

Araştırma Makalesi - Research Article

O-Tipi Orc-Binary Jeotermal Güç Santrali Optimizasyonu: Eatwos Analizi

Optimization of *O*-Type Orc-Binary Geothermal Power Plant: Eatwos Analysis

Aslı Ergenekon Arslan¹, Merve Şentürk Acar², Oğuz Arslan*

Geliş / Received: 05/08/2019

Revize / Revised: 02/09/2019

Kabul / Accepted: 02/09/2019

Öz- Bu çalışmada, Simav jeotermal kaynaklarının değerlendirilmesi amacıyla *o*-Tipi Organic Rankine Cycle (ORC) güç santrali analitik olarak dizayn edilmiştir. Güç santralinin tasarımlarında enerji kaynağı olarak Simav jeotermal sahasına ait potansiyel değerlendirilmiştir. Elde edilen tasarımların çalışma koşulları ele alınarak en efektif tasarımın belirlenmesi amacıyla çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan Tatminsel Odak Çıktılı Etkinlik Analiz Tekniği (EATWOS) kullanılmıştır. Sonuç olarak, *o2*-tipi santrale ait en uygun modeller sırasıyla enerji verimi, net elektrik enerjisi üretimi ve her ikisini birlikte analiz eden durum için Model 10 olarak bulunmuştur. Bu durumda, santral parametreleri $T_{1b}=80$ °C, $T_{2c}=22$ °C ve $T_{2d}=137$ °C olarak belirlenmiş olup, net elektrik enerjisi üretimi 594,12 MWh ve santral verimi % 16,36 olarak tespit edilmiştir. *o3*-tipi santrale ait en uygun modeller sırasıyla enerji verimi, net elektrik enerjisi üretimi ve her ikisini birlikte analiz eden durum için Model 31 olarak bulunmuştur. Bu duruma ait santral parametreleri $T_{1b}=80$ °C, $T_{2c}=22$ °C, $T_{2d}=117$ °C ve $P_{2d}=2000$ kPa olarak belirlenmiş, net elektrik enerjisi üretimi 559,90 MWh ve santral verimi % 14,75 olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: EATWOS, Jeotermal Enerji, *o*-Type ORC

Abstract- In this study, taking the different parameters into account, different designs of *o*-Type Organic Rankine Cycle (ORC) power plant have analytically conducted. In the designs, Simav geothermal resources were taken into consideration as the source of plant. Then, the most efficient design was evaluated by using Efficiency Analysis Technique with Output Satisficing (EATWOS) which is one of Multi-Criteria Decision-Making Technique (MCDMT) in the viewpoint of the working conditions. As a conclusion, the most available models of *o2*-tipi ve *o3*-tipi were determined as Model 10, Model 31, respectively. For Model 10, the design parameters of T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} , net electricity generation and plant energy efficiency were determined as 80 °C, 22 °C, 137 °C, 594.12 MWh and % 16.36, respectively. For Model 31, the design parameters of T_{1b} , T_{2c} , T_{2d} , P_{2d} , net electricity generation and plant energy efficiency were determined as 80 °C, 22 °C, 117 °C, 2000 kPa, 559.895 MWh and % 14.75, respectively.

Keywords- EATWOS, Geothermal Energy, *o*-Type ORC

*Sorumlu yazar iletişim: oguz.arslan@bilecik.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0001-8233-831X>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

¹İletişim: asli.arslan@bilecik.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0001-8052-8566>)

Üretimde Kalite ve Kontrol Prog. Makine ve Metal Teknolojileri Böl. MYO, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

²İletişim: merve.senturkacar@bilecik.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0003-1442-4560>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

I. GİRİŞ

Fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri, limitli rezervleri ve çevresel etkileriyle birlikte değerlendirildiklerinde enerji üretimindeki yüksek maliyetleri nedeniyle, özellikle güç üretimi konusunda daha az zararlı veya zararsız kaynakların kullanımı zaruri hale gelmiştir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları en etkin çözüm olarak karşımıza çıkmakta ve gerek ticari gerekse akademik anlamda çalışmalar bu yöne kaymaktadır. Meteorolojik koşullardan bağımsız ve kesintisiz olması sebebiyle jeotermal enerji bu amaç doğrultusunda diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasında bir adım daha öne çıkmaktadır. Jeotermal enerji kaynaklarının değerlendirmenin birçok yolu bulunmakta olup, elektrik üretimi, bölgesel ısıtma ve sağlık amaçlı kullanımı bunlardan en çok öne çıkanlarıdır. Özellikle düşük-orta entalpili kaynaklardan elektrik üretimi konusundaki çalışmalar son yıllarda tüm dünyada önem kazanmıştır. Bu amaçla yapılan ve farklı çevrim esaslarına dayanan birçok çalışma mevcut olup, Organik Rankine Çevrimi (ORC) esasına dayalı soğutucu akışkanların kullanıldığı ve hatta jeotermal enerjinin güneş enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile melezlenerek oluşturulduğu santral tasarımları bunların en yaygın olanlarıdır. Bu çalışmalarda, farklı çalışma parametrelerinin değerlendirilerek oluşturulduğu pek çok tasarım ortaya koyulmuştur [1-6]. Bu doğrultuda, oluşturulan tasarımlar açısından bölge koşulları da dikkate alındığında hangi tasarımın en etkin tasarım kararını vermek oldukça zor ve karmaşık bir işlemdir.

Tek-kriterli karar verme teknikleri minimum maliyet ve maksimum kazanç üzerine odaklanırken, çok-kriterli karar verme teknikleri (ÇKKVT) daha gerçekçi senaryolarla, daha fazla kriterin birlikte ele alındığı çok boyutlu karar verme problemlerinin çözümüne olanak sağlamaktadır. ÇKKVT alınan kararların daha açık, daha rasyonel ve daha etkin olmalarına olanak sağlayarak bu kararların hassasiyetlerinin artırılmasına yardımcı olurlar [7]. ÇKKVT genellikle, karar şamasında birden çok kriterin ele alındığı problemler için kullanılmakta olup, literatürde özellikle enerji problemlerinin çözümünü ele alan çalışmalar mevcuttur [7-9]. Mirasgedis ve Diakoulaki [10] çalışmalarında, farklı enerji kaynaklarını kullanan termik güç santralının çevresel etkilerine ait dışsal maliyetleri ÇKKVT ile değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak dışsal maliyetlerin her ne kadar bireysel karar vericilerin tercihlerini tam olarak ifade edemese de enerji sektöründe fiyat ve olası sorunlar açısından farklı bir bakış açısı getirdiği ifade edilmiştir. ÇKKVT değerlendirme sürecinde çevresel unsurlara ait endeksleri daha hassas işlemesi nedeniyle ÇKKVT hasar skoru ECE (external cost estimates)'den yüksek olduğu belirtilmektedir. Cavallaro and Ciraolo [11] çalışmalarında Salina adasında kurulması planlanan rüzgâr enerjisi türbinlerinin fizibilitesi kapsamında önerilen farklı seçeneklerin değerlendirilmesi amacıyla ÇKKVT uygulayarak fizibilite yapmıştır. Çalışmada, yerel çevre koşulları ve enerji analizleri yapılmasından sonra 4 rüzgâr tribünü seçenekler olarak değerlendirilmiştir. Goumas vd. [12] çalışmalarında jeotermal kaynaklarının optimal kullanımı için ÇKKVT'den faydalanmıştır. Çalışmada, jeotermal enerji projesinin belirsiz şartlarda stokastik analiz yaklaşımı kullanılarak ekonomik değerlendirmesi ve ÇKKVT kullanılarak düşük entalpili bir jeotermal alanın optimum şekilde geliştirilmesi için alternatif kullanım şemalarının değerlendirilmesi olmak üzere iki temel problem ele alınmıştır. Çalışma sonucunda, hesaplamalı yöntemlerin bir jeotermal enerji projesinin planlanması ve değerlendirilmesinde değerli araçlar olduğu, stokastik analiz yöntemlerinin girdi verilerinin makul bir doğruluk derecesi dahilinde bilinmediği durumlarda projelerin ekonomik değerlendirmesiyle ilgili bilgi verebildiği ancak ÇKKVT kullanır iken değerlendirme dahilinde seçilecek kriterlerin karar verici tarafından dikkatle seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Afgan ve Carvalho [13] çalışmalarında, seçilen sürdürülebilirlik kriterleri ile ölçümlendirilen bazı karakteristiklerin özellikleri dikkate alınarak yeni enerji kaynaklarını değerlendirilmiştir. Çalışmada kömür, güneş, jeotermal, biokütle, nükleer, PV solar, rüzgâr, okyanus, hidro ve gaz santrallerinin verimlilik, kurulum, elektrik maliyeti, CO₂ ve alan değerleri açısından ÇKKVT ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Diakoulaki vd. [14] çalışmalarında, enerji kullanımının çevre üzerindeki olumsuz etkileri, bu konuda alınabilecek tedbirleri ve etkinliklerin sebep-sonuç ilişkilerini ÇKKVT yöntemi kullanarak değerlendirmişlerdir. Dargam ve Perz [15] çalışmalarında, bakım-onarım ve enerji maliyetlerindeki veya talep oranlarındaki değişiklikler gibi söz konusu temel konular dahilinde, santral tasarım süreci için gerekli nitel sentezi sağlamak ve aynı zamanda tasarım mühendislerinin daha iyi bir seçim değerlendirmesi yapabilmelerine yardımcı olmak için, bir enerji santralini ÇKKVT ile incelemiştir. Georgopoulou vd. [16] çalışmalarında, artan enerji tüketimine istinaden yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliğini ÇKKVT ile analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında ilgili aktörlerin tanımlanması, kriterlerin seçimi, alternatif stratejilerin oluşturulması, yöntemin uygulanması, sonuçların ve aktörlerin reaksiyon analizi yapılmıştır. Bell vd. [17] çalışmalarında, elektrik endüstrisinin serbestleşmesi ve elektrik üretiminin çevresel etkileri konusundaki artan endişeler nedeni ile, enerji sistemleri planlamasındaki belirsizliklere bağlı en iyi planlama stratejisini ÇKKVT yardımı ile belirlemeyi hedeflemiştir.

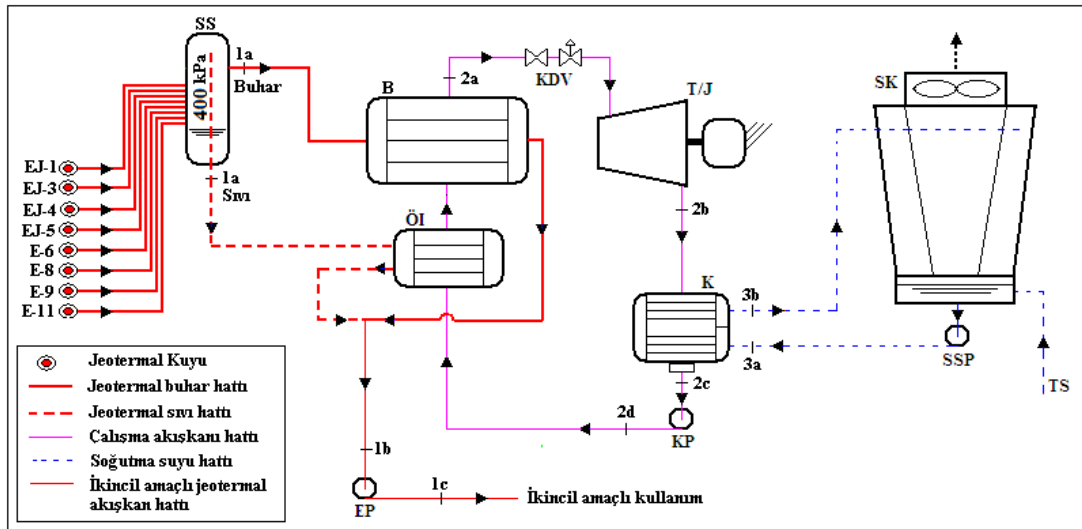
Tasarım parametrelerinin baz alınarak en etkin çözümün karar verildiği problemlerde Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Tatminsel Odak Çıktılı Etkinlik Analiz Tekniği (EATWOS) çok-kriterli karar verme teknikleri arasında sık kullanılanlarıdır. Bu tür teknikler, şirket performanslarının değerlendirilmesi, üniversite

performanslarının değerlendirilmesi, işletmelerin finansal performanslarının değerlendirilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [18-21]. VZA, lineer programlamaya dayalı bir matematiksel prosedür olup, karar verme birimlerinin etkinliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Oluşturulan karar verme birimleri girdi ve çıktı odaklarına bağlı olarak kendi içlerinde değerlendirilerek, minimum girdi ve maksimum çıktı esasında analiz edilir. Elde edilen analiz sonuçları 0-1 aralığında puanlanarak en etkin tasarım/sistem belirlenir. Temel olarak, VZA kaynak kullanımının performans değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ergenekon Arslan vd. [22, 23] yapmış olduğu çalışmada, analitik olarak tasarlanan b-tipi ORC ve entegre jeotermal sistemleri VZA ile değerlendirerek, en etkin tasarımı belirlemeyi hedeflemişlerdir. Şentürk Acar vd. [24], Ranque-Hilsch vortex tüpü entegrasyonu ile oluşturulan buhar sıkıştırma soğutma sistemine ait deneysel sonuçların enerji ve ekserji analizlerini VZA ile inceleyerek, en etkin çalışma koşullarını belirlemeye çalışmışlardır. Şentürk Acar ve Arslan [25] bir diğer çalışmada, Ranque-Hilsch vortex tüpü entegrasyonu ile oluşturulan kurutma sistemine ait deneysel sonuçların enerji ve ekserji analizlerini VZA ile inceleyerek, en etkin çalışma koşullarını belirlemeye çalışmışlardır.

VZA'da elde edilen birden fazla etkin sonucun teke düşürülmesi ve kendi içerisinde öz değerlendirme yaparak nihai bir karar mekanizması olması nedeniyle EATWOS enerji sistemlerinde daha güçlü bir analiz tekniği olarak değerlendirilebilir [26]. Arslan vd. [27, 28], yapmış olduğu çalışmada, analitik olarak tasarlanan s-tipi ORC ve jeotermal entegre sistemleri EATWOS ile değerlendirmişler, ve en etkin tasarımı belirlemeyi hedeflemişlerdir. Şentürk Acar vd. [29], Ranque-Hilsch vortex tüpü entegrasyonu ile oluşturulan buhar sıkıştırma soğutma sistemine ait deneysel sonuçların enerji ve ekserji analizlerini EATWOS ile inceleyerek, en etkin çalışma koşullarını belirlemeye çalışmışlardır. Şentürk Acar ve Arslan [30] bir diğer çalışmada, Ranque-Hilsch vortex tüpü entegrasyonu ile oluşturulan kurutma sistemine ait deneysel sonuçların enerji ve ekserji analizlerini EATWOS ile inceleyerek, en etkin çalışma koşullarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada, Simav jeotermal kaynaklarının değerlendirilmesi amacıyla tasarlanmış o-tipi ORC santraline ait enerji üretimi ve santral verimleri dahilinde giriş parametrelerine dayalı EATWOS çok-kriterli karar verme tekniği kullanılarak en efektif santral tasarımı belirlenmeye çalışılmıştır.

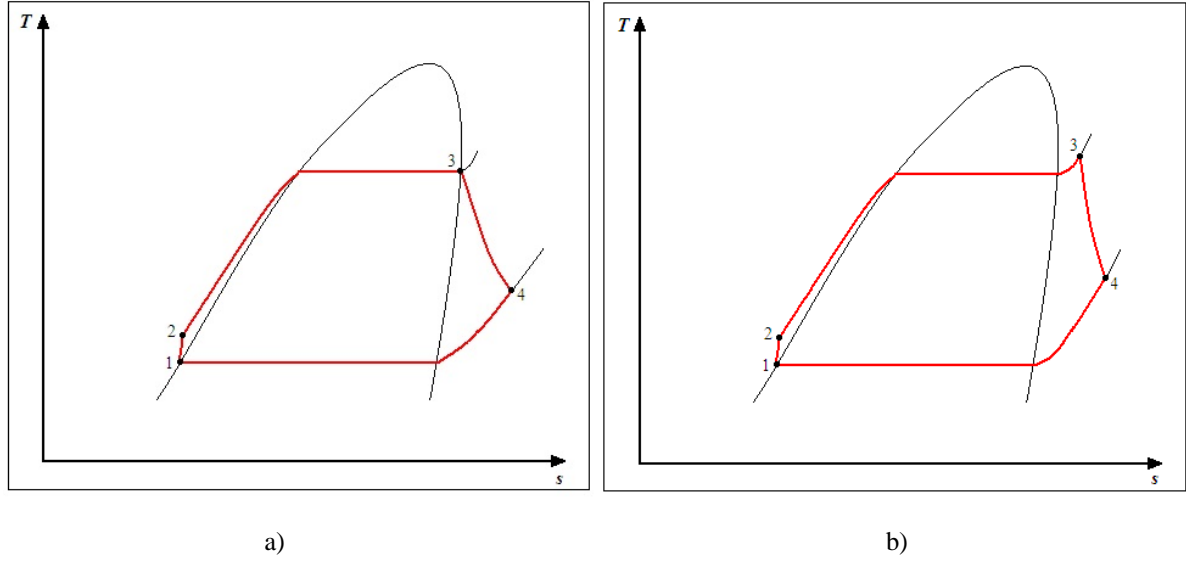
II. ORC GÜÇ SANTRALI TASARIMI

Tasarımı yapılan ORC güç santraline ait akış diyagramı Şekil 1'de verildiği gibidir. Buna göre santral, siklon seperatör (SS), ön ısıtıcı (Öİ), buharlaştırıcı (B), sirkülasyon pompası (SP), yoğuşturucu (Y), kontrol vanası (KV) ve türbin-jeneratör (T/J) grubu olmak üzere 7 temel bileşenden oluşmaktadır [2 ,3]. Jeotermal akışkanların 400 kPa basınç altına karışımı sonucu elde edilen çevrim akışkanı sıcaklığı 143,6 °C'dir.



Şekil 1. ORC-Binary jeotermal güç santrali akış diyagramı [1].

Çevrimin işleyişinin belirlenmesi açısından çalışma akışkanının seçimi oldukça fazla önem teşkil etmektedir. Çünkü, akışkanın termodinamik özelliklerine bağlı olarak santrale ait kapalı çevrim bu doğrultuda şekillenmekte ve tasarım çıktılarına doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, çalışma akışkanı olarak piyasada oldukça fazla kullanımı olan R-600 soğutucu akışkanı dikkate alınmıştır. Çevrime ait T-s diyagramı Şekil 2'de verildiği gibidir [1].



Şekil 2. ORC-Binary santraline ait T-s diyagramı; a) o2-Tipi çevrim b) o3-Tipi çevrim [1].

Buna göre, türbin girişinde soğutucu akışkanın doymuş buhar çizgisi üzerinde veya ıslak buhar veya kızgın buhar bölgesinde bulunmasına bağlı olarak *o-Tipi* çevrim *o2* ve *o3* olmak üzere iki farklı model olarak ele alınır. Sistemde kullanılan ısı eşanjörleri, türbin, jeneratör ve pompa verimleri sırasıyla % 98, % 85, % 99 ve % 90 olarak hesaplamalara dahil edilerek güç üretimleri ve santral verimleri hesaplanmıştır. Oluşturulan *o2-Tipi* dizaynlara ait hesaplama sonuçları Tablo 1’de, *o3-Tipi* dizaynlara ait hesaplama sonuçları Tablo 2’de verildiği gibidir [1].

Tablo 1. *o2-Tipi* çevrim tasarımları.

Model No	T_{1b} (°C)	T_{2a} (°C)	T_{2c} (°C)	W_{net} (kWh)	η (%)
1	110	137	22	524286,85	16,36
2	110	117	22	460663,61	14,38
3	110	97	22	388321,62	12,12
4	100	137	22	547634,41	16,36
5	100	117	22	481177,89	14,38
6	100	97	22	405614,37	12,12
7	90	137	22	570904,62	16,36
8	90	117	22	501624,21	14,38
9	90	97	22	422849,83	12,12
10	80	137	22	594119,58	16,36
11	80	117	22	522021,99	14,38
12	80	97	22	440044,37	12,12
13	110	137	26	507823,65	15,85
14	110	117	26	444286,99	13,86
15	110	97	26	368629,65	11,50
16	100	137	26	530438,07	15,85
17	100	117	26	464071,99	13,86
18	100	97	26	385045,48	11,50
19	90	137	26	552977,56	15,85
20	90	117	26	483791,44	13,86
21	90	97	26	401406,92	11,50

22	80	137	26	575463,55	15,85
23	80	117	26	503464,08	13,86
24	80	97	26	417729,52	11,50
25	110	137	30	487036,27	15,20
26	110	117	30	421289,37	13,15
27	110	97	30	344173,59	10,74
28	100	137	30	508724,98	15,20
29	100	117	30	440050,24	13,15
30	100	97	30	359500,34	10,74
31	90	137	30	530341,84	15,20
32	90	117	30	458748,96	13,15
33	90	97	30	374776,31	10,74
34	80	137	30	551907,37	15,20
35	80	117	30	477403,28	13,15
36	80	97	30	390016,02	10,74
37	110	137	36	458365,43	14,30
38	110	117	36	391717,14	12,22
39	110	97	36	315466,47	9,84
40	100	137	36	478777,38	14,30
41	100	117	36	409161,10	12,22
42	100	97	36	329514,83	9,84
43	90	137	36	499121,69	14,30
44	90	117	36	426547,27	12,22
45	90	97	36	343516,65	9,84
46	80	137	36	519417,71	14,30
47	80	117	36	443892,16	12,22
48	80	97	36	357485,23	9,84

Tablo 2. *o3-Tipi* çevrim tasarımları.

Model No	T_{1b} (°C)	T_{2a} (°C)	T_{2c} (°C)	P_{2d} (kPa)	W_{net} (kWh)	η (%)
1	110	137	22	2500	519204,87	15,40
2	110	137	22	2000	499195,43	14,98
3	110	137	22	1500	449045,88	13,60
4	110	117	22	2000	494085,33	14,75
5	110	117	22	1500	427016,57	12,87
6	110	117	22	1000	370535,14	11,29
7	110	107	22	1500	438465,28	13,20
8	110	107	22	1000	362779,11	11,04
9	110	107	22	800	306838,65	9,37
10	100	137	22	2500	542326,11	15,40
11	100	137	22	2000	521425,61	14,98
12	100	137	22	1500	469042,81	13,60
13	100	117	22	2000	516087,95	14,75
14	100	117	22	1500	446032,48	12,87
15	100	117	22	1000	387035,82	11,29

16	100	107	22	1500	457991,02	13,20
17	100	107	22	1000	378934,39	11,04
18	100	107	22	800	320502,80	9,37
19	90	137	22	2500	565370,76	15,40
20	90	137	22	2000	543582,15	14,98
21	90	137	22	1500	488973,48	13,60
22	90	117	22	2000	538017,67	14,75
23	90	117	22	1500	464985,39	12,87
24	90	117	22	1000	403481,83	11,29
25	90	107	22	1500	477452,08	13,20
26	90	107	22	1000	395036,16	11,04
27	90	107	22	800	334121,68	9,37
28	80	137	22	2500	588360,69	15,40
29	80	137	22	2000	565686,09	14,98
30	80	137	22	1500	508856,84	13,60
31	80	117	22	2000	559895,34	14,75
32	80	117	22	1500	483893,31	12,87
33	80	117	22	1000	419888,80	11,29
34	80	107	22	1500	496866,94	13,20
35	80	107	22	1000	411099,70	11,04
36	80	107	22	800	347708,22	9,37
37	110	137	26	2500	501546,84	14,84
38	110	137	26	2000	481860,77	14,43
39	110	137	26	1500	431390,80	13,04
40	110	117	26	2000	474698,83	14,14
41	110	117	26	1500	407100,82	12,24
42	110	117	26	1000	342889,86	10,43
43	110	107	26	1500	420429,78	12,63
44	110	107	26	1000	333642,89	10,13
45	110	107	26	800	282002,69	8,60
46	100	137	26	2500	523881,73	14,84
47	100	137	26	2000	503319,00	14,43
48	100	137	26	1500	450601,51	13,04
49	100	117	26	2000	495838,13	14,14
50	100	117	26	1500	425229,84	12,24
51	100	117	26	1000	358159,44	10,43
52	100	107	26	1500	439152,37	12,63
53	100	107	26	1000	348500,68	10,13
54	100	107	26	800	294560,84	8,60
55	90	137	26	2500	546142,64	14,84
56	90	137	26	2000	524706,15	14,43
57	90	137	26	1500	469748,57	13,04
58	90	117	26	2000	516907,40	14,14
59	90	117	26	1500	443298,81	12,24
60	90	117	26	1000	373378,43	10,43
61	90	107	26	1500	457812,93	12,63

62	90	107	26	1000	363309,26	10,13
63	90	107	26	800	307077,39	8,60
64	80	137	26	2500	568350,69	14,84
65	80	137	26	2000	546042,52	14,43
66	80	137	26	1500	488850,18	13,04
67	80	117	26	2000	537926,65	14,14
68	80	117	26	1500	461324,88	12,24
69	80	117	26	1000	388561,30	10,43
70	80	107	26	1500	476429,19	12,63
71	80	107	26	1000	378082,67	10,13
72	80	107	26	800	319564,22	8,60
73	110	137	30	2500	483298,81	14,26
74	110	137	30	2000	461526,57	13,79
75	110	137	30	1500	403732,81	12,18
76	110	117	30	2000	457326,79	13,59
77	110	117	30	1500	381250,31	11,44
78	110	117	30	1000	314253,45	9,54
79	110	107	30	1500	393470,32	11,79
80	110	107	30	1000	306043,52	9,28
81	110	107	30	800	251006,75	7,64
82	100	137	30	2500	504821,09	14,26
83	100	137	30	2000	482079,28	13,79
84	100	137	30	1500	421711,85	12,18
85	100	117	30	2000	477692,48	13,59
86	100	117	30	1500	398228,16	11,44
87	100	117	30	1000	328247,79	9,54
88	100	107	30	1500	410992,35	11,79
89	100	107	30	1000	319672,25	9,28
90	100	107	30	800	262184,59	7,64
91	90	137	30	2500	526272,06	14,26
92	90	137	30	2000	502563,91	13,79
93	90	137	30	1500	439631,33	12,18
94	90	117	30	2000	497990,69	13,59
95	90	117	30	1500	415149,76	11,44
96	90	117	30	1000	342195,77	9,54
97	90	107	30	1500	428456,33	11,79
98	90	107	30	1000	333255,84	9,28
99	90	107	30	800	273325,40	7,64
100	80	137	30	2500	547672,11	14,26
101	80	137	30	2000	522999,90	13,79
102	80	137	30	1500	457508,27	12,18
103	80	117	30	2000	518240,72	13,59
104	80	117	30	1500	432031,19	11,44
105	80	117	30	1000	356110,64	9,54
106	80	107	30	1500	445878,85	11,79
107	80	107	30	1000	346807,18	9,28

108	80	107	30	800	284439,76	7,64
109	110	137	36	2500	456045,39	13,40
110	110	137	36	2000	429724,12	12,80
111	110	137	36	1500	373807,86	11,25
112	110	117	36	2000	427240,67	12,64
113	110	117	36	1500	350046,32	10,46
114	110	117	36	1000	277053,67	8,39
115	110	107	36	1500	363779,32	10,87
116	110	107	36	1000	266688,64	8,06
117	110	107	36	800	215690,18	6,55
118	100	137	36	2500	476354,02	13,40
119	100	137	36	2000	448860,60	12,80
120	100	137	36	1500	390454,28	11,25
121	100	117	36	2000	446266,56	12,64
122	100	117	36	1500	365634,59	10,46
123	100	117	36	1000	289391,43	8,39
124	100	107	36	1500	379979,15	10,87
125	100	107	36	1000	278564,83	8,06
126	100	107	36	800	225295,30	6,55
127	90	137	36	2500	496595,36	13,40
128	90	137	36	2000	467933,69	12,80
129	90	137	36	1500	407045,55	11,25
130	90	117	36	2000	465229,42	12,64
131	90	117	36	1500	381171,22	10,46
132	90	117	36	1000	301688,32	8,39
133	90	107	36	1500	396125,32	10,87
134	90	107	36	1000	290401,67	8,06
135	90	107	36	800	234868,60	6,55
136	80	137	36	2500	516788,65	13,40
137	80	137	36	2000	486961,50	12,80
138	80	137	36	1500	423597,44	11,25
139	80	117	36	2000	484147,27	12,64
140	80	117	36	1500	396670,96	10,46
141	80	117	36	1000	313956,01	8,39
142	80	107	36	1500	412233,15	10,87
143	80	107	36	1000	302210,41	8,06
144	80	107	36	800	244419,17	6,55

III. EATWOS ANALİZİ

Çıktı bazlı tatmin edici çözümlerin elde edilmesi açısından EATWOS 2006 yılında geliştirilen yeni bir tekniktir. Girdi değerlerine bağlı olarak, çıktılarda bağlı sonuçlar vermesi ve bu sonuçların birbirleriyle kıyas edilebilmesi ve enerji sistem tasarımı problemlerinde optimum sonuca karar verme açısından oldukça kullanılabilir bir tekniktir. EATWOS uygulama adımları aşağıda özetlenmiştir [30-32]. Giriş ve çıkış değerlerine bağlı olarak girdi ve çıktı matrisleri sırasıyla aşağıda verildiği gibidir;

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{I1} & \dots & x_{IK} \end{bmatrix} \quad x_{ik} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall k = 1, \dots, J \quad (1)$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{I1} & \cdots & y_{IJ} \end{bmatrix} \quad y_{ij} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall j = 1, \dots, K \quad (2)$$

İkinci adım olarak bu matrisler aşağıdaki eşitlikler kullanılarak normalize edilmiştir;

$$s_{ik} = \frac{x_{ik}}{\sqrt{\sum_{l=1}^K x_{il}^2}} \quad (3)$$

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{l=1}^I y_{lj}^2}} \quad (4)$$

Üçüncü adım olarak giriş ve çıkış değerleri için uzaklık matrisleri hesaplanır. Bu bağlamda, giriş ve çıkış değerleri için sırasıyla aşağıda verilen uzaklık ölçüm ifadeleri kullanılmıştır.

$$ip_{ik} = 1 + s_{ik} - s_k^* \quad (5)$$

$$op_{ik} = 1 + r_{ij} - r_j^* \quad (6)$$

Burada, s_k^* ve r_j^* sırasıyla normalize edilmiş maksimum girdi ve çıktı değerleri olup aşağıdaki gibi verilir.

$$s_k^* = \min_i \{s_k\} \quad (7)$$

$$r_j^* = \max_i \{r_j\} \quad (8)$$

Son adım olarak, karar verme mekanizmalarında girdi (w_k) ve çıktı (v_j) parametrelerinin ağırlık değerlerine bağlı olarak ele alınan tasarımları etkinli değerleri;

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^J v_j \cdot op_{ij}}{\sum_{k=1}^K w_k \cdot ip_{ik}} \quad (9)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada jeotermal akışkanın çok amaçlı kullanımını da dikkate alan entegre sistemde kullanımını belirleyen sıcak değerlerine bağlı olarak *o2-Tipi* için 48 ve *o3-Tipi* için 144 adet tasarım oluşturulmuştur. *o2-Tipi* için T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} , ve *o3-Tipi* için T_{1b} , T_{2d} , T_{2c} ve P_{2d} değerleri EATWOS analizi için girdi değerlerini oluştururken, hesaplanan enerji verimi (η) ve net elektrik üretimi (W_{net}) çıktı değerlerini oluşturmuştur. Girdilere ve çıktılara ait modellemeye kullanılan ağırlıklar, her bir girdi ve çıktının kendi içerisindeki normalize uzaklık toplamının tüm parametrelerin ağırlık toplamına oranı şeklinde hesaplanmıştır. *o2-Tipi* çevrim için, ağırlık değerlerine ait bulgular Tablo 3'de, hesaplanan ağırlık değerleri baz alınarak hesaplanan etkinlik değerleri Şekil 3-5'de verilmiştir.

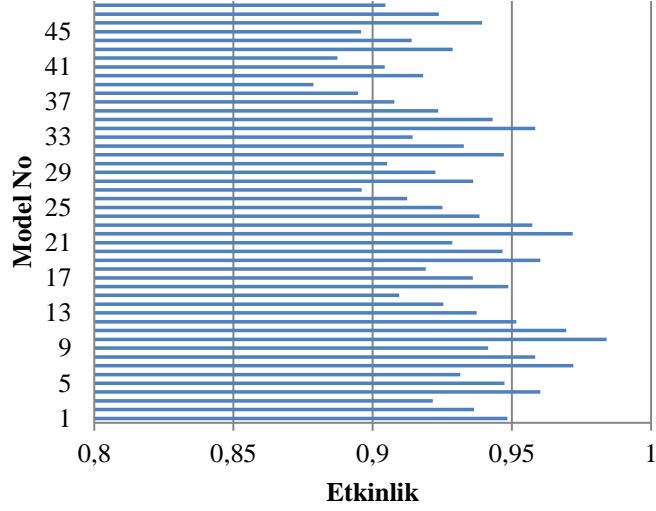
Tablo 3. *o2-Tipi* santral için hesaplanan ağırlık değerleri.

Ağırlık Değerleri	w_k			v_j	η
	T_{1b}	T_{2d}	T_{2c}		
Parametre toplamı	49,086	49,173	49,555	45,895	46,419
Genel Toplam		147,814		92,314	
Ağırlık	0,332082	0,332667	0,33525	0,497163	0,502837

o3-Tipi çevrim için, ağırlık değerlerine ait bulgular Tablo 4'te, hesaplanan ağırlık değerleri baz alınarak hesaplanan etkinlik değerleri Şekil 6-8'de verildiği gibidir.

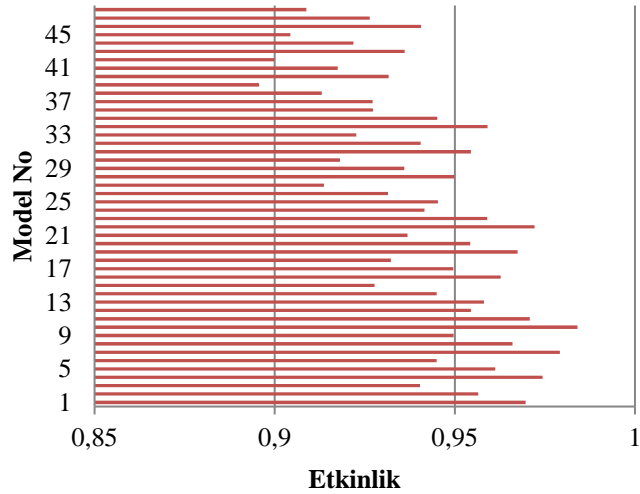
Tablo 3. *o3-Tipi* santral için hesaplanan ağırlık değerleri.

Ağırlık Değerleri	w_k					v_j	
	T_{1b}	T_{2d}	T_{2c}	P_{2d}	W_{net}	η	
Parametre toplamı	145,882	145,323	146,693	149,430	139,264	140,405	
Genel Toplam			587,327			279,669	
Ağırlık	0,248383	0,24743	0,249764	0,254423	0,497959	0,502041	



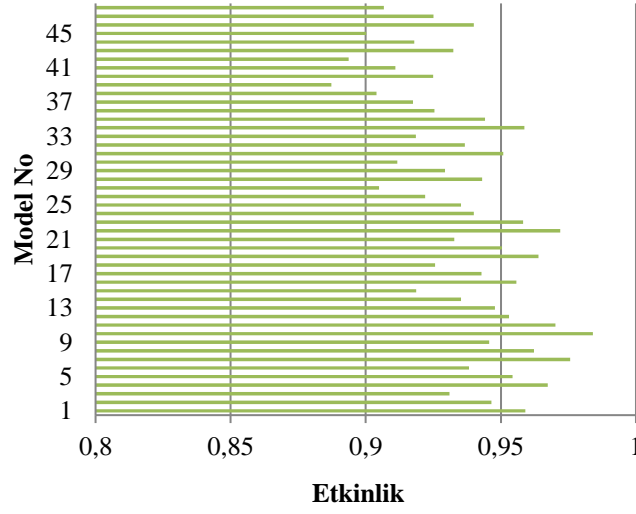
Şekil 3. *o2-Tipi* santral için W_{net} bazlı etkinlik değerleri.

Şekil 3 incelendiğinde, oluşturulan tasarımlara ait etkinliklerin 0,878 ile 0,984 arasında değiştiği hesap edilmiştir. Bu durumda, karar verme açısından en etkin tasarım 10 nolu modele ait tasarım olarak belirlenmiştir.



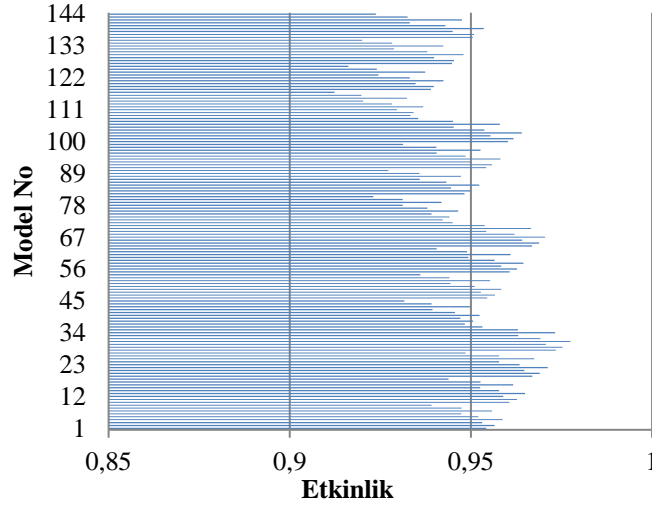
Şekil 4. *o2-Tipi* santral için η bazlı etkinlik değerleri.

Şekil 4 incelendiğinde, oluşturulan tasarımlara ait etkinliklerin 0,896 ile 0,984 arasında değiştiği hesap edilmiştir. Bu durumda, karar verme açısından en etkin tasarım 10 nolu modele ait tasarım olarak belirlenmiştir.



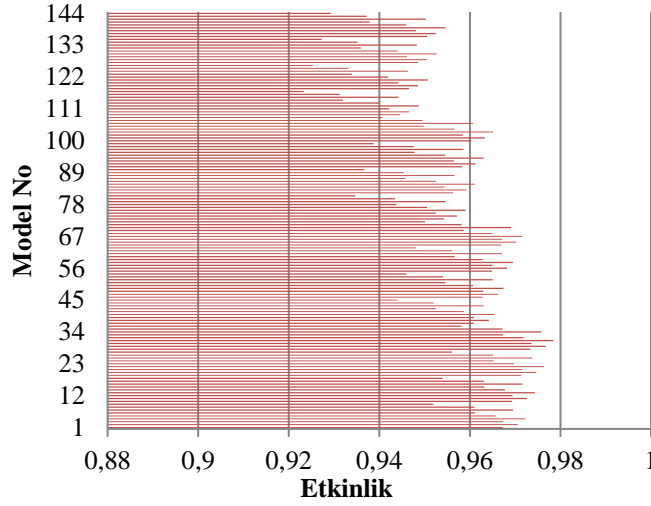
Şekil 5. 02-Tipi santral için W_{net} ve η bütünlük bazlı etkinlik değerleri.

Şekil 5 incelendiğinde, oluşturulan tasarımlara ait etkinliklerin 0,887 ile 0,984 arasında değiştiği hesap edilmiştir. Bu durumda, karar verme açısından en etkin tasarım yine 10 nolu modele ait tasarım olarak belirlenmiştir.



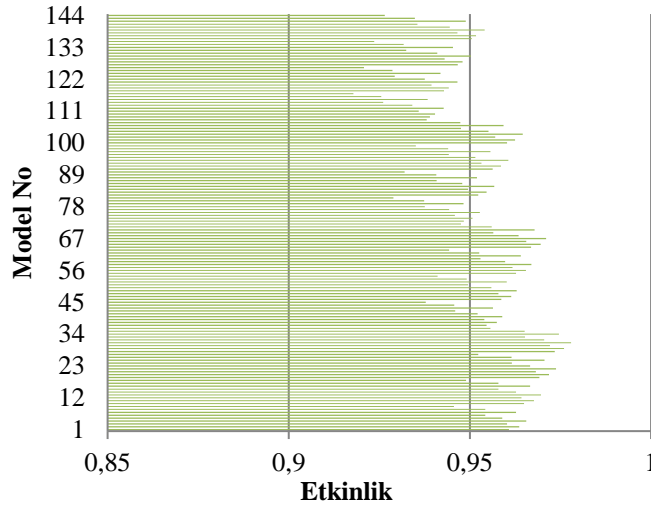
Şekil 6. 03-Tipi santral için W_{net} bazlı etkinlik değerleri.

Şekil 6 incelendiğinde, oluşturulan tasarımlara ait etkinliklerin 0,912 ile 0,977 arasında değiştiği hesap edilmiştir. Bu durumda, karar verme açısından en etkin tasarım 31 nolu modele ait tasarım olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. o3-Tipi santral için η bazlı etkinlik değerleri.

Şekil 7 incelendiğinde, oluşturulan tasarımlara ait etkinliklerin 0,923 ile 0,978 arasında değiştiği hesap edilmiştir. Bu durumda, karar verme açısından en etkin tasarım 31 nolu modele ait tasarım olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. o3-Tipi santral için W_{net} ve η bütünlüklük bazlı etkinlik değerleri.

Şekil 8 incelendiğinde, oluşturulan tasarımlara ait etkinliklerin 0,918 ile 0,978 arasında değiştiği hesap edilmiştir. Bu durumda, karar verme açısından en etkin tasarım 31 nolu modele ait tasarım olarak belirlenmiştir.

Tasarımlara ait etkinlik değerleri incelendiğinde, eşanjör çıkışında soğutucu akışkan sıcaklığının (T_{2a}) düşmesiyle birlikte etkinlik değeri önce azalmakta sonrasında ise artan bir eğilim göstermektedir. Termodinamik değerlendirmeye göre T_{2a} sıcaklığının azalmasıyla birlikte sistemde dolaşan soğutucu akışkan debisinin azalması ve buna bağlı olarak üretilen enerji değerinin düşmesi beklenen sonuçtur. Bu olay sistem etkinliğini direkt olarak etkileyecektir. Ancak sıcaklık düşüşündeki bir noktadan sonra etkinlik değerinin artışı soğutucu akışkanın termodinamik özellikleri ve sıkıştırma gereksinimindeki enerji değişimiyle izah edilebilir.

Yüksek eşanjör giriş soğutucu akışkan sıcaklıklarında (T_{2d}) sıkıştırma basıncının (P_{2d}) düşmesiyle birlikte etkinlik önce artış göstermekte sonrasında ise düşmektedir. Düşük eşanjör giriş soğutucu akışkan

sıcaklıklarında (T_{2d}) sıkıştırma basıncının (P_{2d}) düşmesiyle birlikte etkinlik de düşmektedir. Bu husus da yine soğutucu akışkanın termofiziksel özellikleri ile alakalı olup olası beklenen durum yüksek sıkıştırma basınlarındaki güç gereksinimlerinin ve üretilen net enerjinin daha fazla oluşuna bağlı olarak etkinliğin değişmesi yönündedir.

Jeotermal akışkan eşanjör çıkış sıcaklığının (T_{1b}) düşmesiyle birlikte etkinlik değeri artmaktadır. Termodinamik değerlendirme açısından sisteme verilen enerjinin artması ile birlikte sistemden elde edilecek enerjinin artma eğilimi göstermesi ve buna bağlı olarak etkinliğin artması beklenen bir sonuçtur.

Soğutucu akışkan yoğunlaştırıcı çıkış sıcaklığının (T_{2c}) artmasıyla birlikte etkinlik değeri azalmaktadır. Termodinamik değerlendirme açısından jeotermal akışkandan çekilecek enerji miktarının azalması ile birlikte sistemden elde edilecek enerjinin de azalma eğilimi göstermesi ve buna bağlı olarak etkinliğin azalması da yine beklenen bir sonuçtur.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak *o-Tipi* ORC jeotermal güç santralleri analitik olarak incelenmiştir. Elde edilen tasarımlar daha sonra EATWOS çok kriterli karar verme modeliyle değerlendirilerek en etkin tasarım belirlenmiştir.

Sonuç olarak, *o2-Tipi* santral için üretilen net elektrik enerjisi ve santral verimi baz alındığında 10 nolu model en etkin sistem olarak belirlenmiştir. Her iki çıktı durumunun belirlendiği durum için yine en etkin sistem tasarımı 10 nolu model olarak belirlenmiştir. Tasarımı yapılan 10 nolu model için, santral parametreleri $T_{1b}=80$ °C, $T_{2c}=22$ °C ve $T_{2d}=137$ °C olup, net elektrik enerjisi üretimi 594,12 MWh ve santral verimi % 16,36 olarak tespit edilmiştir.

o3-Tipi santral için üretilen net elektrik enerjisi ve santral verimi açısından 31 nolu model en etkin sistem olarak belirlenmiştir. Her iki çıktının birlikte ele alındığı durum için yine en etkin sistem tasarımı 31 nolu model olarak belirlenmiştir. Tasarımı yapılan 31 nolu modele ait santral parametreleri $T_{1b}=80$ °C, $T_{2c}=22$ °C, $T_{2d}=117$ °C ve $P_{2d}=2000$ kPa olup, net elektrik enerjisi üretimi 559,90 MWh ve santral verimi % 14,75 olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Arslan, O., (2008). *Simav-Eynal Jeotermal Kaynaklarının Hassas Değerlendirilmesi: Entegre sistem tasarımı ve enerji-ekserji analizleri*. Eskisehir Osmangazi Üniversitesi. Doktora Tezi.
- [2] Arslan, O., Yetik, O., (2014). ANN modeling of an ORC-binary geothermal power plant: Simav case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36 (4), 418-428.
- [3] Arslan, O., Ozgur, M.A., Kose, R., (2012). Electricity generation ability of the Simav geothermal field: A technoeconomic approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34 (12), 1130-1144.
- [4] Arslan, O., (2011). Power generation from medium temperature geothermal resources: ANN-based optimization of Kalina cycle system-34. *Energy* 36 (5), 2528-2534.
- [5] Arslan, O., (2010). Exergoeconomic evaluation of electricity generation by the medium temperature geothermal resources, using a Kalina cycle: Simav case study. *International journal of Thermal Sciences* 49 (9), 1866-1873.
- [6] Arslan, O., Ozgur, M.A., Kose, R., Tugcu, A., (2009). Exergoeconomic evaluation on the optimum heating circuit system of Simav geothermal district heating system, *Energy and Buildings* 41: 1325-1333.
- [7] Pohekar, S.D. and Ramachandran, M., (2004), Application of Multi-Criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning-A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8 (4); 365-381.
- [8] Siksnelyte, I., Zavadskas, E.K., Streimikiene, D., Sharma D., (2018). An Overview of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Dealing with Sustainable Energy Development Issues, *Energies* 11(10); 2754. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102754>.

- [9] Taha, R.A. and Daim, T., (2013). Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review, Research and Technology Management in the Electricity Industry, *Green Energy and Technology*, Springer-Verlag, London.
- [10] Mirasgedis S. and Diakoulaki D., (1997). Multicriteria Analysis vs. Externalities Assessment for the Comparative Evaluation of Electricity Generation Systems. *European Journal of Operational Research* 102; 364-379.
- [11] Cavallaro, F. and Ciraolo, L., (2005). A Multicriteria Approach To Evaluate Wind Energy Plants On An Italian Island, *Energy Policy* 33, 235–244.
- [12] Goumas M.G., Lygerou V.A., Papayannakis L.E., (1999). Computational methods for Planning and Evaluating Geothermal Energy Projects, *Energy Policy* 27; 147-154.
- [13] Afgan, N.H. and Carvalho, M.G., (2002). Multi-Criteria Assessment of New And Renewable Energy Power Plants, *Energy* 27; 739–755.
- [14] Diakoulaki D., Zopounidis C., Mavrotas G., Doumpos M., (1999). The Use Of A Preference Disaggregation Method in Energy Analysis and Policy Making, *Energy* 24; 157–166.
- [15] Dargam, F.C.C. and Perz, E.W., (1998). A Decision Support System For Power Plant Design, *European Journal of Operational Research* 109, 310-320.
- [16] Georgopoulou E., Lalas D., Papagiannakis L., (1997). A Multicriteria Decision Aid Approach For Energy Planning Problems: The Case Of Renewable Energy Option, *European Journal of Operational Research* 103 (9); 38-54.
- [17] Bell, M.L., Hobbs, B.F., Elliott, E.M., Ellis, H. and Robinson, Z., (2001). An Evaluation Of Multi-Criteria Methods In Integrated Assessment Of Climate Policy, *J. Multi-Crit. Decis. Anal.* 10: 229–256.
- [18] Arslan, A. E., Güven, Ö.Z., (2018). Veri Zarflama Analizi ile Üniversite Etkinliklerinin Belirlenmesine Yönelik Bir Çalışma: Türkiye Örneği, *Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi*, 3(6), 86-105.
- [19] Huang, W., Eling, M., (2013). An efficiency comparison of the non-life insurance industry in the BRIC countries, *European Journal of Operational Research* 226(3), 577-591.
- [20] Kundakcı, N., (2018). Efficiency Evaluation of State Universities in Turkey with EATWOS Method, *Proceedings of International Congress on Afro - Eurasian Research IV*, pp.:226-238, 27-29 April 2018, Budapest, Hungary.
- [21] Özbek, A., (2015). Efficiency Analysis of Non-Governmental Organizations Based in Turkey, *International Business Research*, 8(9), 1-11.
- [22] Ergenekon Arslan, A., Senturk Acar, M., Arslan O., (2018). Effectiveness Analysis of ORC-Binary Geothermal Power Plant Using Data Enveloping, *Proceedings of International Congress on Afro - Eurasian Research IV*, pp.:110-118, 27-29 April 2018, Budapest, Hungary.
- [23] Ergenekon Arslan, A., Senturk Acar, M., Arslan O., (2018). Data Enveloping Based Effectiveness Analysis of Integrated Geothermal System: Simav Case Study, *Proceedings of International Congress on Afro - Eurasian Research IV*, pp.:119-125, 27-29 April 2018, Budapest, Hungary.
- [24] Senturk Acar, M., Ergenekon Arslan, A., Arslan O., (2018). Determination of the Effective Parameters of Ranque-Hilsch Vortex Tube Integrated Vapour Compression Cooling System Using Data Enveloping Analysis, *Proceedings of International Congress on Afro - Eurasian Research IV*, pp.:370-377, 27-29 April 2018, Budapest, Hungary.
- [25] Senturk Acar, M. and Arslan O., (2018). Data Enveloping Analysis of Ranque-Hilsch Vortex Tube Aided Drying System, *Proceedings of International Congress on Afro - Eurasian Research IV*, pp.:410-416, 27-29 April 2018, Budapest, Hungary.
- [26] Arslan, O., Ergenekon Arslan, A., Senturk Acar, M., (2019). Multi-Criteria Making-Decision Modeling of b-type ORC-Binary Geothermal Power Plant: EATWOS Analysis, *BSEU Journal of Science* 6(1); 29-48. DOI: 10.35193/bseufbd.561668.

- [27] Arslan O., Ergenekon Arslan, A., Yerel Kandemir, S., (2019). EATWOS Analysis of S-Type ORC-Binary Geothermal Power Plant, *International Congress on Afro-Eurasian Research V*, 19-22 April 2019, Nicosia, Cyprus.
- [28] Senturk Acar, M., Arslan O., (2019). Optimization of Ranque-Hilsch VortexTube Integrated Vapor Compression Cooling Cycle by EATWOS Modeling, *International Congress on Afro - Eurasian Research V*, 19-22 April 2019, Nicosia, Cyprus. April 2019, Nicosia, Cyprus.
- [29] Senturk Acar, M., Arslan O., (2019). Optimization of Ranque-Hilsch Vortex Tube Integrated Drying System by EATWOS, *International Congress on Afro - Eurasian Research V*, 19-22 April 2019, Nicosia, Cyprus.
- [30] Peters, M. L., Zelewski. S., (2006). Efficiency analysis under consideration of satisficing levels for output quantities. *Proceedings of the 17th Annual Conference of the Production and Operations Management Society – Operations Management in the New World Uncertainties*, CD-ROM-Proceedings, April 28-May 1, Boston (Mass.), USA.
- [31] Peters, M. L., Zelewski. S., (2016). Benefits and Risks of Satisficing Levels for Input and Output Quantities in Efficiency Analyses from A Corporate Social Responsibility Perspective. *International Journal of Management and Sustainability*, Vol. 5, No. 12, 94-101.
- [32] Peters, M. L., Zelewski S., (2018). Some Thoughts on Operationalizing The Concept of Sufficiency in Efficiency Analysis. *International Journal of Management and Sustainability*, Vol. 7, No. 1, 63-71.