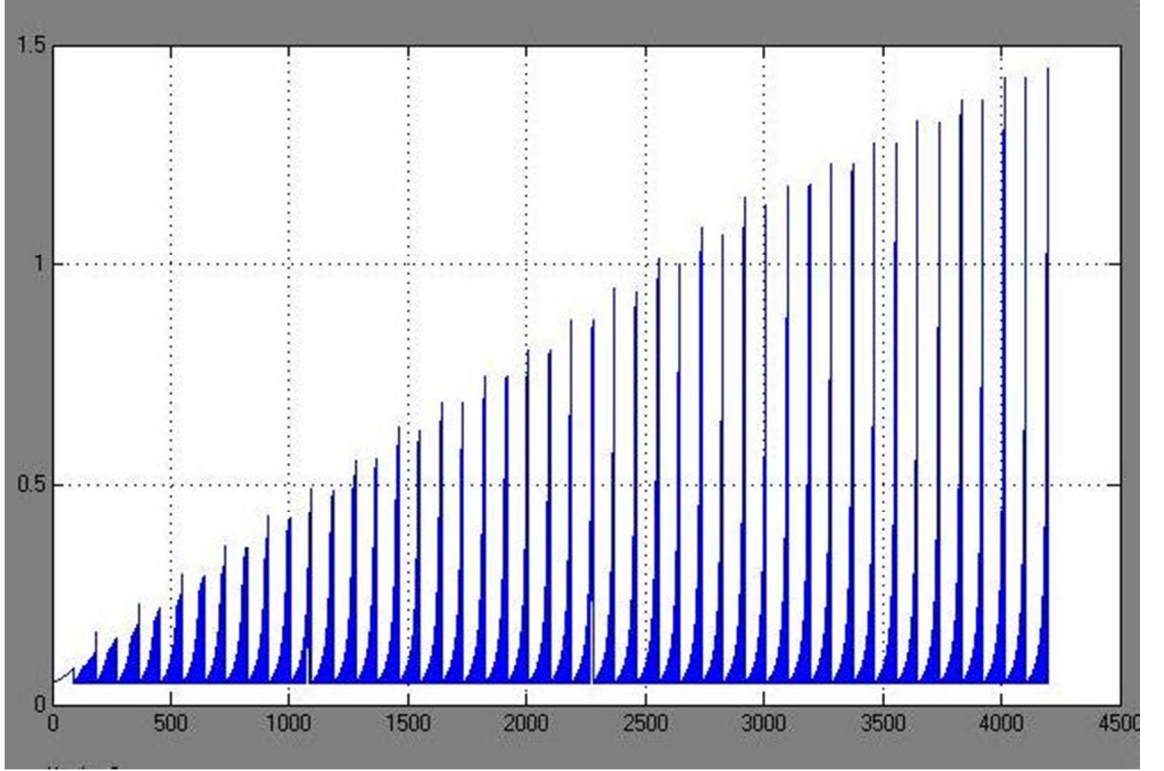
Elektrik motorunun çıktığı güç farklı geometrik debiler için Şekil 4.46' dan Şekil 4.51'e kadar gösterilmiştir. Dikey eksen gücü kiloWatt (kW) cinsinden vermektedir. Büyük geometrik debilerde 2,5 kW' a kadar çıkan güç, küçük geometrik debilerde 1 kW'ı geçmemektedir.



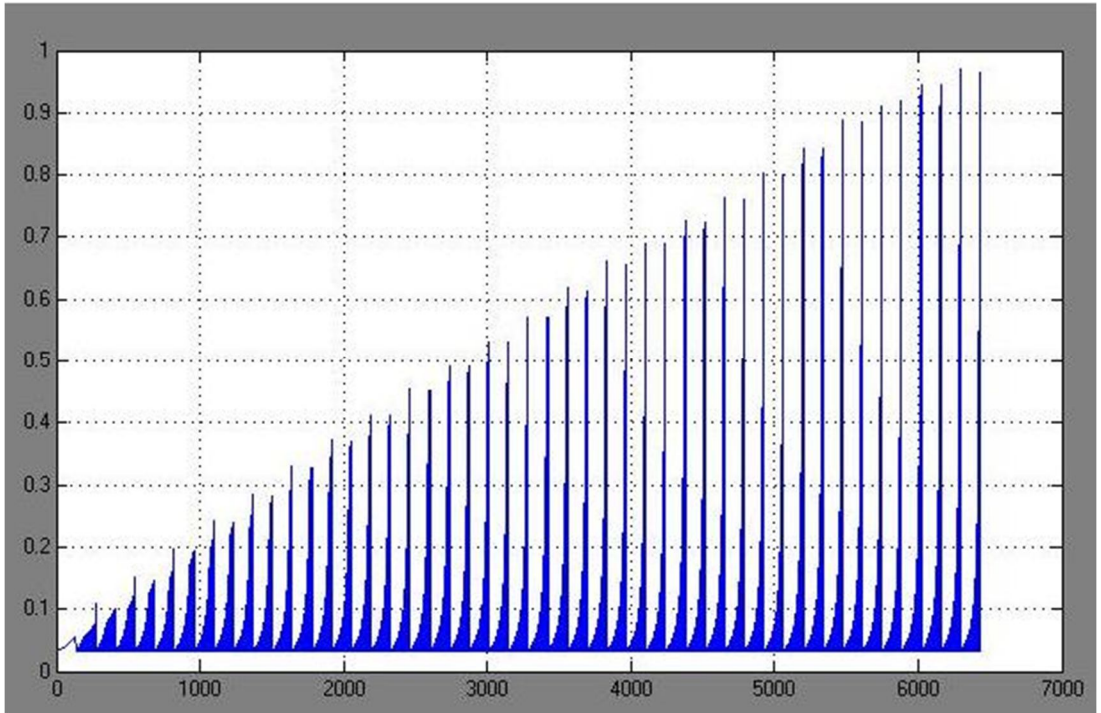
Şekil 4.46. $n=1.1$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



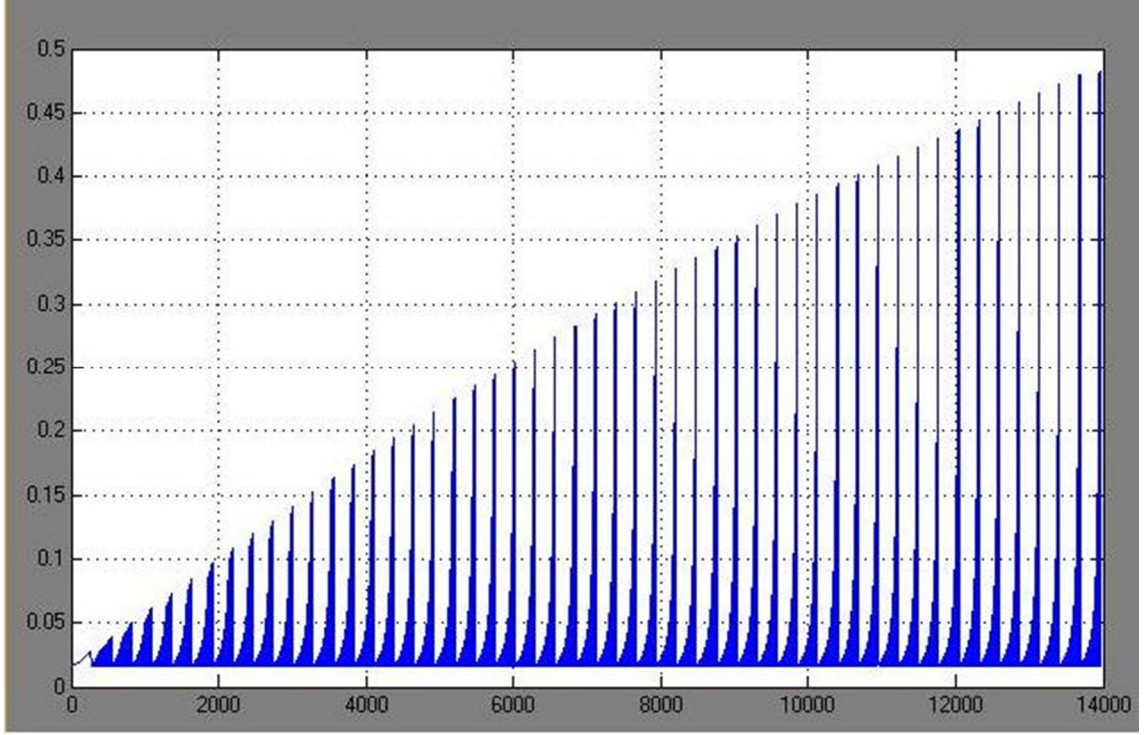
Şekil 4.47. $n=1.1$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



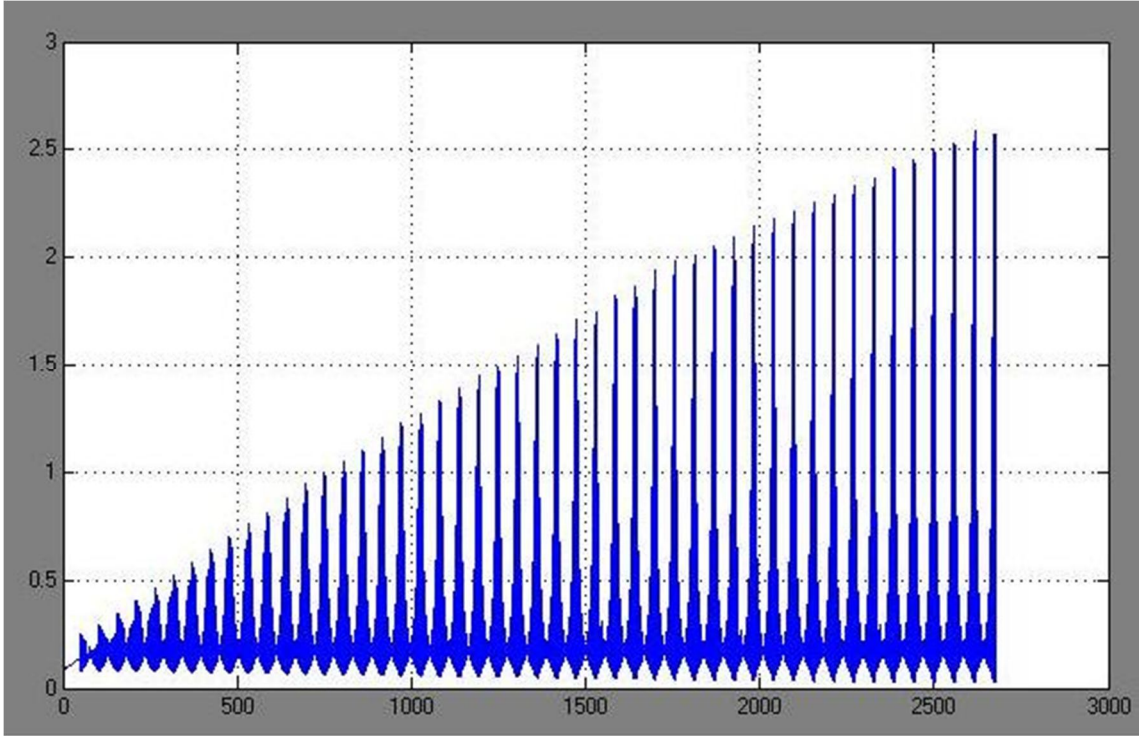
Şekil 4.48. $n=1.1$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



Şekil 4.49. $n=1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

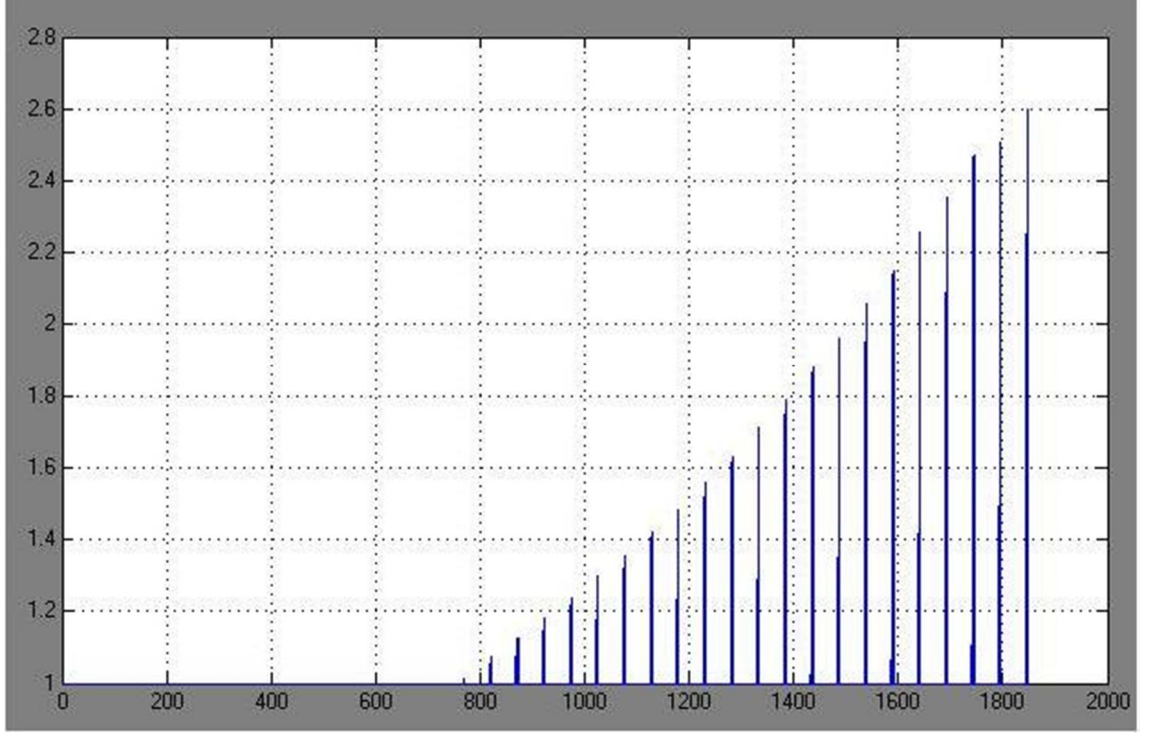


Şekil 4.50. $n=1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

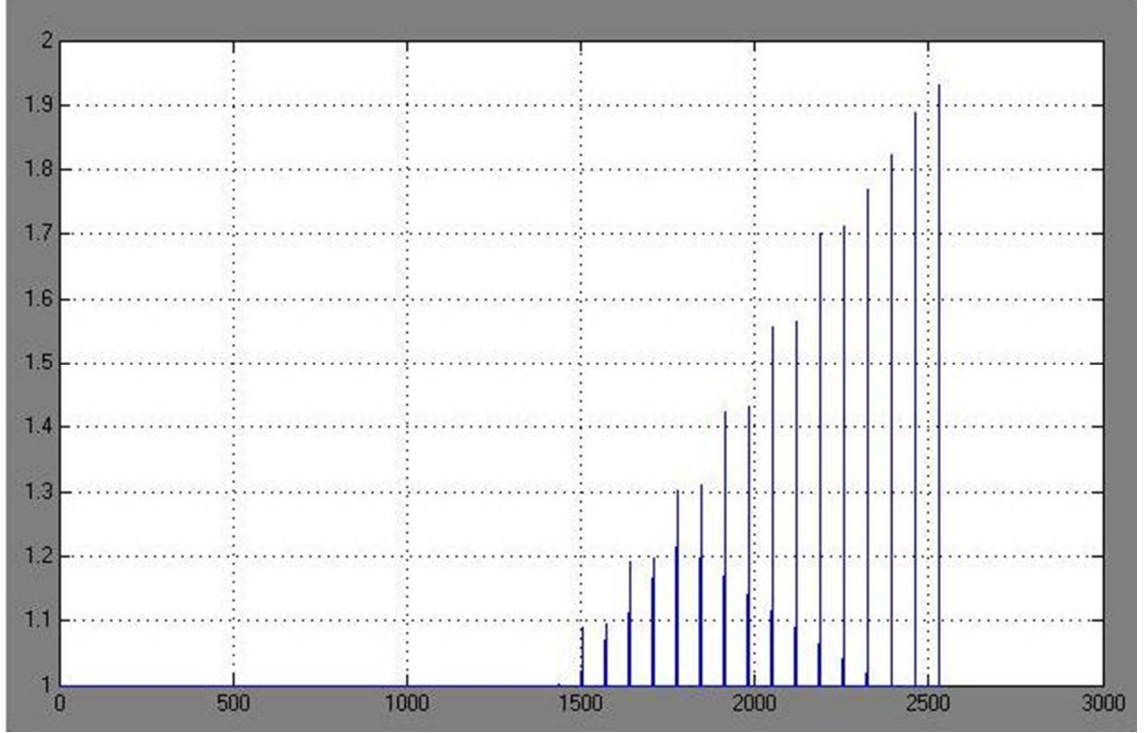


Şekil 4.51. $n=1.1$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

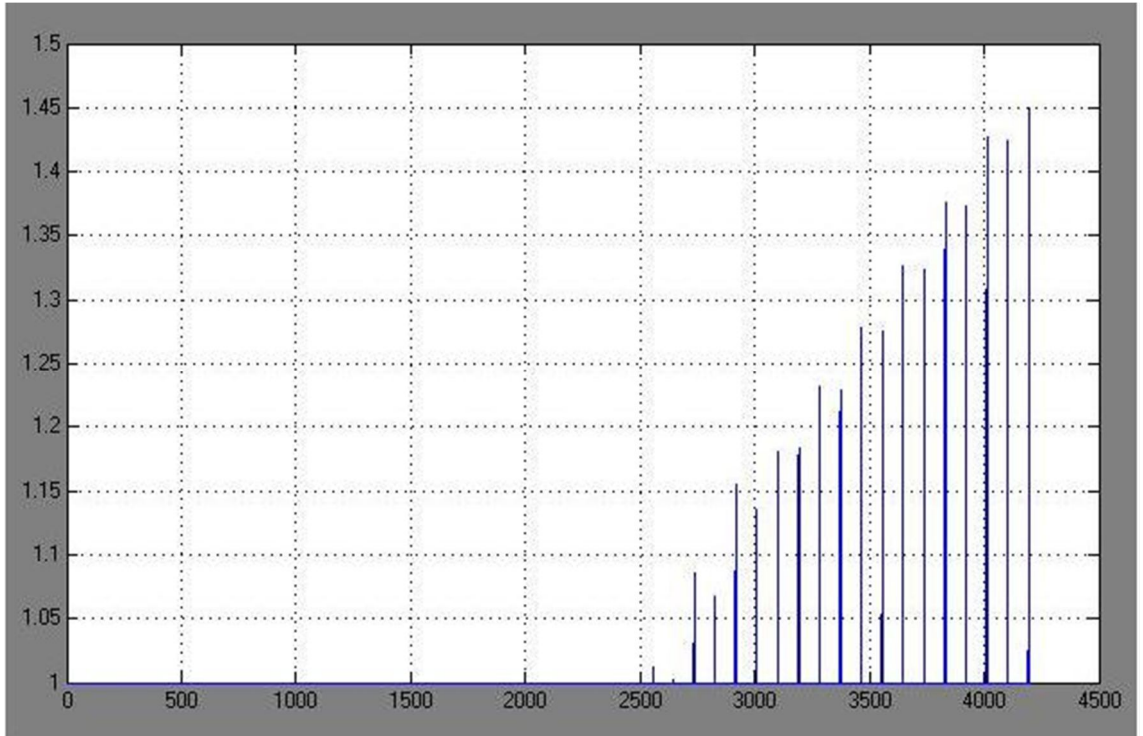
Elektrik motorunun boşta dahi 1 kW g¼¼ çektii kabulüne göre 1 kW gücün üstünü sistemin işlemini sürdürmek için çekmektedir. Küçük geometrik debilerde (12 ve 6 cm³/devir gibi) elektrik motoru boşta çalıştığından daha az güce ihtiyaç duymaktadır. Şekil 4.52' den Şekil 4.57' ye kadar bu durum gösterilmiştir.



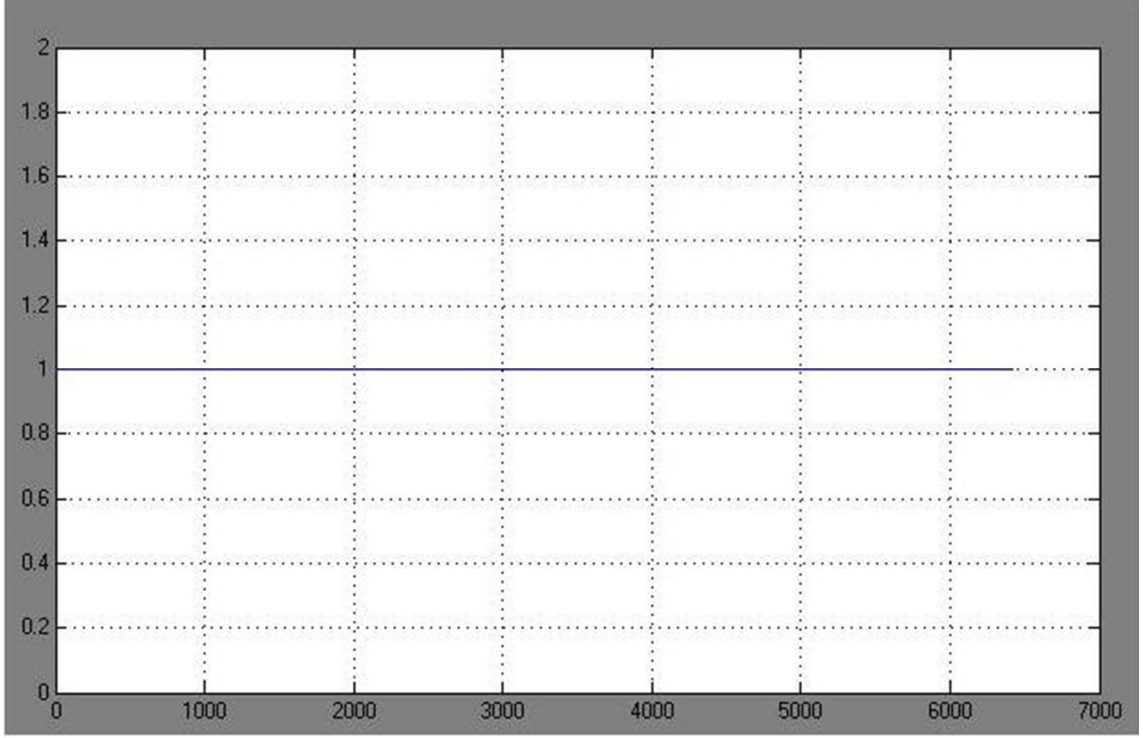
Şekil 4.52. $n=1.1$ için pompanın 30 cm³/devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



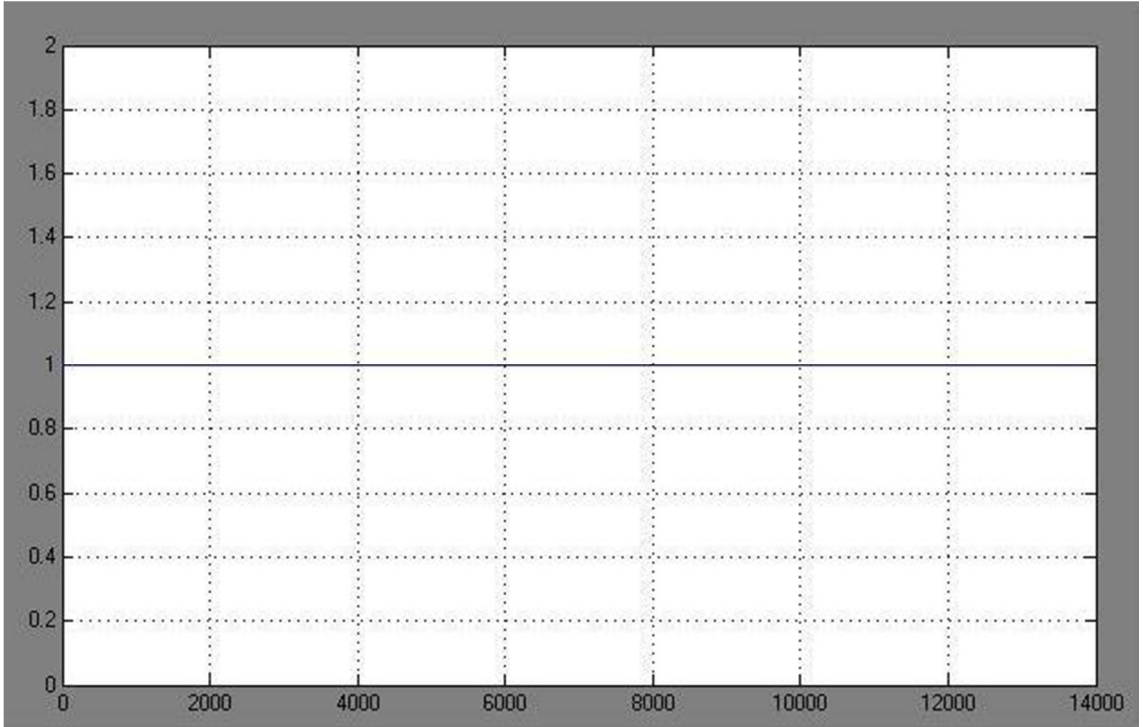
Şekil 4.53. $n=1.1$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



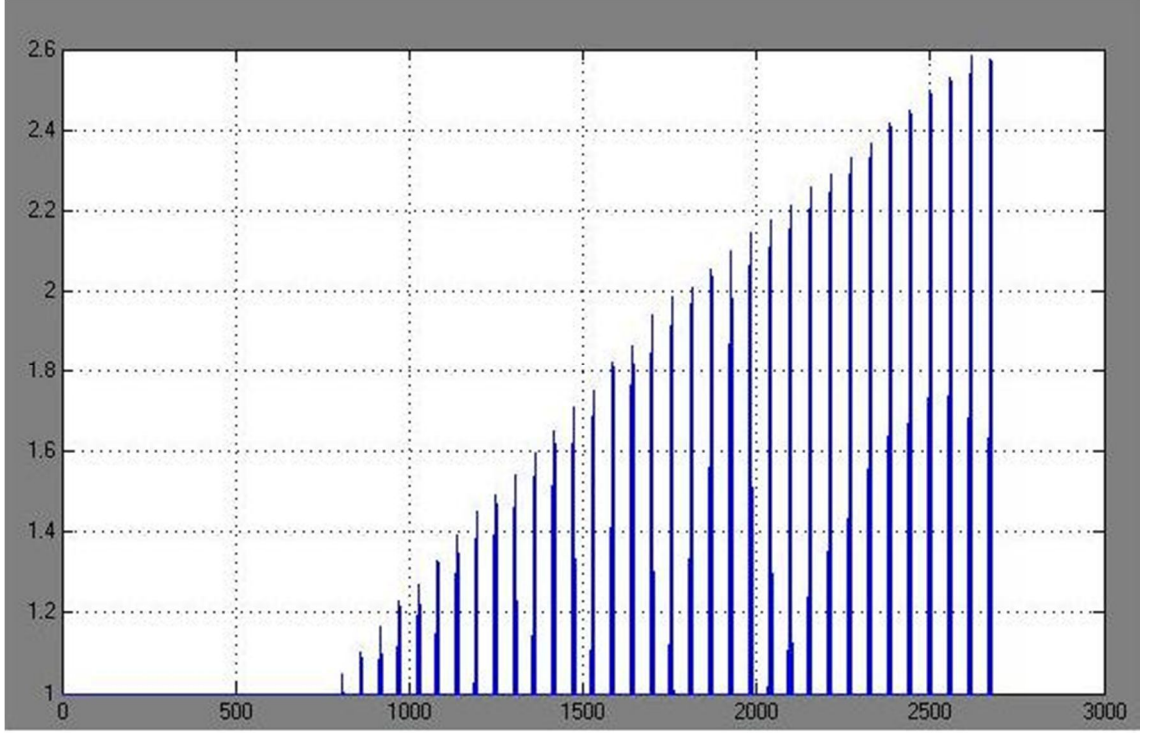
Şekil 4.54. $n=1.1$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



Şekil 4.55. $n=1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

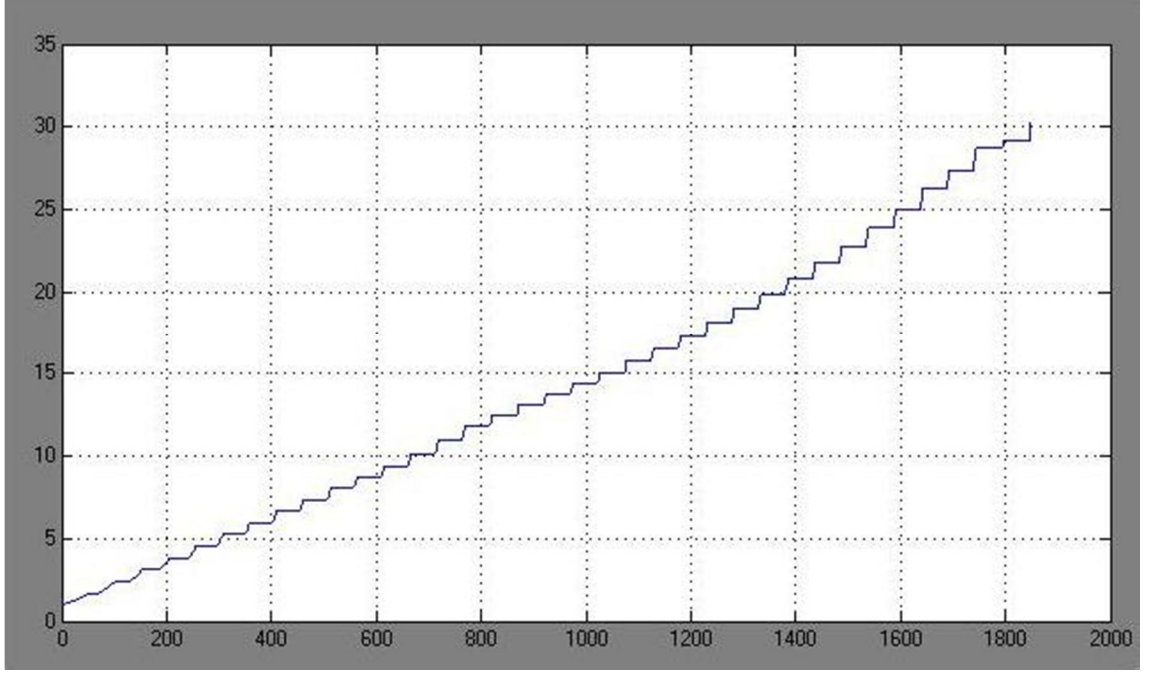


Şekil 4.56. $n=1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

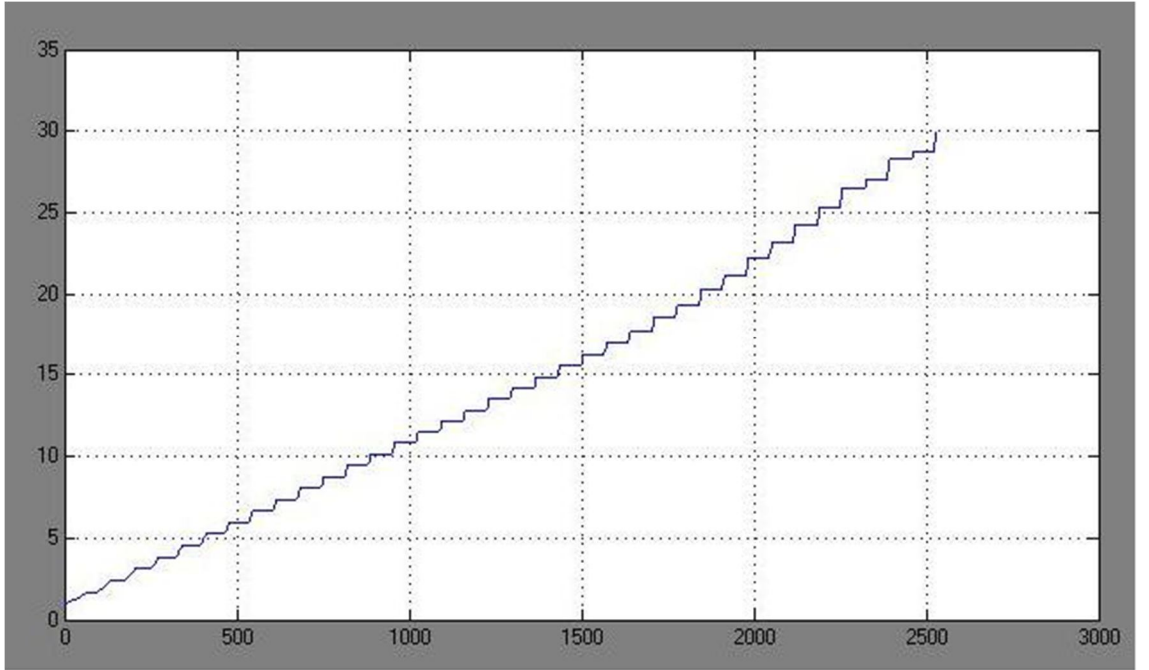


Şekil 4.57. $n=1.1$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

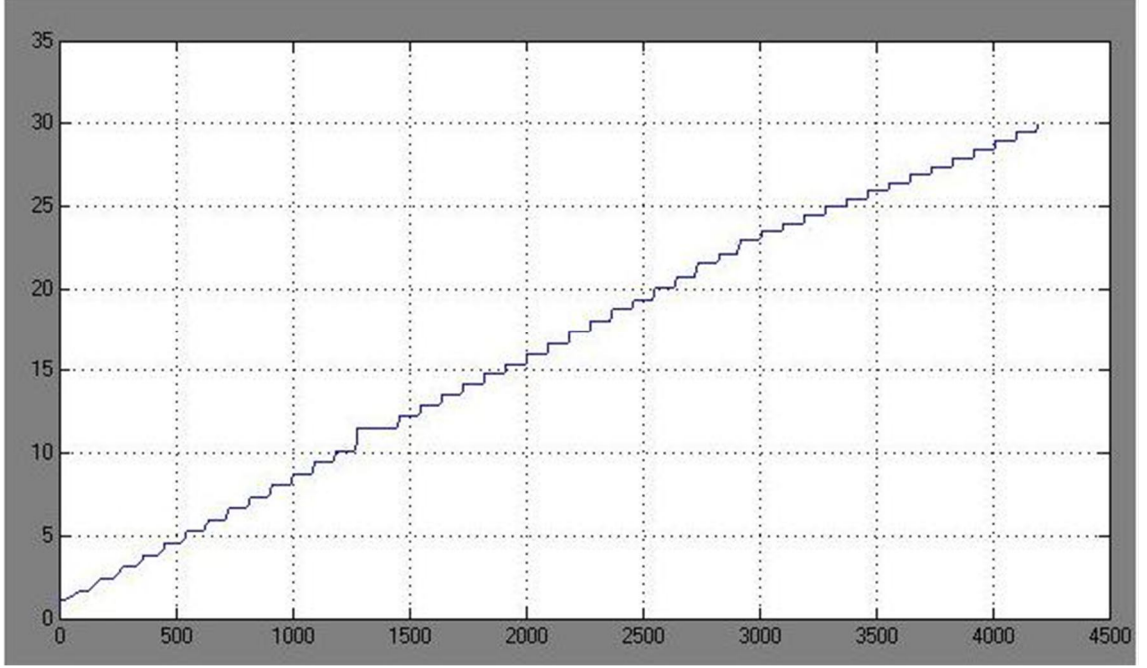
Şekil 4.58'den Şekil 4.63' e kadar farklı geometrik debiler için depolama tankında depolanan havanın basınç artışı gösterilmiştir. Dikey eksen basıncı bar cinsinden göstermektedir.



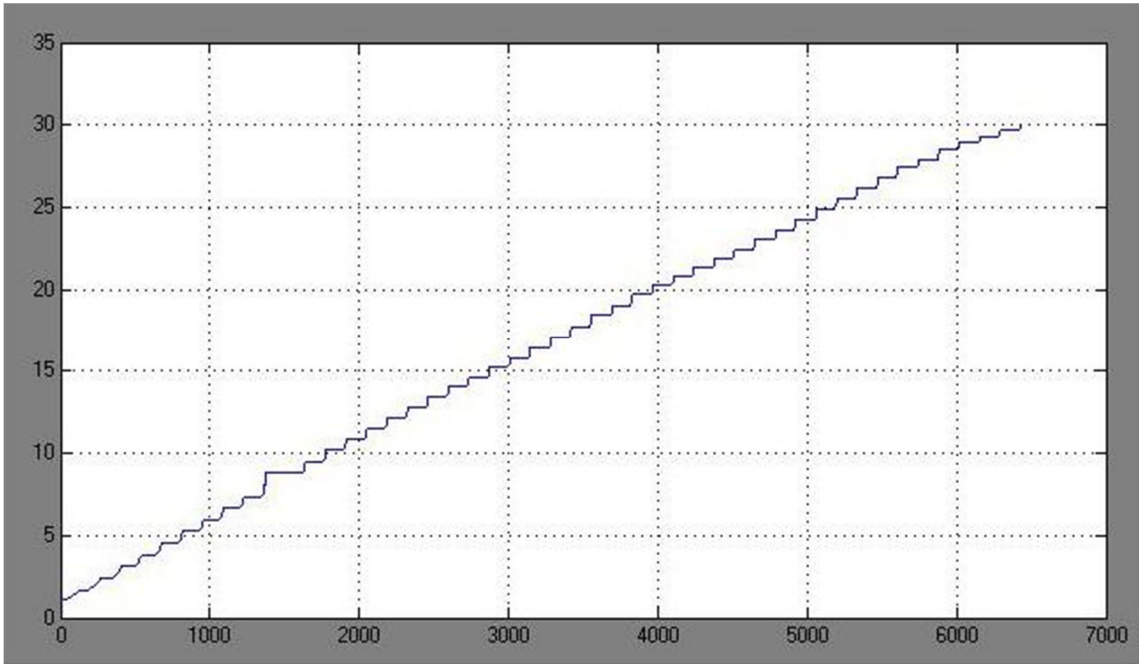
Şekil 4.58. $n=1.1$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



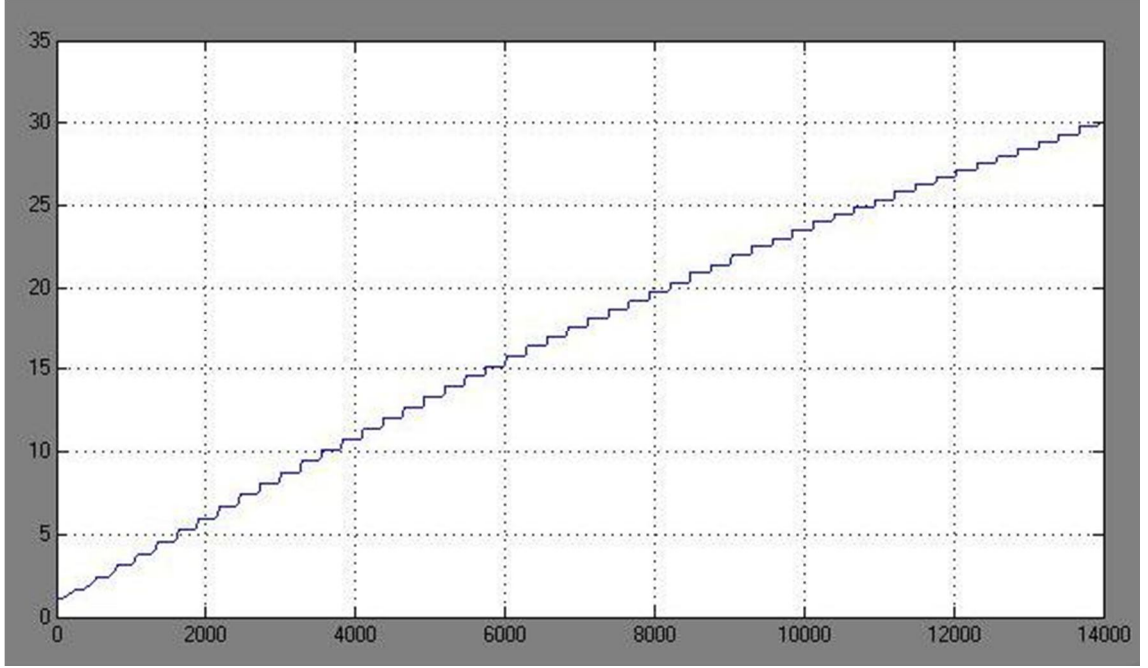
Şekil 4.59. $n=1.1$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



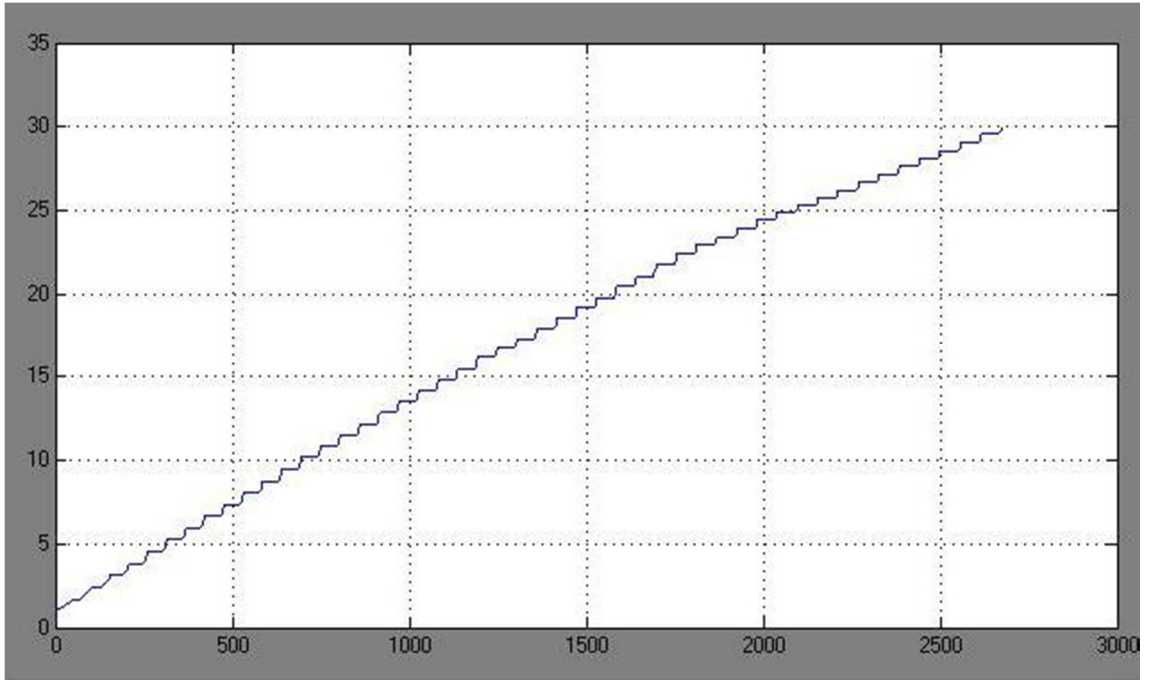
Şekil 4.60. $n=1.1$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



Şekil 4.61. $n=1.1$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



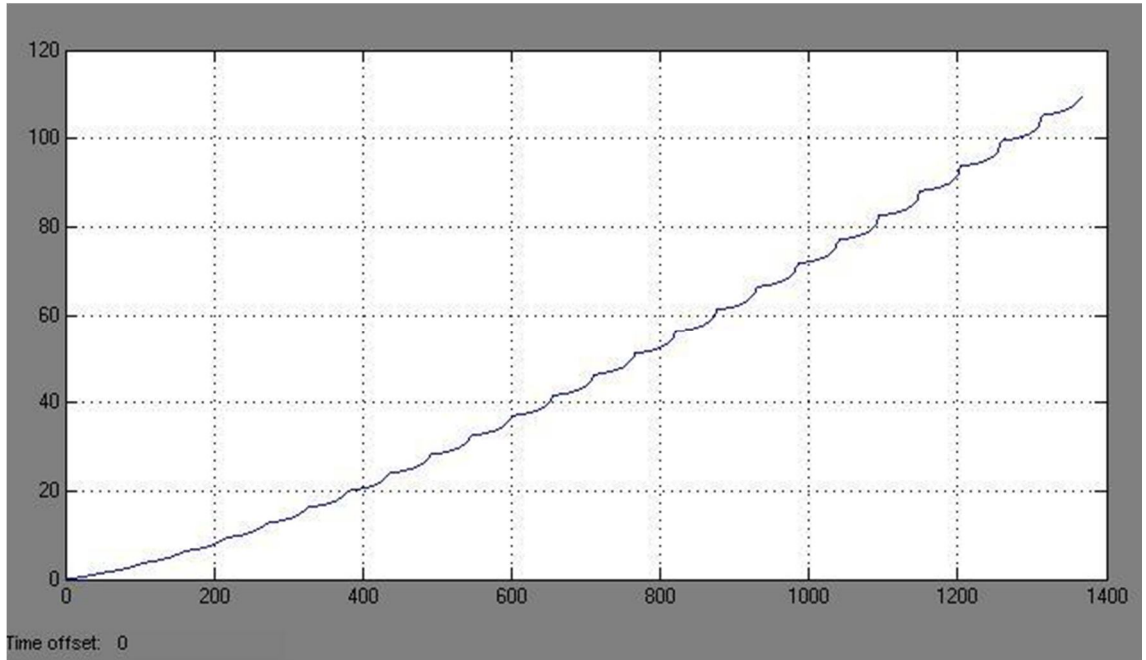
Şekil 4.62. $n=1.1$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



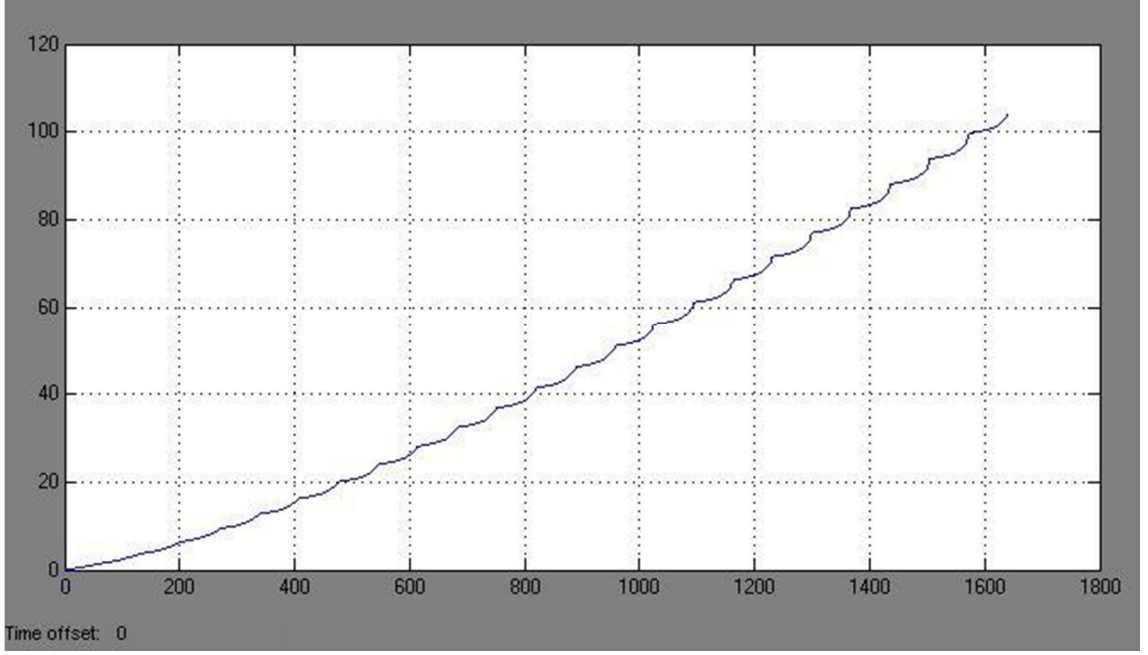
Şekil 4.63. $n=1.1$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı

4.3.Politropik Sıkıştırma Katsayısı $n= 1.2$ Alındığında Elde Edilen Bulgular

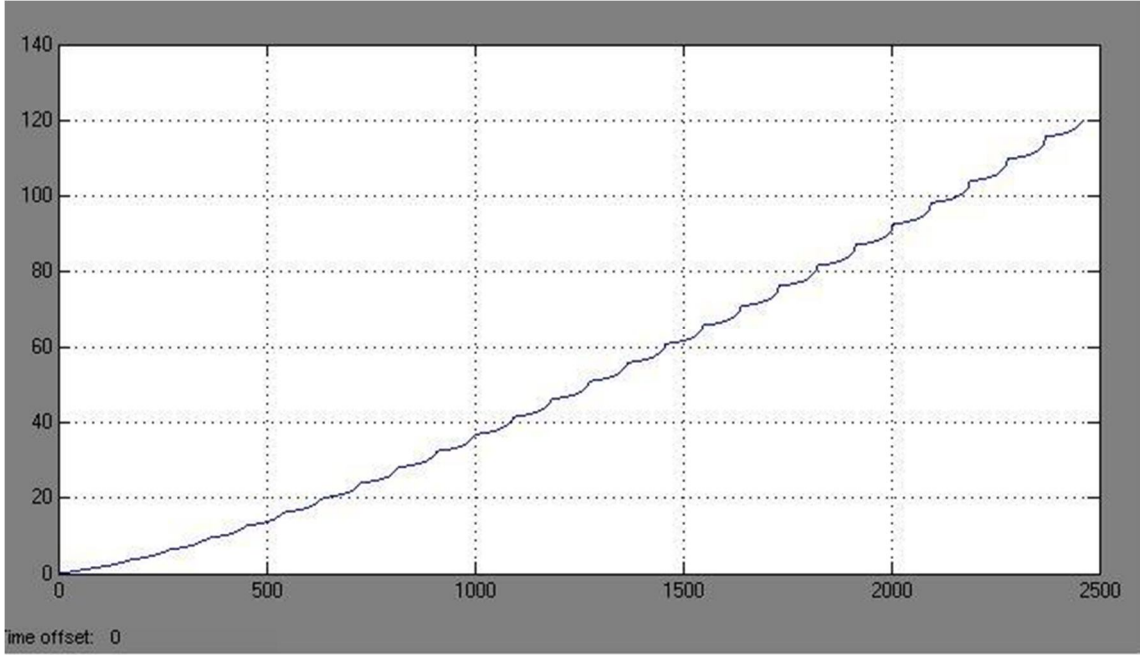
Şekil 4.64' den Şekil 4.69' a kadar sistemin elektrik motorundan bağımsız kendi başına tükettiği enerji gösterilmiştir. Dikey eksenler enerji birimini Wattsaat (Wh) cinsinden göstermektedir. Geometrik debi düşürüldükçe sistemin 30 bar basınçta hava depolaması için geçen süre artmaktadır. Geçen sürenin artması da tüketilen enerjinin artmasına neden olmaktadır. 30 cm³/devir sabit geometrik debi ile çalışan pompada sistemin işlemi tamamlaması 1400 saniye civarında sürmekteyken, pompanın 6 cm³/devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin işlemi tamamlaması 9200 saniye civarında sürmektedir. Bu süre farkından 105 Wh tüketilen enerji 160 Wh'a kadar çıkmaktadır. Şekil 4.69' da görüleceği üzere değişken geometrik debili pompa kullanarak hem işlem süresi azaltılmakta hem de tüketilen enerji miktarı azaltılmaktadır.



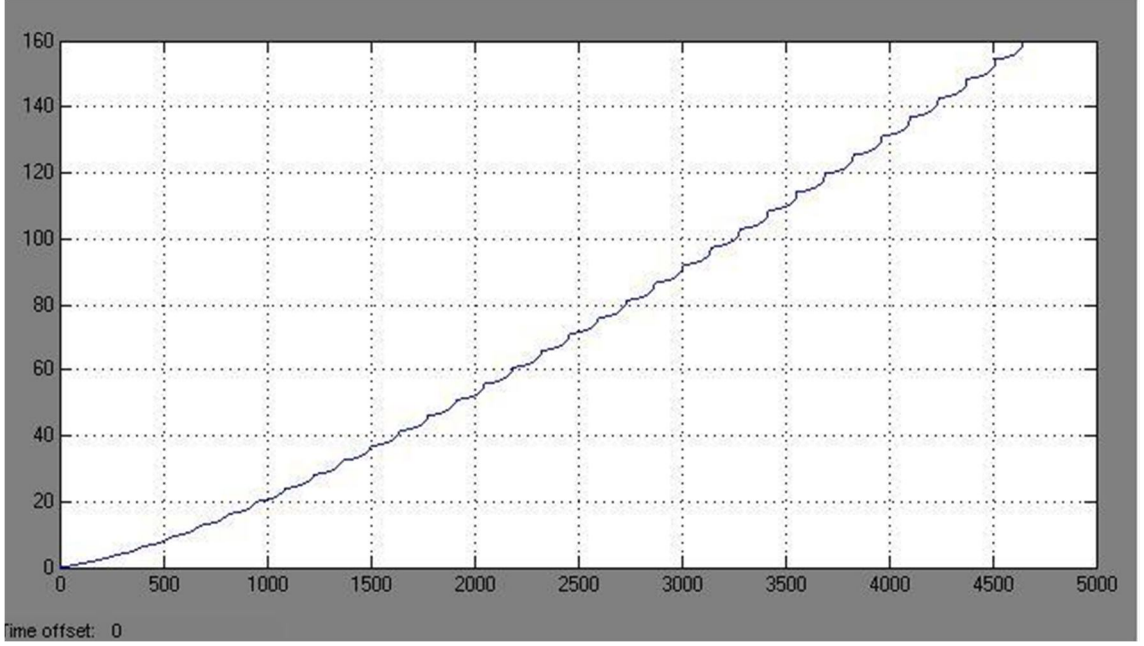
Şekil 4.64. $n=1.2$ için pompanın 30 cm³/devir sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



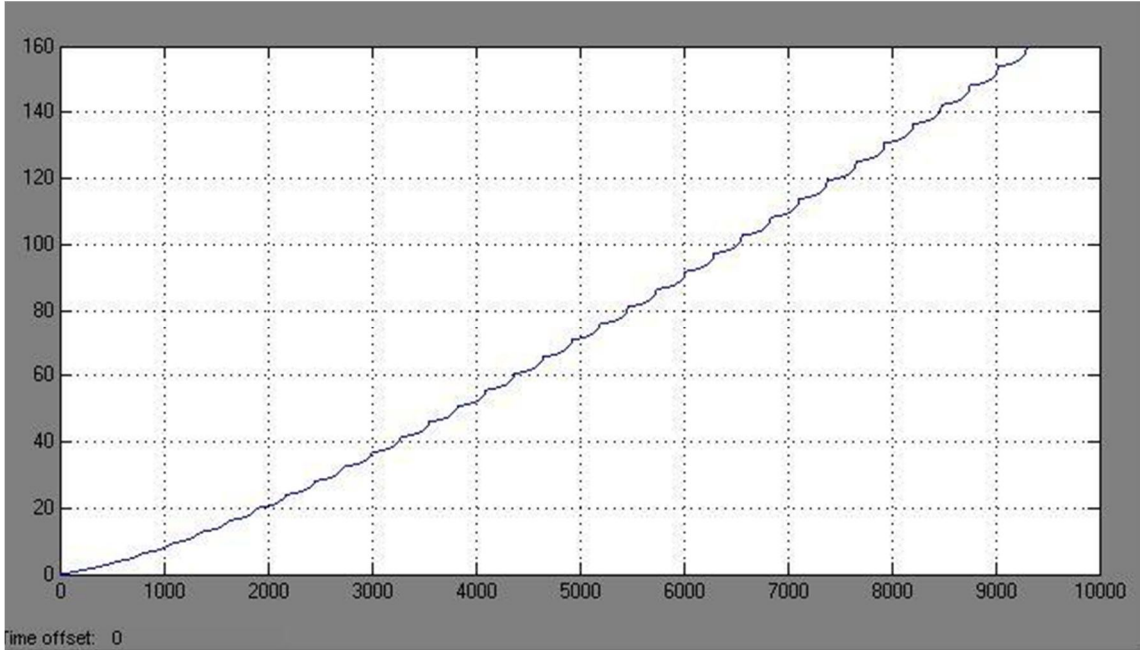
Şekil 4.65. $n=1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



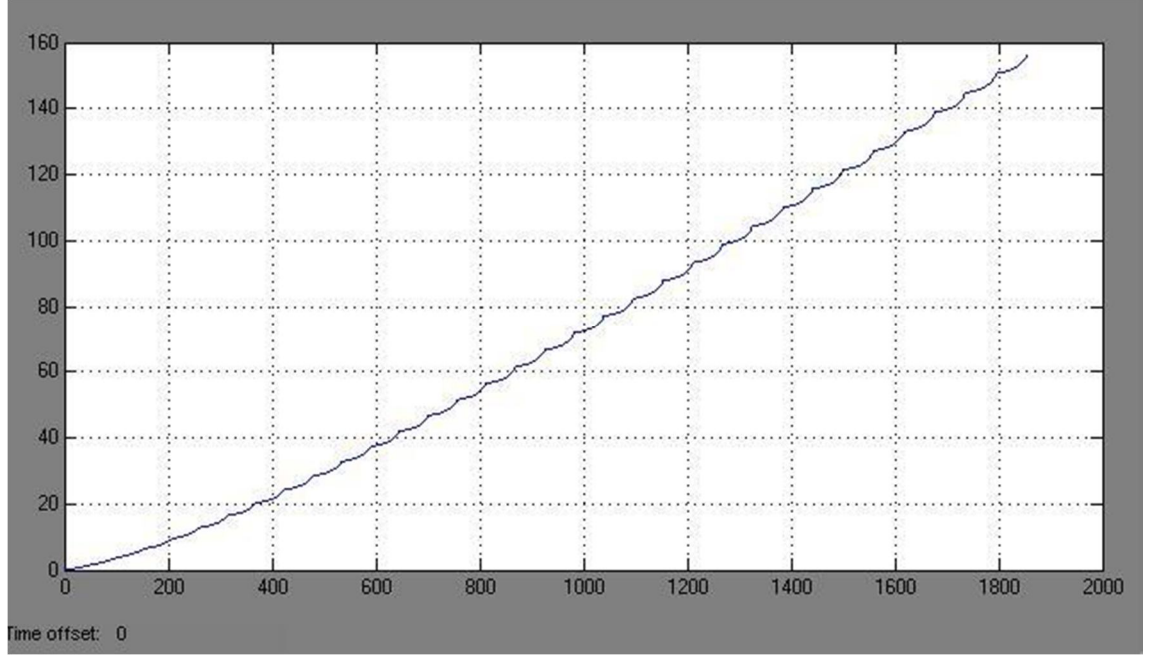
Şekil 4.66. $n=1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji



Şekil 4.67. $n=1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

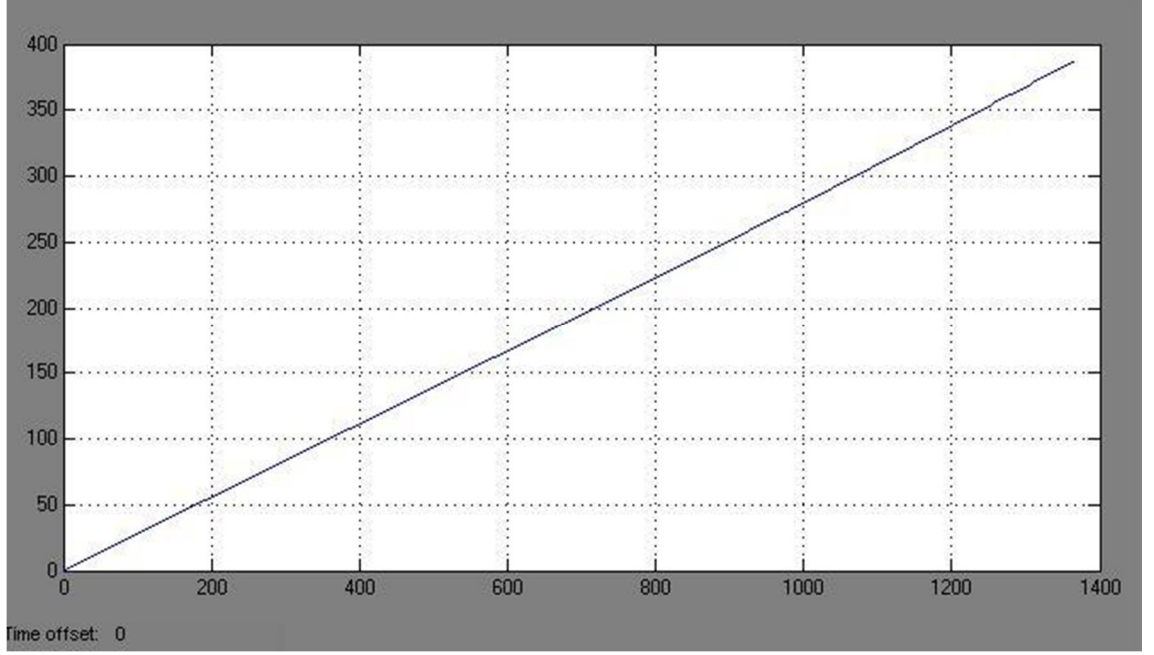


Şekil 4.68. $n=1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

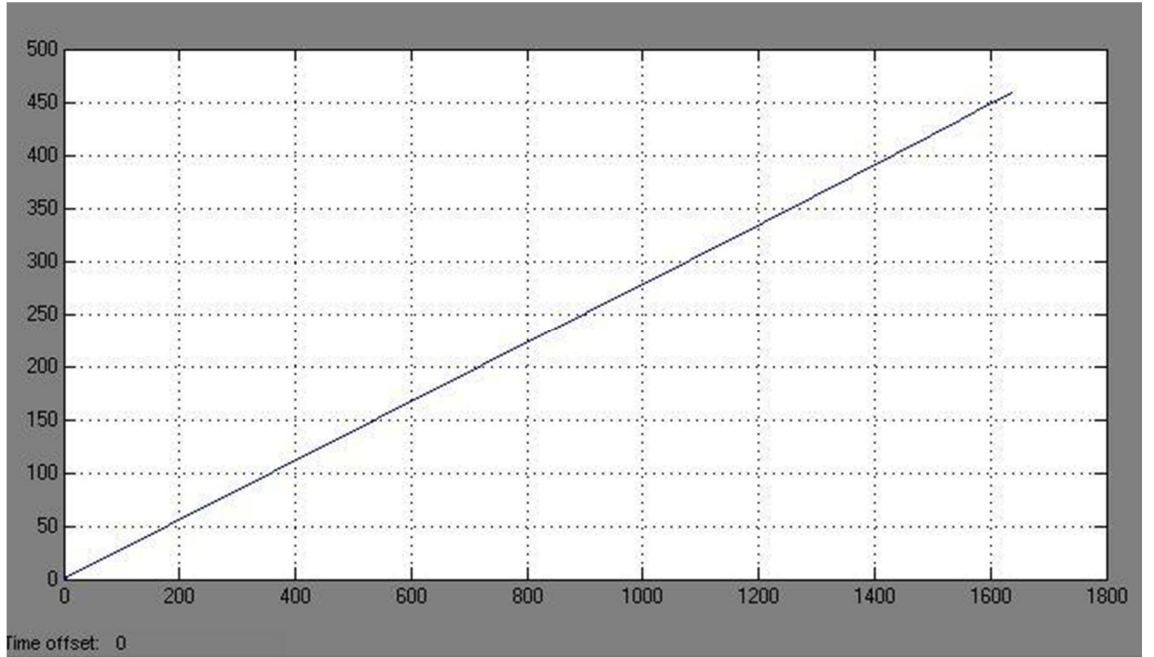


Şekil 4.69. $n=1.2$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği enerji

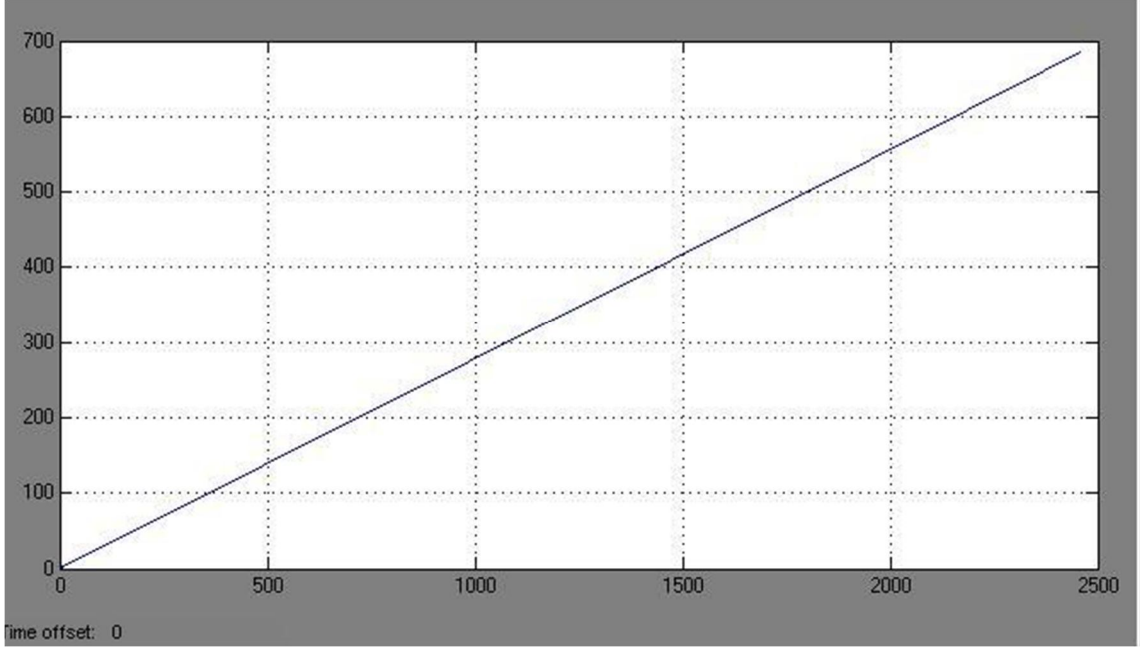
Şekil 4.70' den Şekil 4.75' e kadar sistemin toplam tükettiği enerji gösterilmiştir. Geometrik debi düşürüldükçe sistemin 30 bar basınçta hava depolaması için geçen süre artmaktadır. Geçen sürenin artması da tüketilen enerjinin artmasına neden olmaktadır.



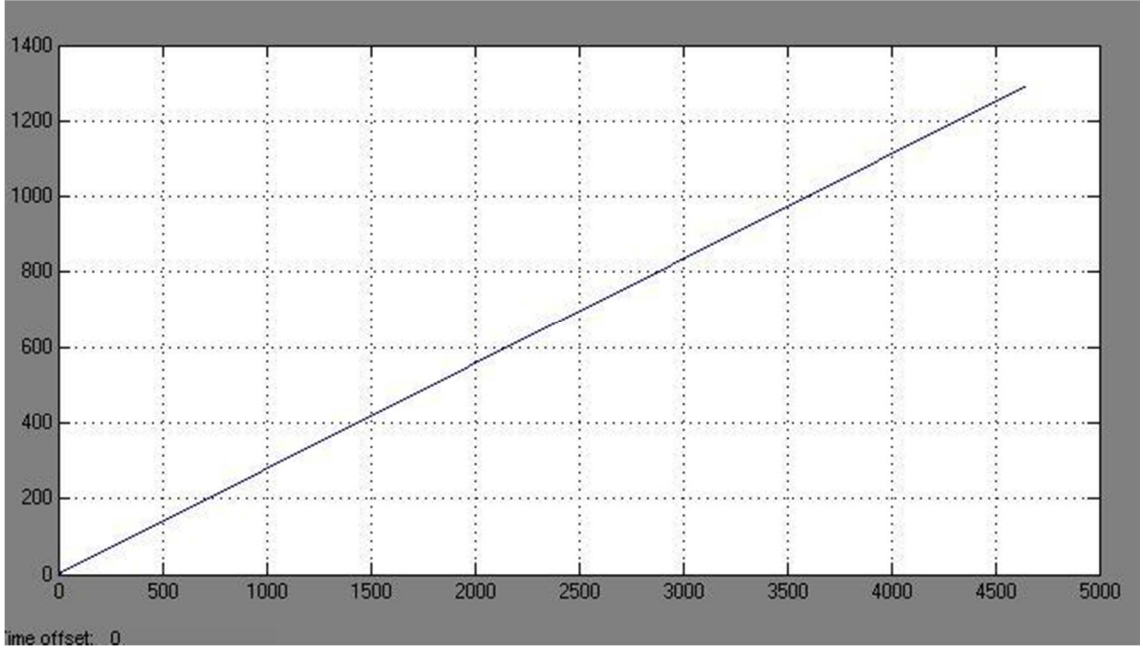
Şekil 4.70. $n=1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



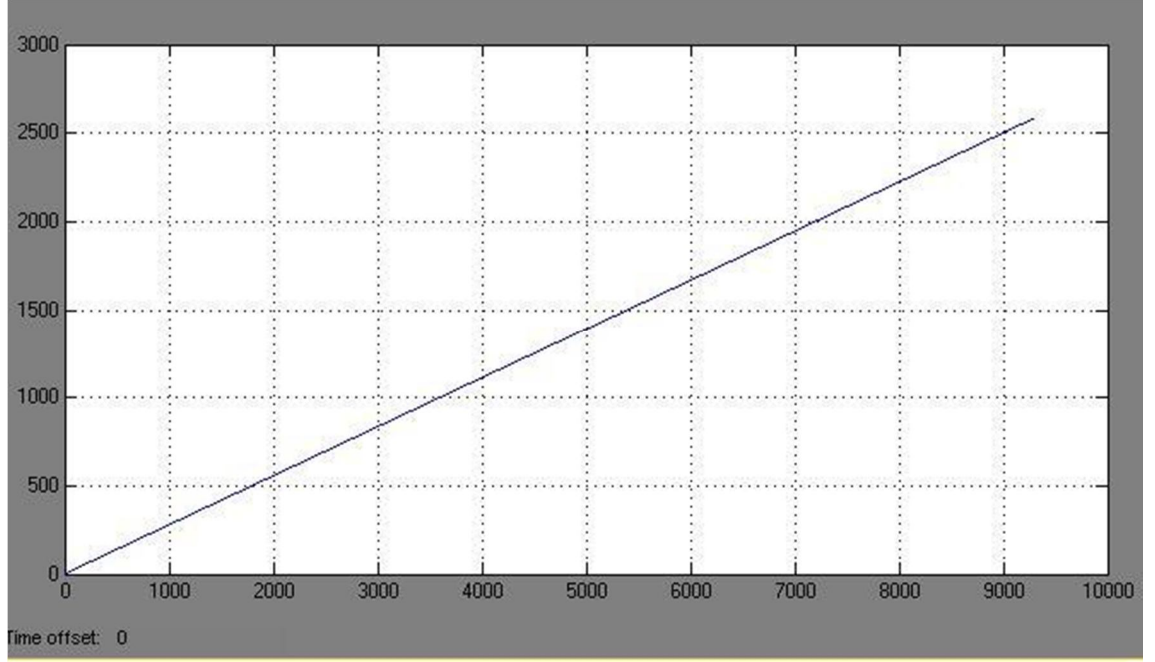
Şekil 4.71. $n=1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



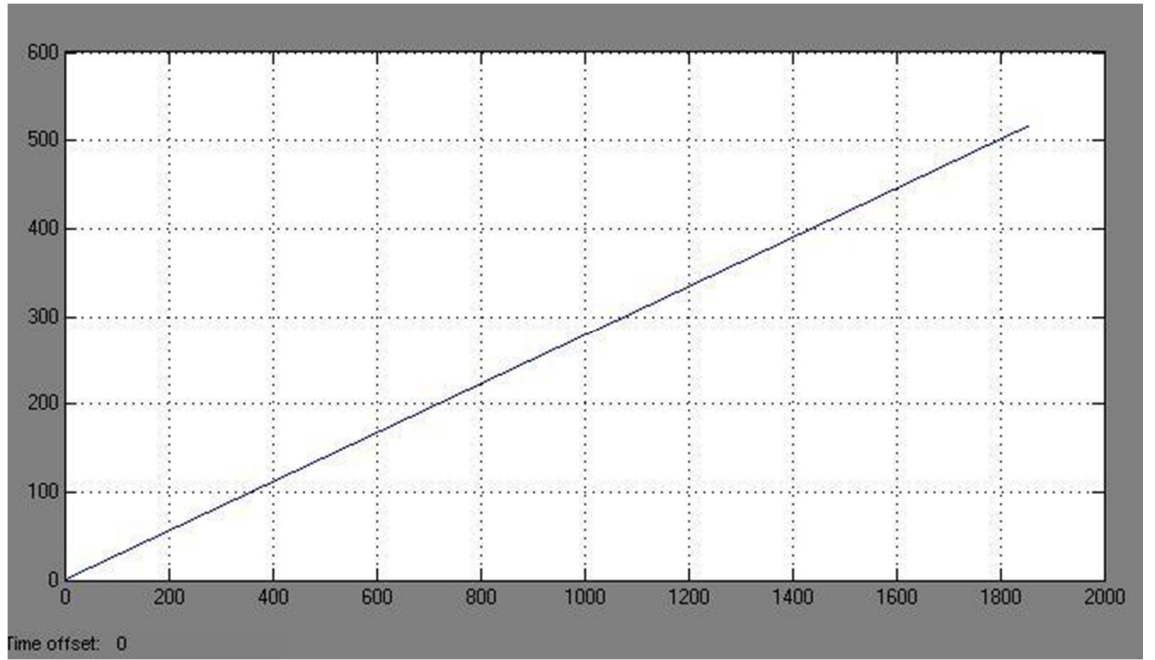
Şekil 4.72. $n=1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



Şekil 4.73. $n=1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



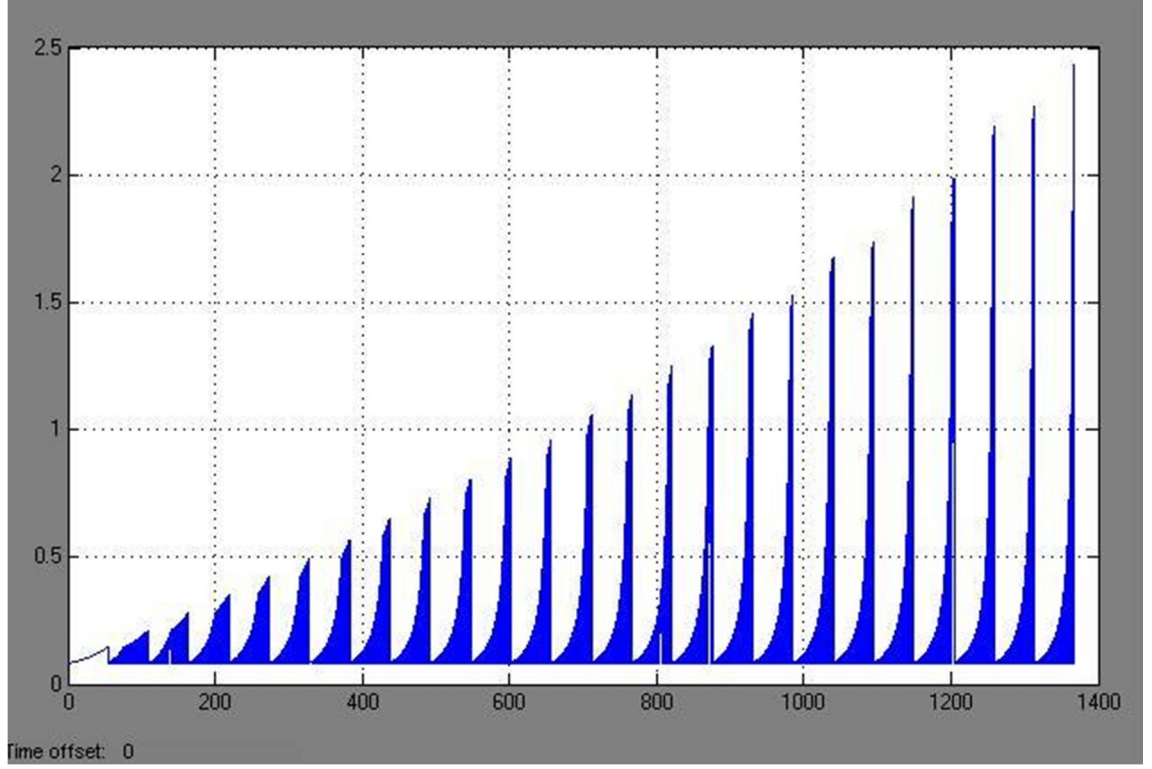
Şekil 4.74. $n=1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji



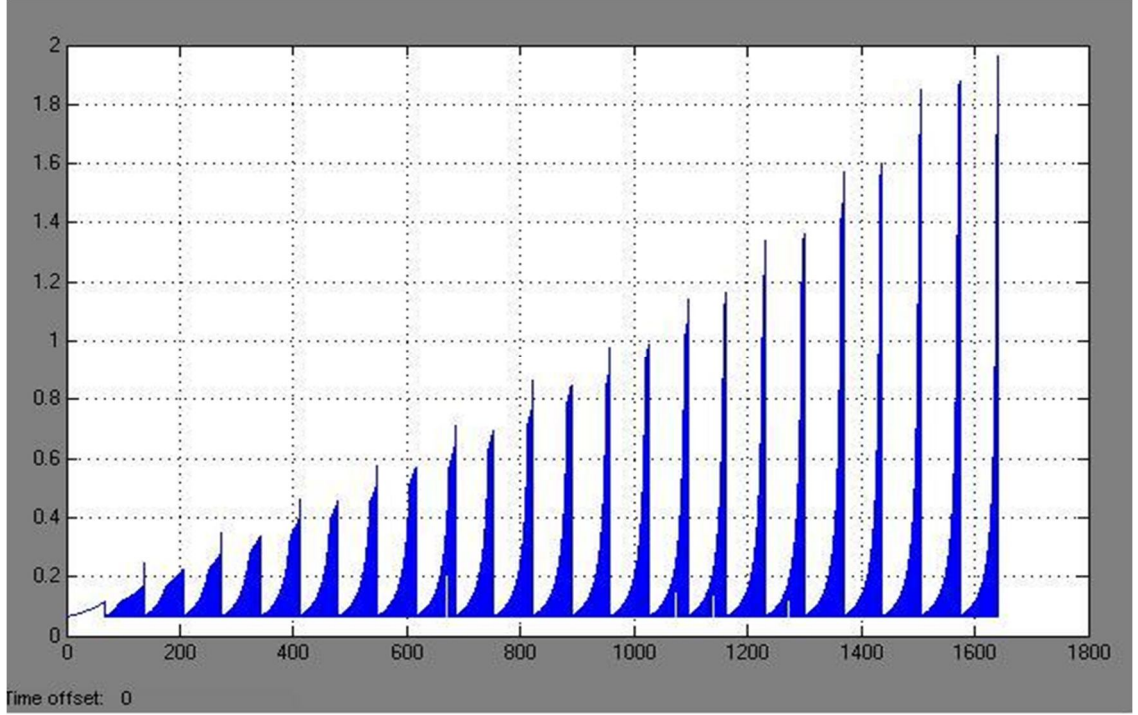
Şekil 4.75. $n=1.2$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistemin tükettiği gerçek enerji

Elektrik motorunun çıktığı güç farklı geometrik debiler için Şekil 4.76' dan Şekil 4.81'e kadar gösterilmiştir. Dikey eksen gücü kiloWatt (kW) cinsinden vermektedir. Büyük

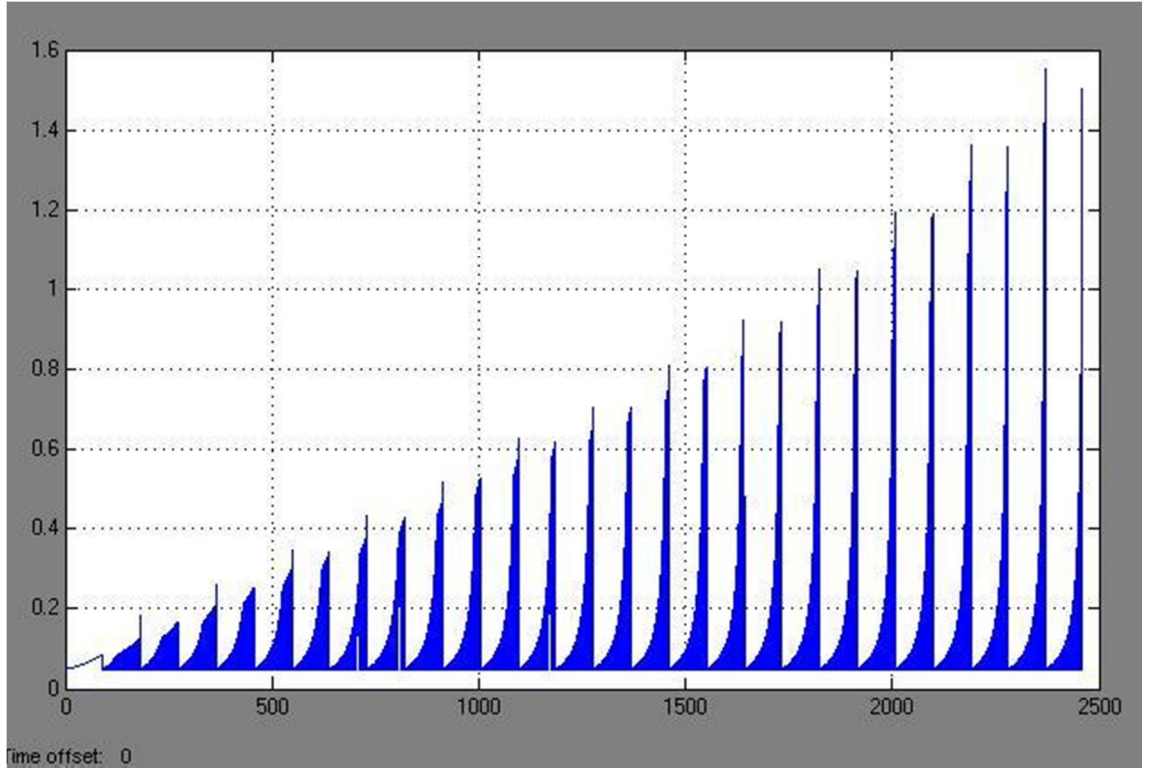
geometrik debilerde 2,5 kW' a kadar çıkan güç, küçük geometrik debilerde 1 kW'ı geçmemektedir.



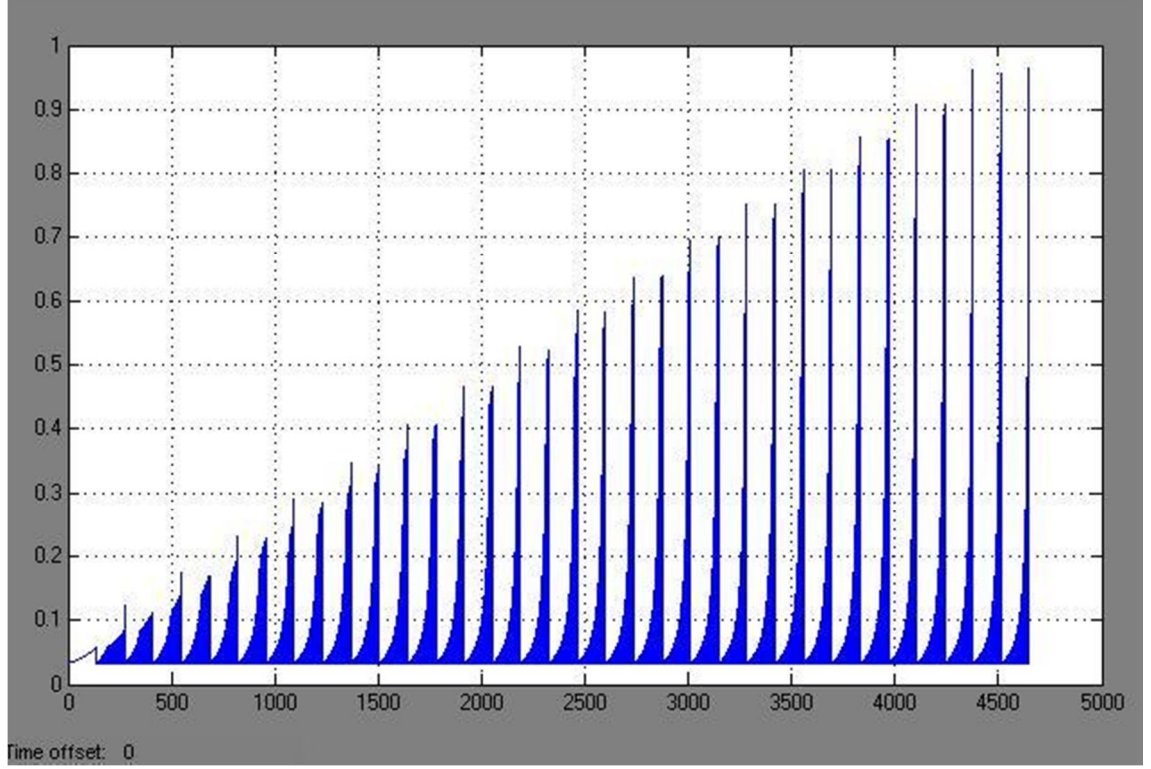
Şekil 4.76. $n=1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



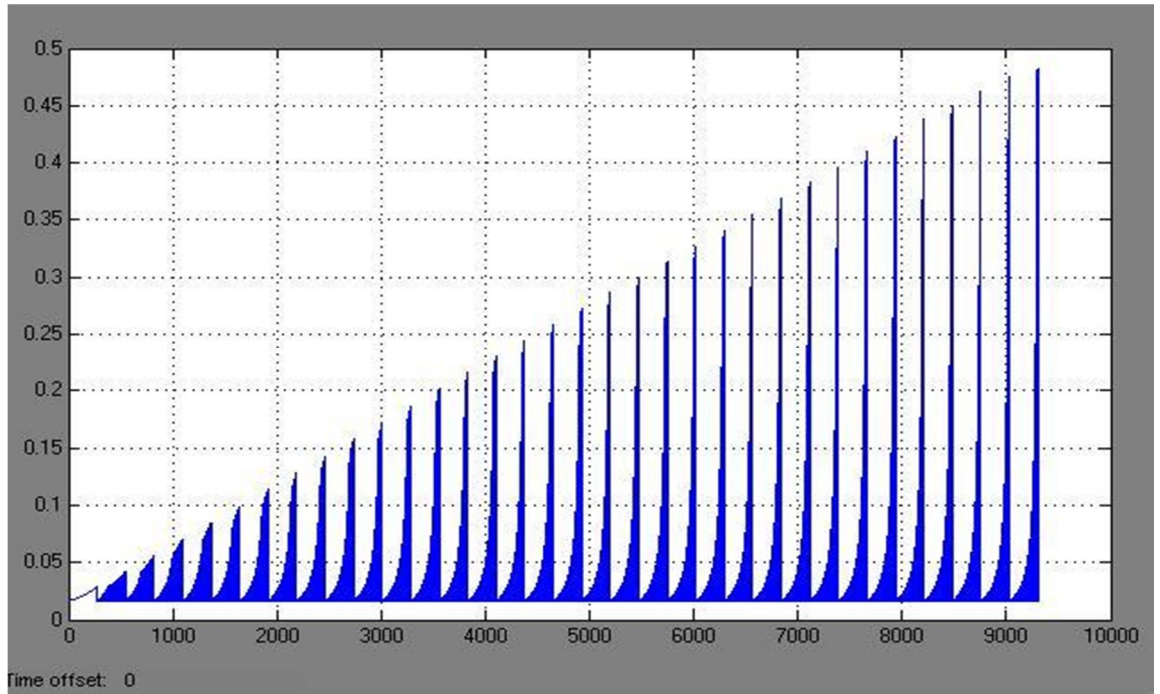
Şekil 4.77. $n=1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



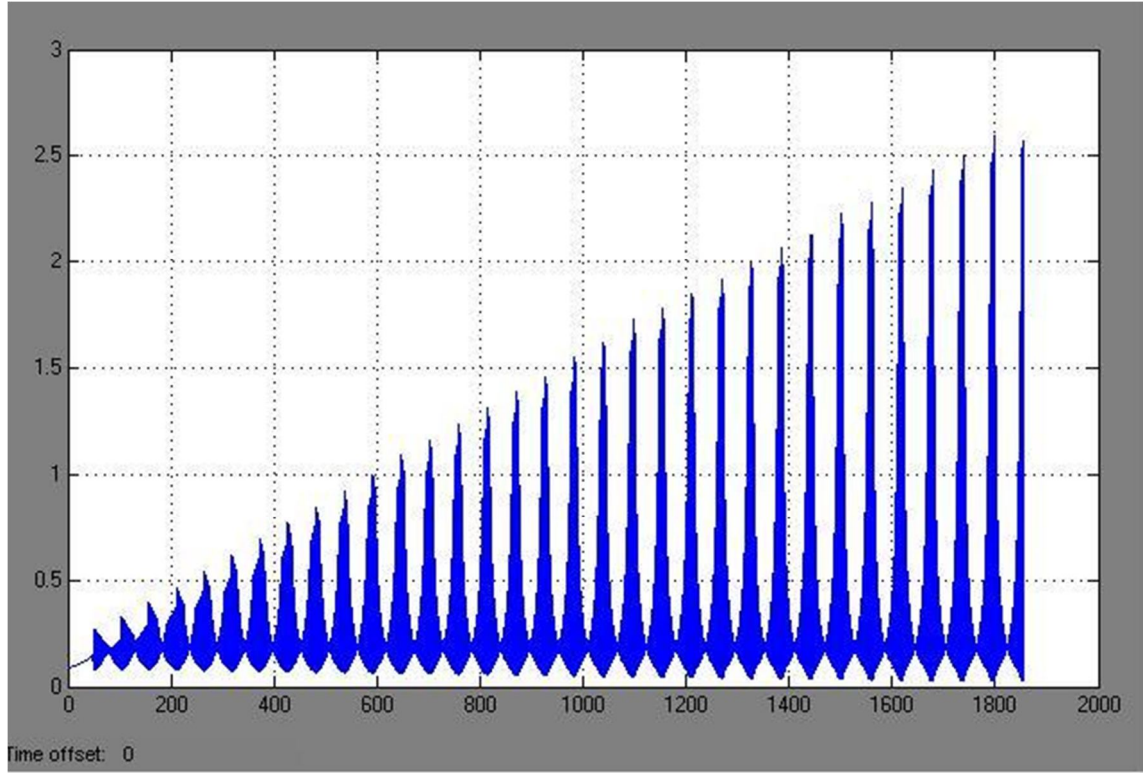
Şekil 4.78. $n=1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü



Şekil 4.79. $n=1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

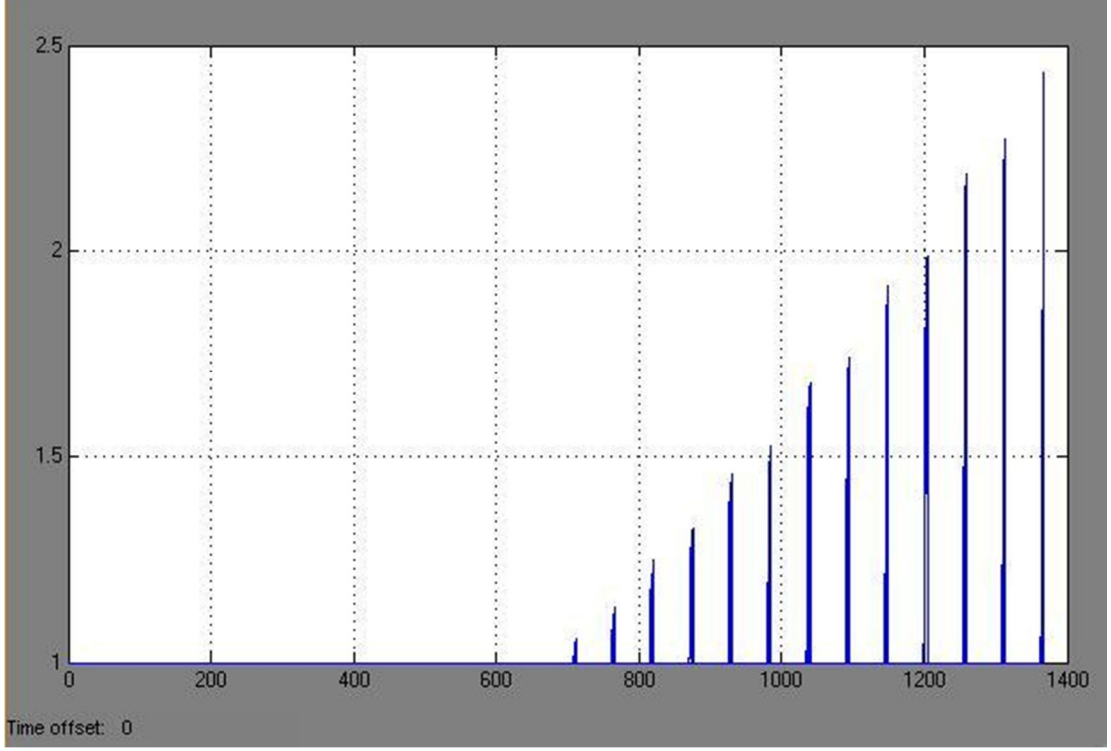


Şekil 4.80. $n=1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

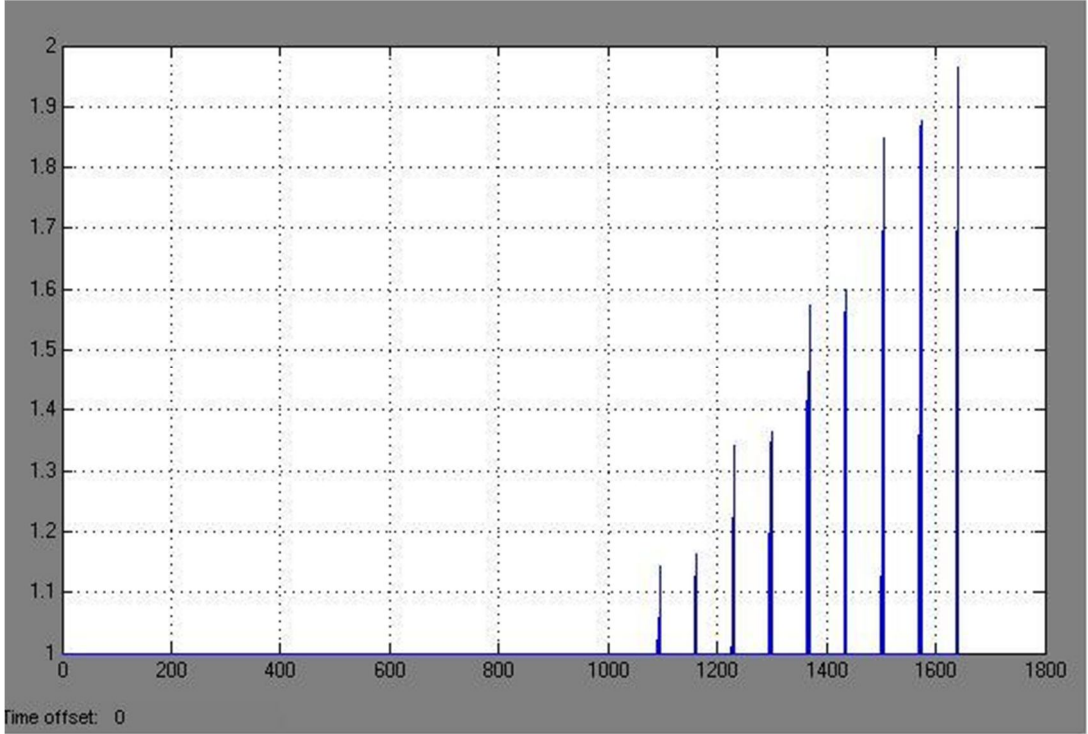


Şekil 4.81. $n=1.2$ için değişken geometrik debi ile çalışması durumunda elektrik motorunun gücü

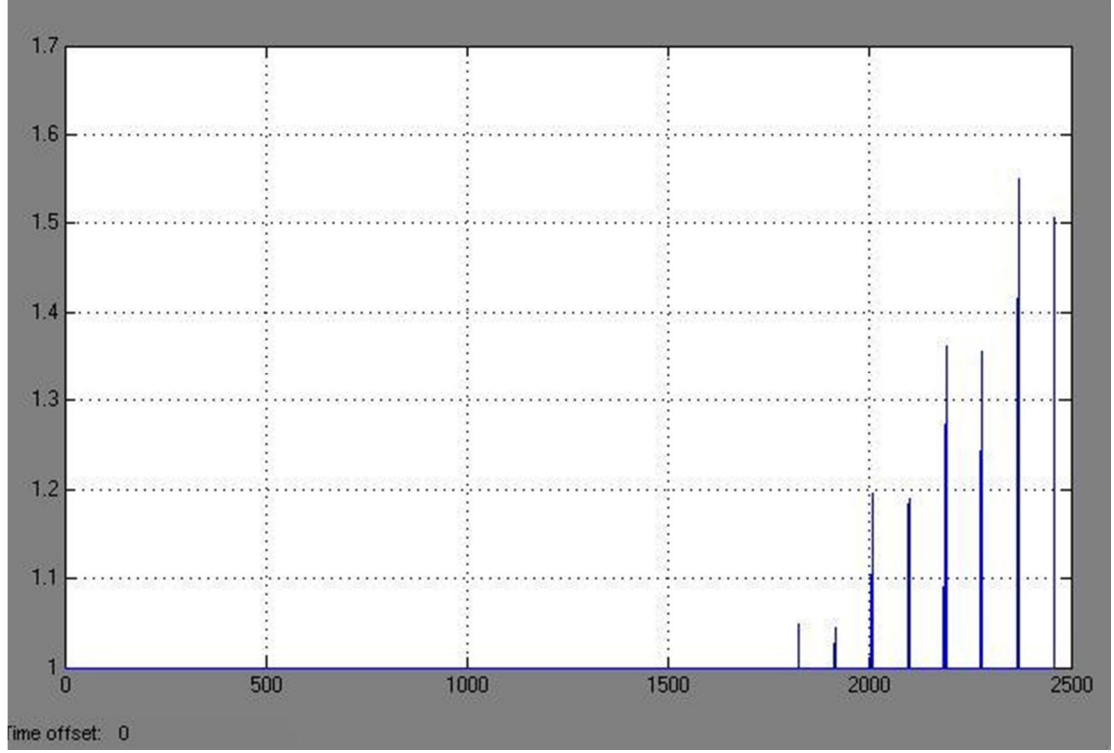
Elektrik motorunun boşa dahi 1 kW güç çektiği kabulüne göre 1 kW gücün üstünü sistemin işlemini sürdürmek için çekmektedir. Küçük geometrik debilerde (12 ve 6 cm^3/devir gibi) elektrik motoru boşa çalıştığından daha az güce ihtiyaç duymaktadır. Şekil 4.82' den Şekil 4.87' ye kadar bu durum gösterilmiştir.



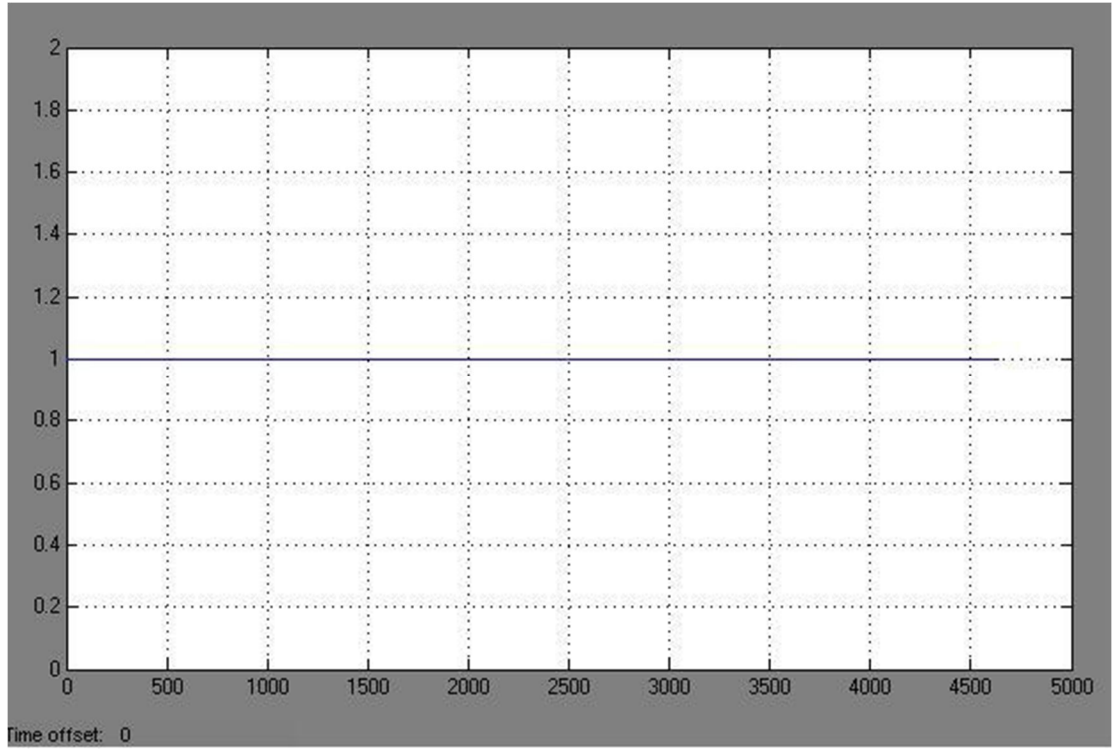
Şekil 4.82. $n=1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



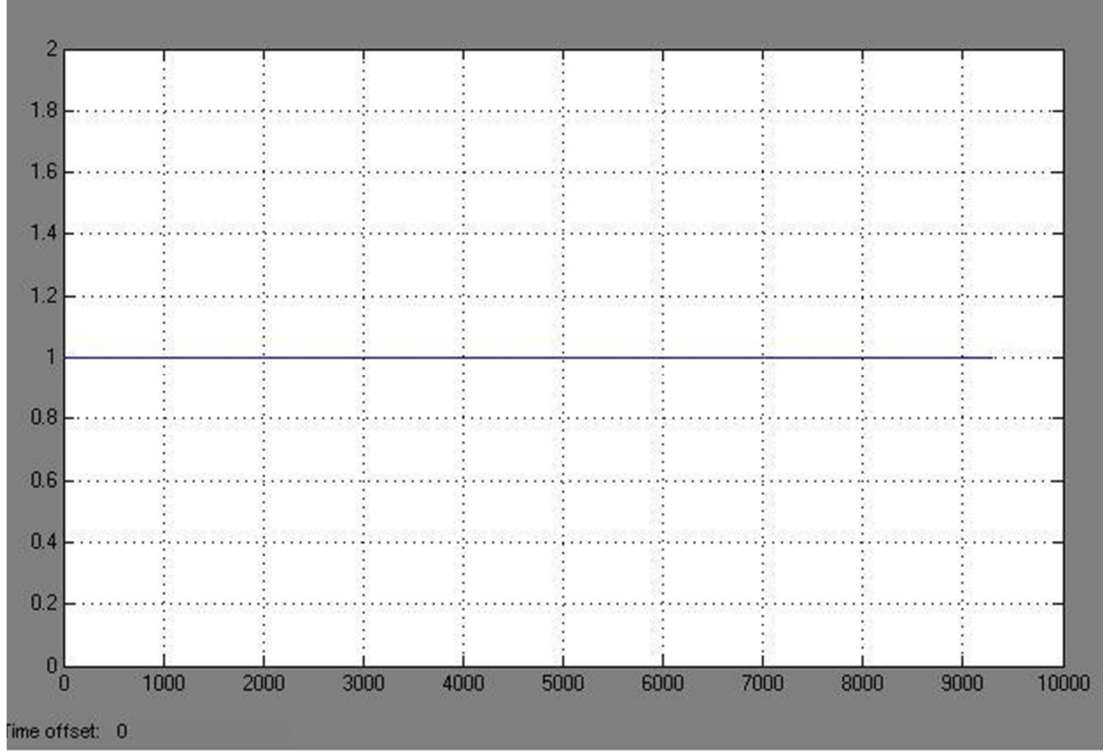
Şekil 4.83. $n=1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



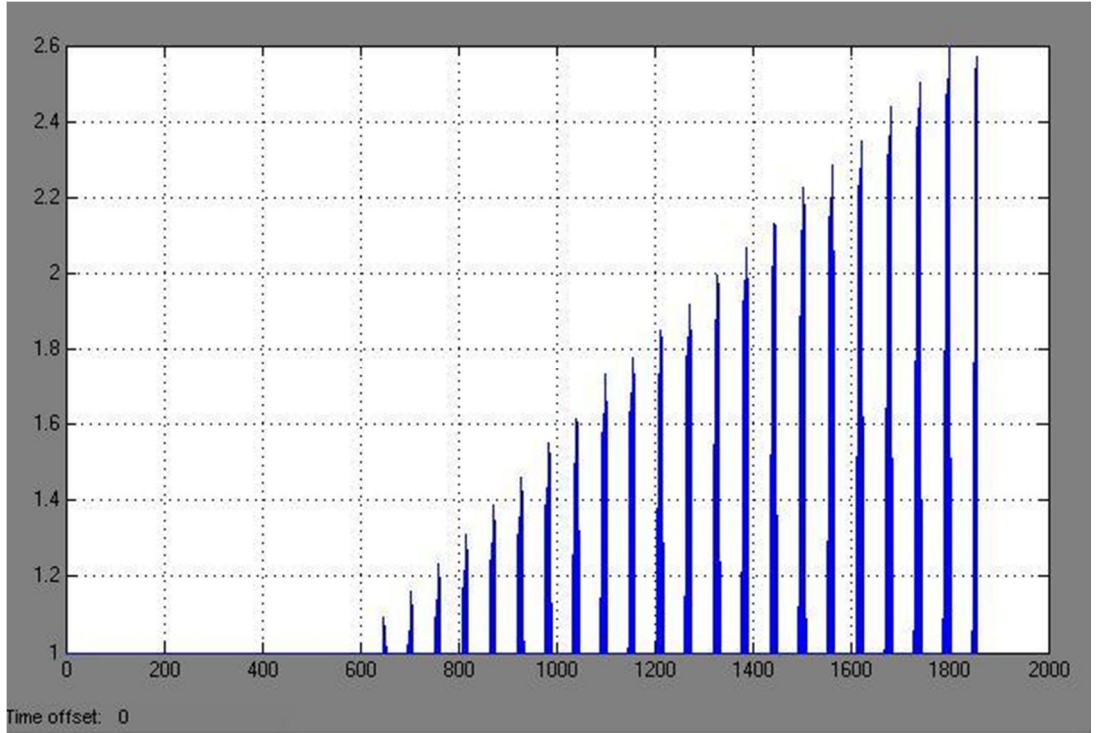
Şekil 4.84. $n=1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü



Şekil 4.85. $n=1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

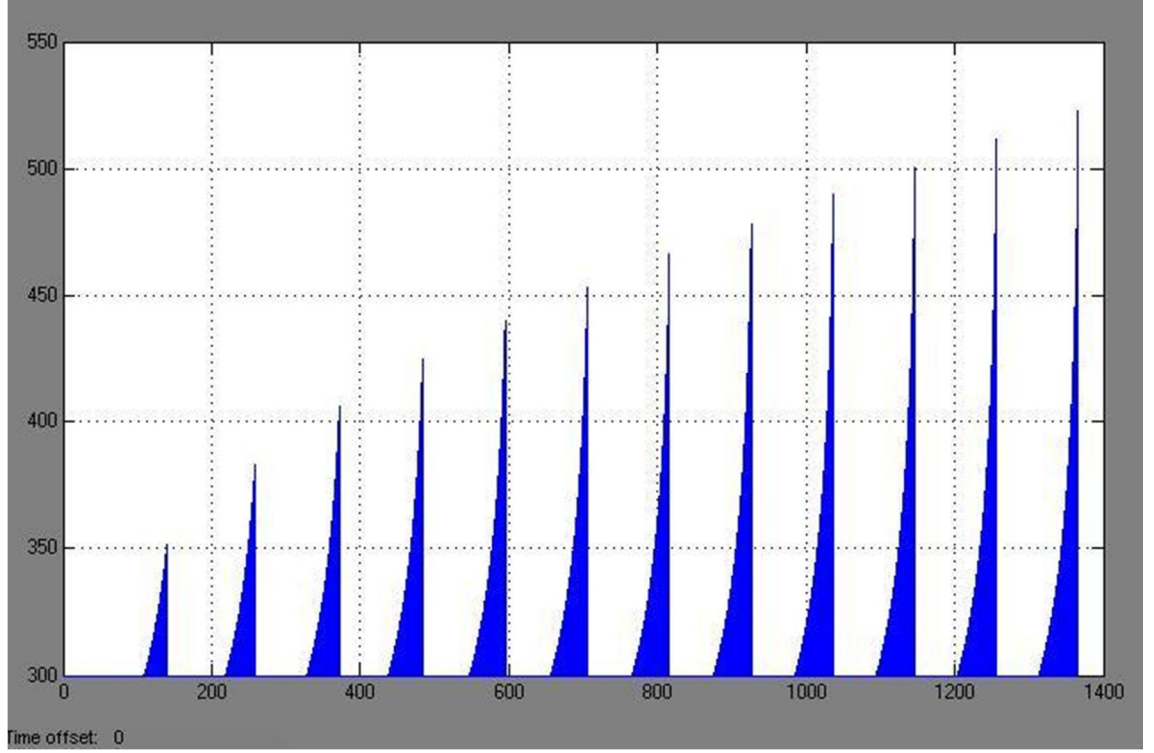


Şekil 4.86. $n=1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

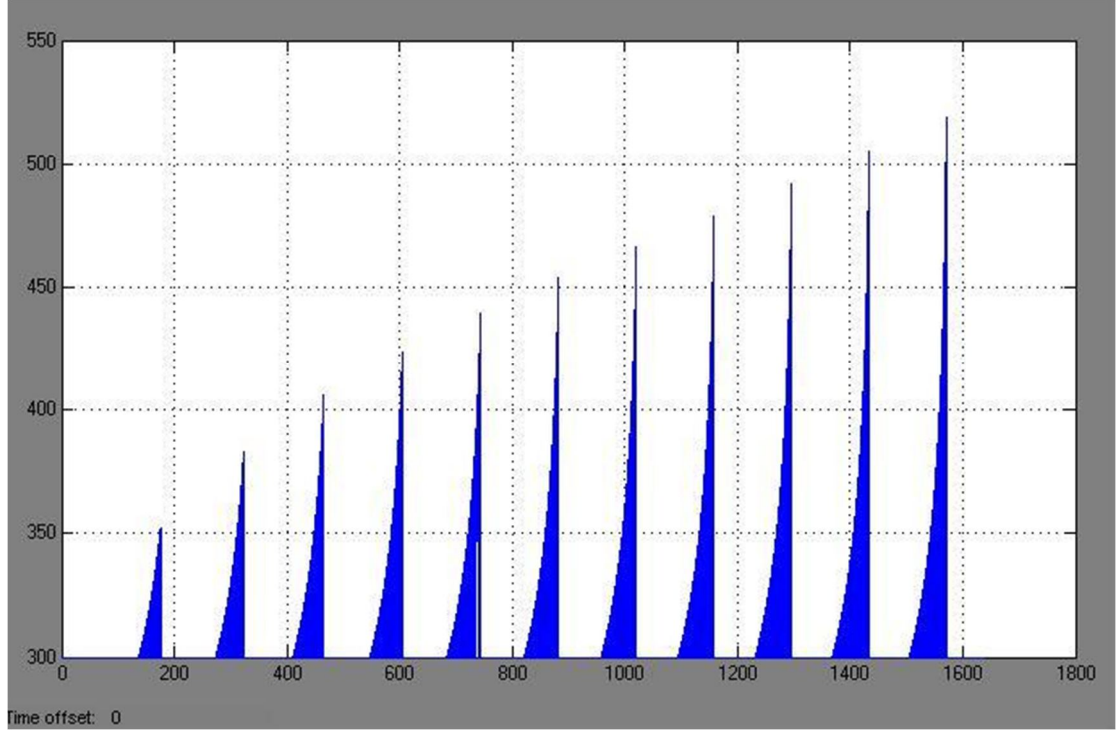


Şekil 4.87. $n=1.2$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda sistem için kullanılan elektrik motorunun gücü

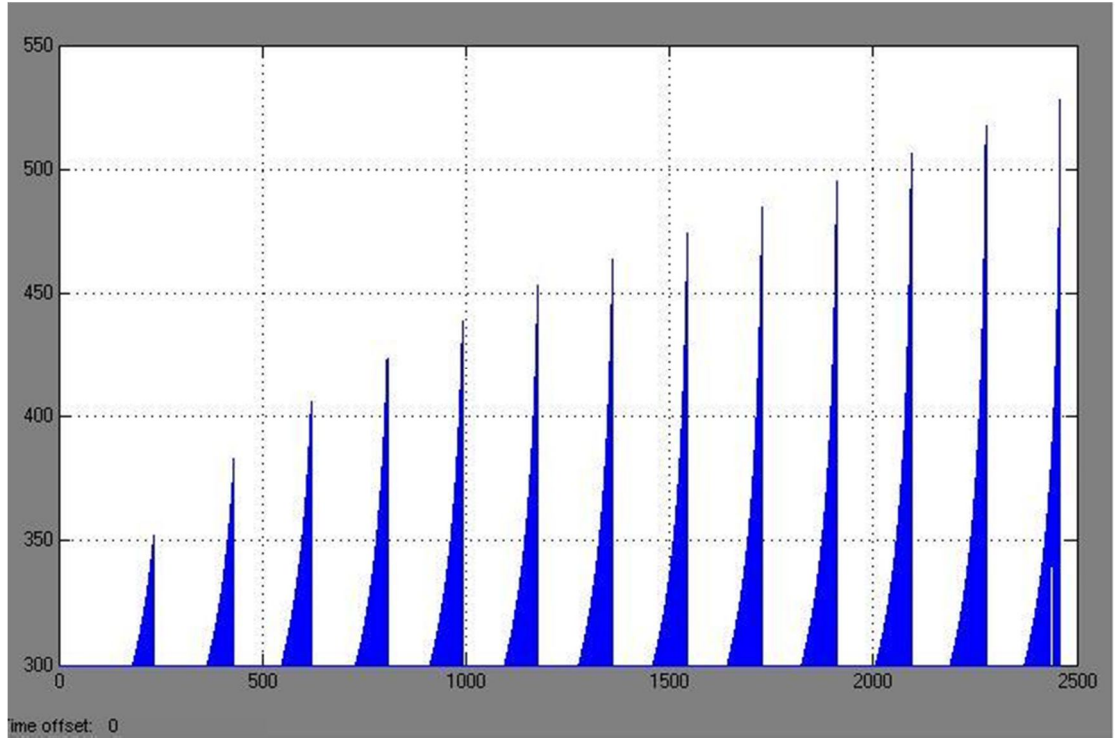
Politropik sıkıştırma katsayısı 1' den uzaklaştığı için kullanılan formüle göre (11) sıkıştırma silindiri içindeki sıcaklık çok yükselmiştir. Sıkıştırma silindiri içindeki sıcaklık farklı geometrik debiler için Şekil 4.88' den Şekil 4.92'ye kadar gösterilmiştir. Dikey eksen Kelvin cinsinden sıcaklığı vermektedir.



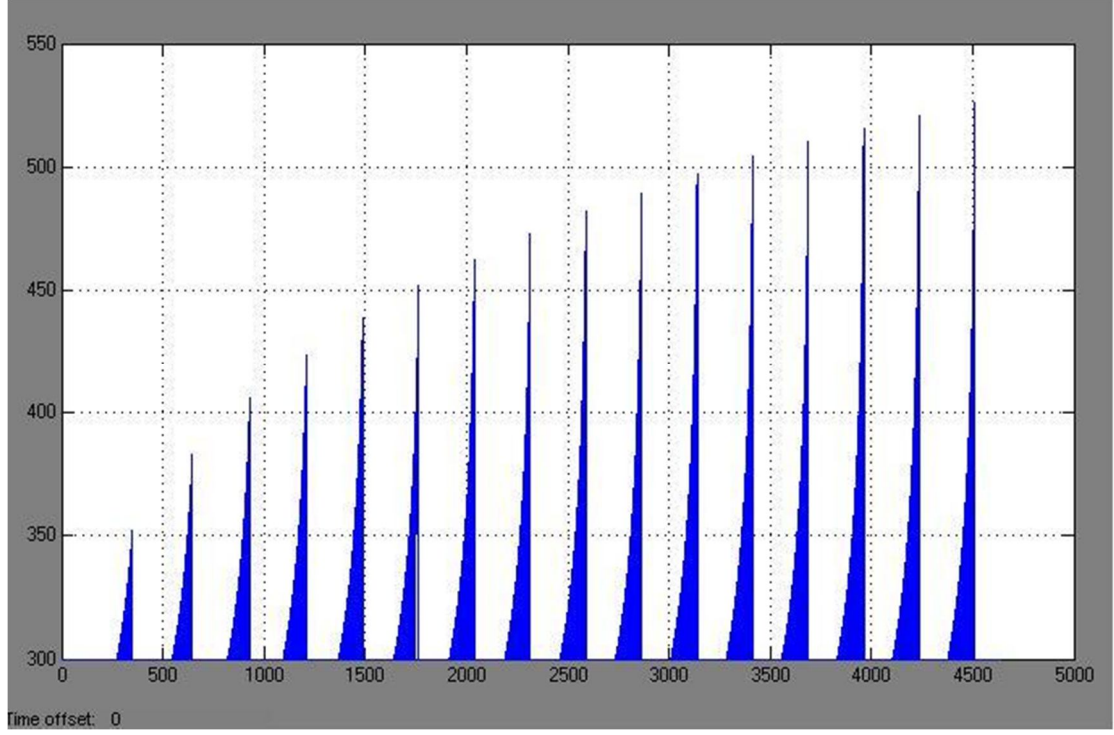
Şekil 4.88. $n=1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlerindeki sıcaklık



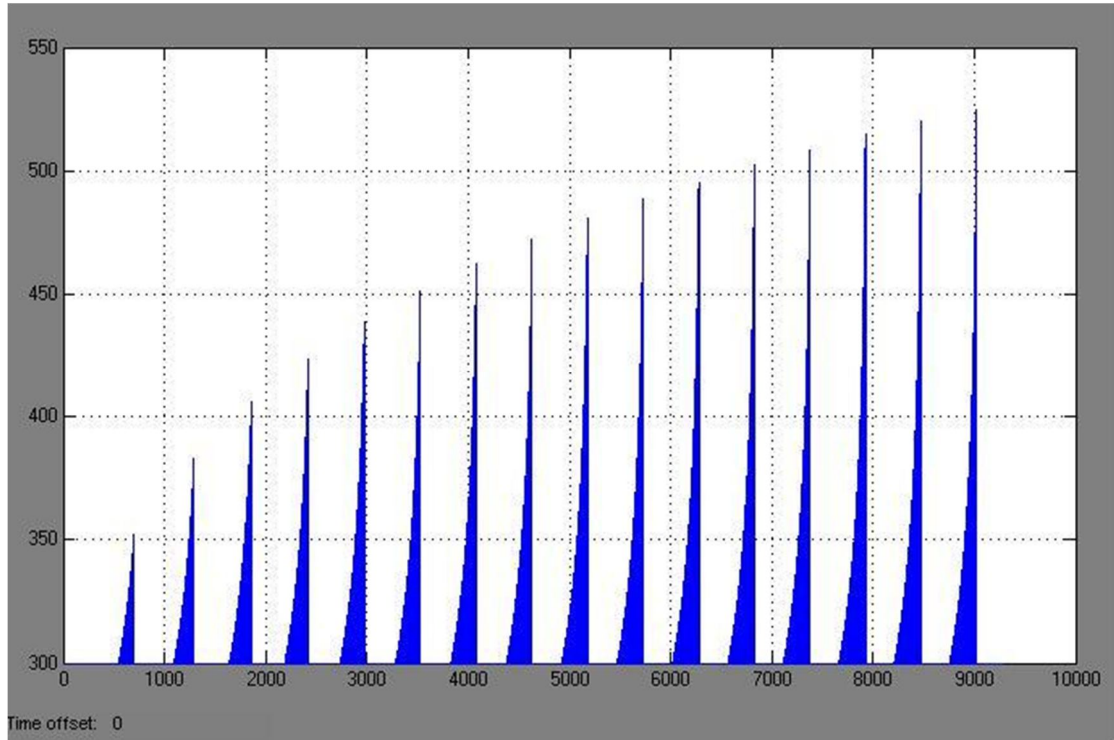
Şekil 4.89. $n=1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlindeki sıcaklık



Şekil 4.90. $n=1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlindeki sıcaklık

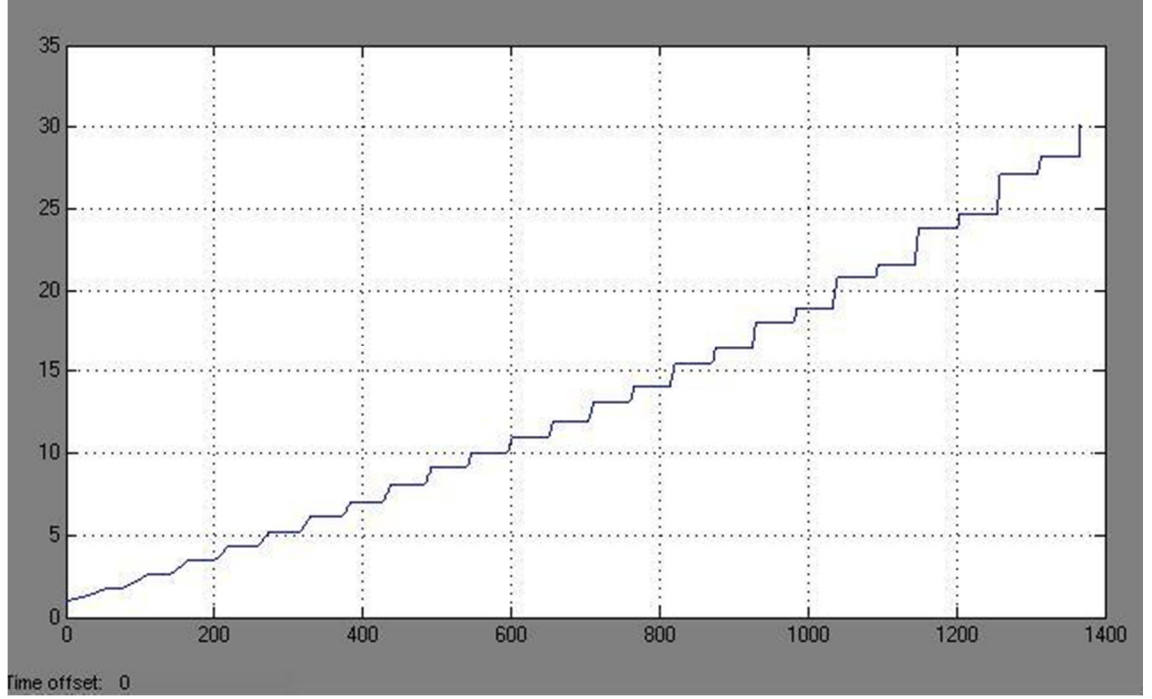


Şekil 4.91. $n=1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlindeki sıcaklık

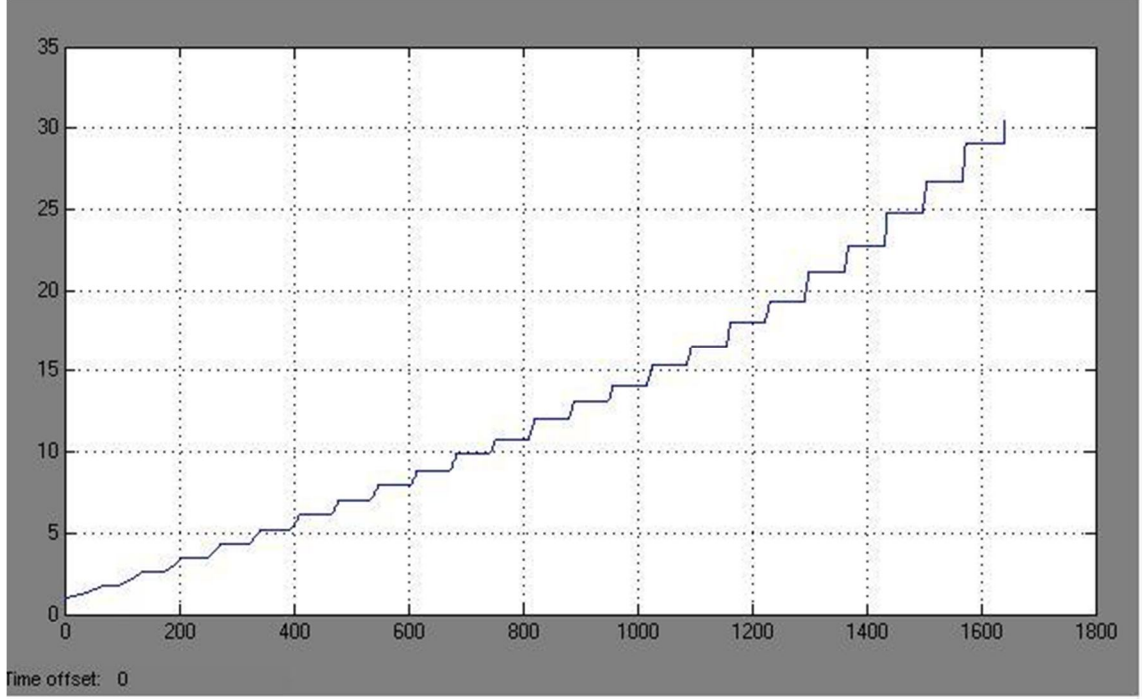


Şekil 4.92. $n=1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda sıkıştırma silindirlindeki sıcaklık

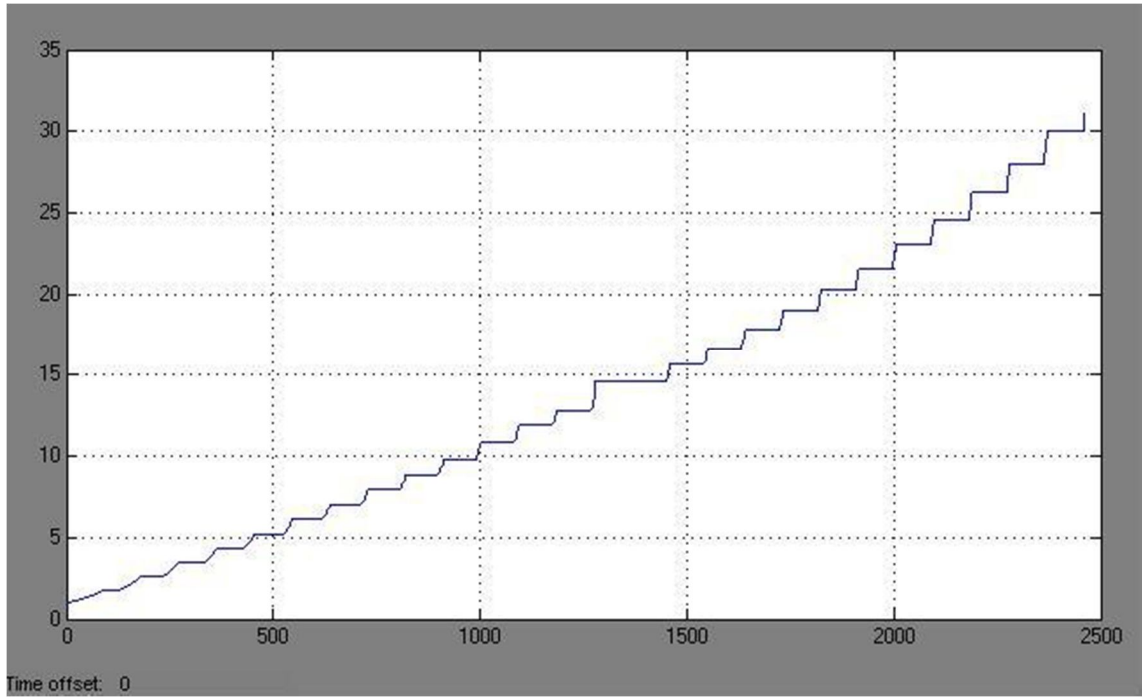
Şekil 4.93'den Şekil 4.98' e kadar farklı geometrik debiler için depolama tankında depolanan havanın basınç artışı gösterilmiştir. Dikey eksen basıncı bar cinsinden göstermektedir.



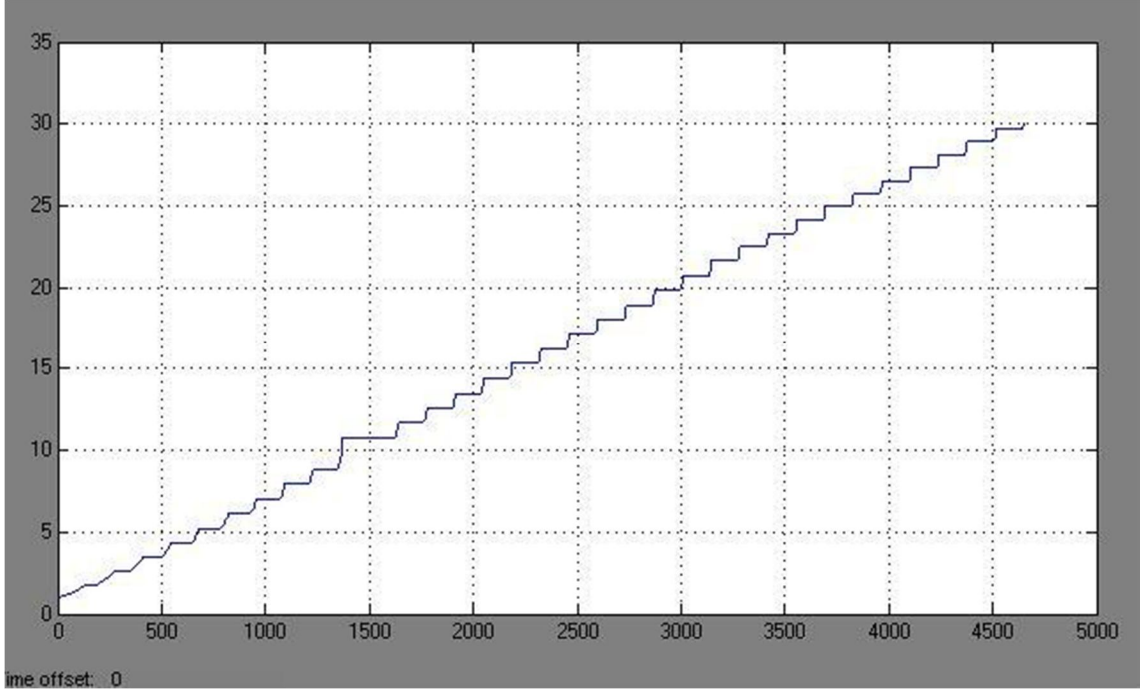
Şekil 4.93. $n=1.2$ için pompanın $30 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



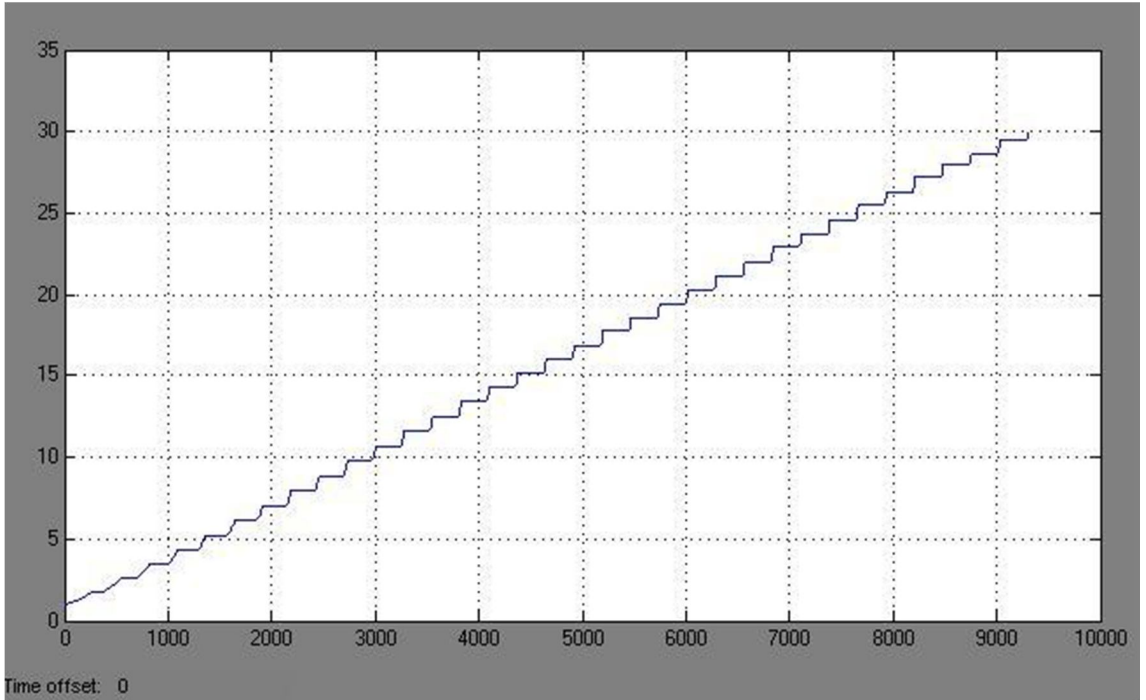
Şekil 4.94. $n=1.2$ için pompanın $24 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



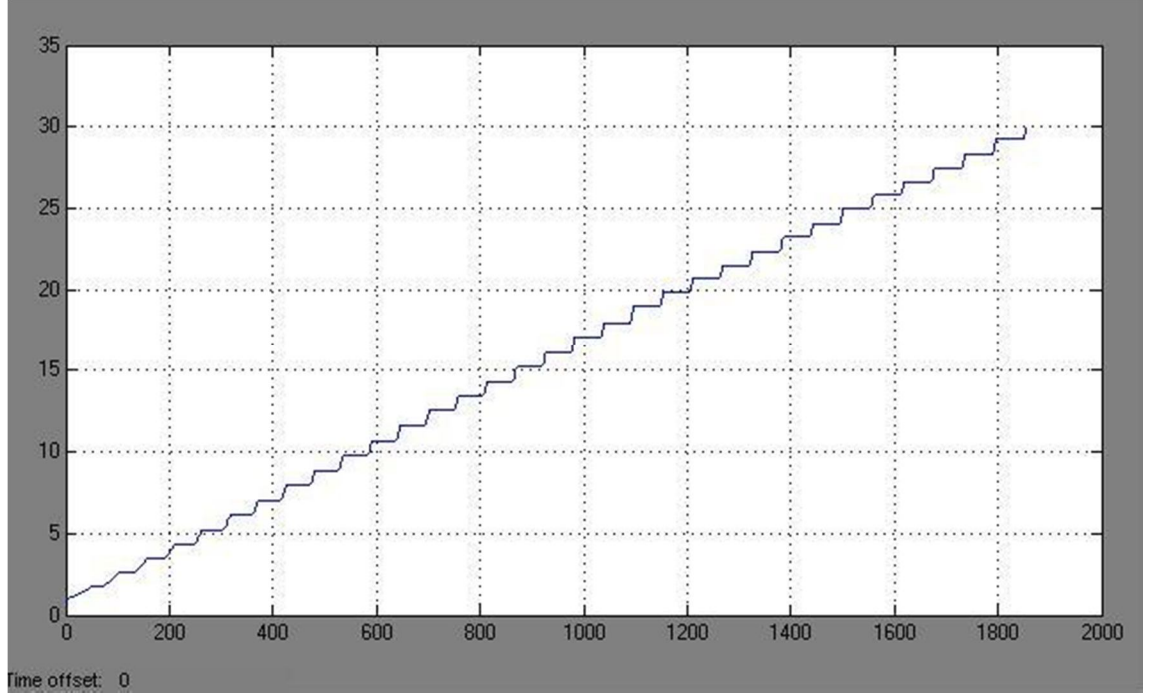
Şekil 4.95. $n=1.2$ için pompanın $18 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



Şekil 4.96. $n=1.2$ için pompanın $12 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



Şekil 4.97. $n=1.2$ için pompanın $6 \text{ cm}^3/\text{devir}$ sabit geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı



Şekil 4.98. $n=1.2$ için pompanın değişken geometrik debi ile çalışması durumunda depolanan havanın basınç artışı

5. SONUÇ

Oluşturulan Simulink modelinde, sistemde kullanılan teorik formüllerin politropik sıkıştırma katsayısının ne seçileceği konusunda fikir verdiği gözükmektedir. Politropik sıkıştırma katsayısının 1' e yakın seçildiğinde (izotermal duruma yakın) sistemin, hava depolamaya, sıkıştırma silindirlilerindeki sıcaklık artışına ve enerji tüketimine dengeli davrandığı görülmektedir. Bu da oluşturulan sisteme uygun kurulabilecek deney düzeneğinin olabildiğince sabit sıcaklık şartlarında kurulması fikrini vermektedir.

Modellenen sıvı pistonlu kompresörde sabit geometrik debiler arasında kıyaslama yapılacak olursa pompa geometrik debisinin büyük olması, havayı hızlı bir şekilde sıkıştırmayı sağlamaktadır. Hızlı bir işlem de kullanılan enerjinin daha az olmasını sağlamaktadır. Ama pompa geometrik debisi büyüdükçe sistemin ihtiyaç duyduğu enerjinin kısa sürede sağlanması için elektrik motorunun yüksek güçte çalışması gerekmektedir. Bu durum işlem için olumlu gözükse de kullanılacak elektrik motorunun zorlanmasına neden olacaktır. Pompa geometrik debisinin küçük olması ise sıkıştırma işleminin süresini uzatacak bu da sistemin yavaş olmasına ve kullanılan enerjinin artmasına neden olacaktır. İşlemin yavaş olmasına rağmen pompa geometrik debisinin küçük olması büyüğe kıyasla daha dengeli sonuçlar vermiştir. Pompa geometrik debisinin küçük olmasının ise oluşturulacak gerçek bir sistemde sistem içi sürtünmelerinden dolayı oluşacak atalet kuvvetlerini yenememe ihtimali vardır.

Sistemin en uygun şartlarda çalışması için ihtiyaca göre debiyi ayarlayan değişken geometrik debili bir pompayla çalışmakta sabit geometrik debili pompa ile çalışmak yerine tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR

Anonim, 2012. Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2012-2021). Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, 2012, Ankara.

Baker J. 2008. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy* 36, 4368–4373.

Cavallo A. 2007. Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES). *Energy* 32(2),120–7.

Cyphelly, I., Rufer, A., Brückmann, Ph. Menhardt, W., Reller A. 2004. Usage of compressed air storage systems; Swiss Federal Office of Energy, DIS Project Nr. 100406, Publ. Nr: 240050.

Denholm P, Kulcinski GL. 2004. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems. *Conversion and Management* 45(13–14), 2153–72.

Denholm P. 2006. Improving the technical, environmental and social performance of wind energy systems using biomass-based energy storage. *Renew Energy* 31(9),1355–70.

Glendenning I. 1976. Long-term prospects for compressed air storage. *Appl Energy* 2(1), 39–56.

Grazzini G., Milazzo A. 2008. Thermodynamic analysis of CAES/TES systems for renewable energy plants. *Renewable Energy* 33, 1998–2006.

Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. ve Efthimiou, V., 2009. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7):1513–1522.

Ibraim, H., Ilinca, A., Perron, J. 2008. Energy storage systems–Characteristics and comparisons, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1221–1250.

Lemofouet, S., Rufer, A. 2006. Hybrid Energy Storage Systems based on Compressed Air and Supercapacitors with Maximum Efficiency Point Tracking, *IEEE* 4, 1105 – 1115.

Lund H, Salgi G, Elmegaard B, Andersen AN. 2009. Optimal operation strategies of compressed air energy storage (CAES) on electricity spot markets with fluctuating prices. *Appl Therm Eng* 29(59), 799–806.

Lund, H., Salgi, G. 2009. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems, *Energy Conversion and Management* 50, 1172–1179.

Mazhari E., Zhao J., Celik N., Lee S., Son Y.J., Head L. 2011. Hybrid simulation and optimization-based design and operation of integrated photovoltaic generation, storage units, and grid. *Simulation Modelling Practice and Theory* 19, 463–481.

Milazzo,A. 2008. Optimization of the configuration in a CAES-TES system. In: *Shape and Thermodynamics, International Workshop Florence 2008, 25-26 September 2008, Florence.*

Salgi, G, Lund, H. 2008. System behaviour of compressed-air energy-storage in Denmark with a high penetration of renewable energy sources. *Appl Energy* 85(4), 182–9.

Sarı, A., 2011. “Faz Değişimi Yoluyla Isıl Enerjinin Depolanması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar”, Kimya Lisans Öğrencileri Araştırma Projesi Çalıştayı, 20-28 Temmuz, Çanakkale.

Swider DJ. 2007. Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation. *IEEE Trans Energy Convers* 22(1), 95–102.

Zafirakis D., Kaldellis J.K. 2009. Economic evaluation of the dual mode CAES solution for increased wind energy contribution in autonomous island networks. *Energy Policy* 37, 1958–1969.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih ÖZCAN 1986 yılında doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’ da tamamladıktan sonra 2005 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ nde lisans eğitimine başlamıştır. Aynı bölümden 2010 yılında lisans derecesini almaya hak kazanmıştır. 2011 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır.