

RÜZGÂR VE YÜK BELİRSİZLİĞİ ALTINDA RİSK TEMELLİ STOKASTİK ÜRETİM VE İLETİM PLANLAMASI

Osman Altun¹, Engin Karatepe²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye

²Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

ÖZET

Yük artışı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke katılım oranının sürekli arttığı günümüz koşullarında üretim ve iletim güç sisteminin olasılıksal yaklaşım ile planlanmasının önemi de artmaktadır. Bu çalışmada yük ve rüzgâr enerjisi üretimi belirsizliğinin göz önünde bulundurulduğu bir üretim ve iletim planlaması modeli ortalama örnekleme yaklaşımı ile stokastik problemin doğrusal programlamaya uygun deterministik eşleniği oluşturularak sunulmuştur. Risk metriği olarak Koşullu Riske Maruz Değer (Conditional Value at Risk - CVaR) kullanılmış ve farklı risk seviyeleri altında planlama sonuçları elde edilmiştir. Üretim ve iletim planlamasında risk yönetimi için CVaR kullanımının yatırım kararlarına olan etkisi irdelenerek incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Güç sistemleri, planlama, optimizasyon, stokastik, risk, rüzgâr

I. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte elektrik şebekeleri son yıllarda büyük bir dönüşüm içerisinde. Bu değişimin itici gücünde geleneksel yakıt tüketiminin sebep olduğu iklim değişimi ve sıfır karbon hedefleri önemli bir rol oynamaktadır [1]. Elektrik üretiminde her yıl daha ekonomik ve ulaşılabilir olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı istenmeyen emisyonların azaltılmasında önemli bir rol üstlenmekle birlikte, bu teknolojiler şebeke planlanması ve işletilmesinde yeni zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, çıkış gücü hava koşullarına bağlı olarak değişen rüzgâr ve fotovoltaik enerji kaynaklarının yüksek katılım oranlarında şebekeye entegrasyonu söz konusu olduğunda, bu sistemlerin daha itinalı ve olasılıksal davranışlarını yansıtan modeller eşliğinde planlanması gerekliliği güncel bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır [2].

Geleneksel bakış açısında güç sistemi planlama yatırımları gelecekte öngörülen yük miktarının artışına göre belirlenir [3]. Son yıllarda yükteki belirsizliklerin üstüne yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizliklerinin de eklenmesi planlama probleminin çözümünde hesaplama zorluğu ve izlenebilirlik gibi önemli hususların da göz

önüne alındığı yeni yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, yükün güvenilir bir şekilde karşılanabildiği ve bununla birlikte olasılıksal durumlar göz önüne alınarak risklerin nicel verilere dönüştürülerek şebeke yatırım kararlarının değerlendirilebildiği planlama çalışmaları gerekmektedir [4]. İletim ve üretim planlaması daha önceki çalışmalarda çoğunlukla ayrı ayrı ele alınmıştır. Bazı araştırmalarda iletim ve üretim planlamasının bir arada yapılarak daha optimal sonuçlara ulaşılacağı belirtilmektedir [5]. Bu çalışmada da üretim ve iletim planlaması bir arada ele alınacaktır. İletim sisteminin yetersizliği nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketim noktalarına tam olarak iletilmemesi kaçınılmazı gereken önemli bir durumdur. İletim planlamasının bu nedenle üretim planlamasıyla bir arada yapılması daha da önem kazanmaktadır. İletim sistemi planlamasında üretim yatırımlarının proaktif yaklaşımla göz önünde bulundurulması da diğer önemli bir konudur. Bu noktada, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli ve belirsiz doğaları bu planlama yaklaşımının çözümünde geleneksel yöntemlerin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bilgisayar donanım altyapısının gelişimi bu tip planlama problemlerinin çözümünü kolaylaştırır da, büyük ölçekli bazı problemlerin çözülmesine yönelik araştırmalar güncelliğini korumaktadır. Bu nedenle, bilgisayar

kapasitesinin doğru ve etkin kullanılması problemin izlenebilir bir şekilde çözülmesi için önem kazanmaktadır.

Uzun vadeli ve yüksek maliyetli olan güç sistemleri planlanması sürecinde risk yönetiminin de göz önünde bulundurulması karar süreçlerinde planlamacılar açısından diğer önemli bir problemdir. VaR (value at risk) sıklıkla kullanılan bir risk ölçüm metodu olmakla birlikte konveks olmaması ve doğrusal programlamada kullanımının zorluğundan dolayı alternatif bir risk değerlendirme metriği olan Koşullu Riske Maruz Değer (Conditional Value at Risk - CVaR) kullanımı yaygınlaşmıştır [6]. Bu çalışmada, CVaR metriği risk temelli modelin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Belirsizlik içeren koşullarda üretim ve iletim planlaması literatürde farklı yaklaşımlar ile yapılabilmektedir. Referans [7]'de iletim kapasitesinin yetersizliği nedeniyle rüzgâr enerjisinin kısılmasını azaltmak için risk tabanlı bir iletim genişleme planlama modeli sunulmuştur. Referans [8]'de yük, rüzgâr ve N-1 beklenmedik durum belirsizlikleri altında iletim hatlarındaki ve bara gerilimlerdeki ihlaller şans kısıtlı model kullanılarak iletim hattı yatırım kararları risk perspektifinden analiz edilmiştir. Bir başka çalışmada [9], iletim sistemlerini ve dağıtılmış enerji kaynaklarını dikkate alan iki aşamalı bir stokastik planlama modeli sunulmuştur. Referans [10]'da iletim ve üretim birimlerinin birlikte ele alındığı ve yüksek riskli beklenmedik durumları dikkate alan risk tabanlı dinamik bir planlama modeli önerilmiştir. Referans [11]'de rüzgâr enerjisinin de dahil edildiği elektrik şebekelerinde hem uzun hem de kısa vadeli belirsizlikleri göz önünde bulunduran bir üretim ve iletim genişleme planlaması sunulmuştur. Referans [12]'de esneklik ve üretim kaynaklarının rampa yetenekleri de üretim ve iletim planlama modeline dahil edilmiştir. Reaktif güç planlamasının da yapılabilmesi adına [13]'te AC optimal güç akışına dayalı bir model önerilmiştir. Referans [14]'te Benders ayrıştırma algoritması kullanılarak güç sistemleri

planlamasında risk temelli bir yaklaşım sunulmuştur. Referans [15]'te iletim planlaması akıllı şebeke entegrasyonu ile birlikte koordineli olarak yapılmıştır. Son yıllarda referans [16]'daki gibi depolama sistemleri de iletim planlamasına entegre edilebilmektedir.

Bu çalışmada, rüzgâr ve yük belirsizlikleri olasılık dağılım fonksiyonları aracılığıyla modellenmiş ve ortalama örnekleme yaklaşımı ve Monte Carlo Simülasyonu ile elde edilen örneklemler deterministik eşlenik oluşturulmasında kullanılmıştır. Oluşturulan tam sayılı doğrusal programlama problemi Gurobi ortamında çözülmüştür.

II. PROBLEMİN TANIMLANMASI

Üretim ve iletim planlamasının amacı gelecekteki yük ve üretim artışına uygun optimum yatırım kararlarının verilmesidir. Risk temelli stokastik tam sayılı doğrusal programlama modeli aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$\min (1 - \beta)E_w \{C_{inv} + C_{oper}^w\} - \quad (1)$$

$$\beta(\xi - (1/(1 - \alpha))E_w\{\eta_w\})$$

$$C_{inv} = \sum_c I_c^c p_c^{cmax} + \sum_{l \in \Omega^{L+}} I_l^l x_l^l \quad (2)$$

$$C_{oper}^w = \rho(C_g^E p_{gw}^E + C_c^C p_{cw}^C + C_c^{LS} p_{dw}^{LS}) \forall \omega \quad (3)$$

s.t.

$$0 \leq p_c^{cmax} \leq \bar{p}_c^{cmax} \quad \forall c \quad (4)$$

$$x_l^l \in \{0,1\} \quad \forall l \in \Omega^{L+} \quad (5)$$

$$\sum_c I_c^c p_c^{cmax} \leq I^{cmax} \quad (6)$$

$$\sum_{l \in \Omega^{L+}} I_l^l x_l^l \leq I^{Lmax} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{g \in \Omega_n^E} p_{g\omega}^E + \sum_{c \in \Omega_n^C} p_{c\omega}^C + \sum_{w \in \Omega_n^W} p_{w\omega}^C \\ & - \sum_{ls(l)=n} p_{l\omega}^L + \sum_{lr(l)=n} p_{l\omega}^L \\ & = \sum_{d \in \Omega_n^D} (p_{d\omega}^{Dmax}(\xi) \\ & - p_{d\omega}^{LS}) \quad \forall \omega, \forall n \end{aligned} \quad (8)$$

$$-F_l^{max} \leq p_{l\omega}^L \leq F_l^{max} \quad \forall \omega, \forall l \quad (9)$$

$$p_{l\omega}^L = B_l(\theta_{s(l)\omega} - \theta_{r(l)\omega}) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \forall \omega, \forall l \setminus l \in \Omega^{L+} \\ -x_l^L F_l^{max} \leq p_{l\omega}^L \leq x_l^L F_l^{max} \\ \forall \omega, \forall l \in \Omega^{L+} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} -(1 - x_l^L)M \leq p_{l\omega}^L - B_l(\theta_{s(l)\omega} - \theta_{r(l)\omega}) \\ \leq (1 - x_l^L)M \\ \forall \omega, \forall l \in \Omega^{L+} \end{aligned} \quad (12)$$

$$0 \leq p_{c\omega}^C \leq p_c^{Cmax} \quad \forall \omega, \forall c \quad (13)$$

$$0 \leq p_{w\omega}^C \leq P_{w\omega}^{Cmax}(\xi) \quad \forall \omega, \forall w \quad (14)$$

$$0 \leq P_{g\omega}^E \leq P_g^{Emax} \quad \forall \omega, \forall g \quad (15)$$

$$0 \leq P_{d\omega}^{LS} \leq P_{d\omega}^{Dmax}(\xi) \quad \forall \omega, \forall d \quad (16)$$

$$-\pi \leq \theta_{n\omega} \leq \pi \quad \forall \omega, \forall n \quad (17)$$

$$\theta_{n\omega} = 0 \quad n: ref \quad \forall \omega \quad (18)$$

$$\xi + C_{inv} + C_{oper}^w \leq \eta_w \quad \forall \omega \quad (19)$$

$$\eta_w \geq 0 \quad \forall \omega \quad (20)$$

Modelin amaç fonksiyonunda maliyet minimize edilirken senaryoların gerçekleşme olasılığının modellenmesi amacıyla CVaR metriği kullanılmıştır. Burada β değişkenine 0 verildiğinde risk göz önünde bulundurulmazken, 0 ile 1 arasında değerler verilerek alınacak risk düzeyi artırılıp azaltılabilmektedir. Güven aralığı α değişkeni ile ifade edilmekte ve 0.85, 0.90, 0.95 gibi tipik değerler kullanılabilir. Her ikisi de saat başına maliyet olmak üzere C_g^E mevcut jeneratörlerin üretim maliyeti, C_c^{LS} yük atma maliyetidir. I_c^C yıllık yeni jeneratör I_l^L yeni iletim hattı yatırım maliyetidir. $p_{g\omega}^E$ mevcut jeneratörlerin üretim miktarıyla ilgili karar değişkeniyken, $p_{d\omega}^{LS}$ her senaryo için yük atma miktarıdır. N üretilen örneklem sayısı olup ρ yıllık yatırım maliyeti ile operasyon maliyetini eş baza getirmek için kullanılan katsayıdır. x_l^L yeni iletim hattı yatırımı için ikili tipteki karar değişkenidir. Ω^{L+} aday iletim hatlarını içeren kümedir. $p_{c\omega}^C$ konvansiyonel aday jeneratörlerin her senaryodaki üretimi p_c^{Cmax} üst limitiyle sınırlıdır. $p_{w\omega}^C$ her senaryodaki aday rüzgar enerji üretimidir ve rastgele bir değişken olan rüzgar kapasitesi $P_{w\omega}^{Cmax}(\xi)$ ile limitlidir. $p_{d\omega}^{Dmax}(\xi)$ rastgele bir değişken olup her senaryo için farklı farklı üretilmiş maksimum yük miktarıdır. I^{Cmax} ve I^{Lmax} jeneratör ve iletim hattı yatırım bütçesidir. F_l^{max} iletim

hattı limiti, P_g^{Emax} mevcut jeneratörlerin üretimi için maksimum değerleri tanımlamaktadır. (19) ve (20) numaralı eşitlikler CVaR metriğinin amaç fonksiyonuna eklenebilmesi için modelde kullanılması gereken kısıt fonksiyonlarıdır.

III. BELİRSİZLİĞİN VE RİSKİN MODELLENMESİ

Ortalama örnekleme yaklaşımı (sample average approximation) stokastik optimizasyon problemlerinde yaklaşık sonuçlara ulaşmakta yaygınlıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada, doğrusal programlamada kullanılmak üzere olasılık dağılım fonksiyonlarından faydalanılarak Monte Carlo örnekleme yöntemi ile senaryolar oluşturulmuştur. Bu yaklaşım ile olasılık yoğunluk fonksiyonu sınırlı sayıda noktalarda ayrıklaştırılarak deterministik eşlenik elde edilir. Bu bağlamda, çeşitli yöntemler kullanılarak sonuçlar istatistiksel olarak yorumlanabilir ve karar vermede kullanılabilir anlamlı sonuçlar elde edilebilir. Optimizasyon problemi her biri N boyutunda bağımsız örneklemelerin üretilmesi yoluyla çözülebilmektedir.

$\xi \in \mathbb{P}$ olasılığa sahip rastgele vektör kümesi, $X \subset \mathbb{R}^d$ ve ξ_i ξ 'nin örneklemelerinden biriyken $\mathbb{P}_N(\xi = \xi_i) = \frac{1}{N}$ şekline ifade edilebilir.

$$\min_{x \in X} f(x) = \mathbb{E}[F(x, \xi)] \quad (21)$$

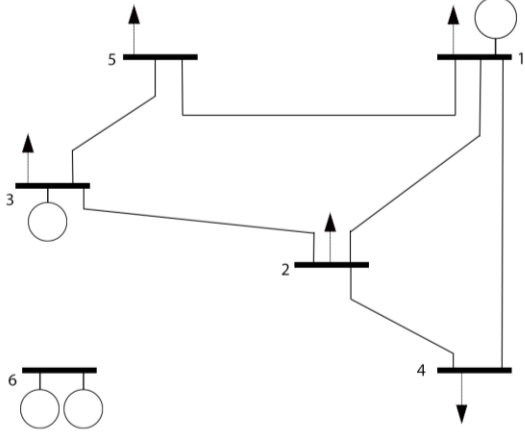
(21)'de ifade edilen özgün bir optimizasyon problemi N örneklem boyutuna sahip ise amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \min_{x \in X} \hat{f}_N(x) &= \mathbb{E}_{P_N}[F(x, \xi)] \quad (22) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(x, \xi_i^m); \\ m &= 1, 2, \dots, M \end{aligned}$$

Bu çalışmada, bu yaklaşım ile olasılık dağılım fonksiyonlarından örneklemeler elde edilecektir. Bu kapsamda, yük belirsizliği için normal dağılım, rüzgâr belirsizliği için Weibull dağılımı kullanılmıştır.

IV. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

İletim-üretim genişleme planlaması modeli Şekil 1’de gösterilen Garver test sisteminde uygulanmıştır. Bu sistemde 6 bara, 5 yük, 6 mevcut ve 15 aday iletim hattı, 2 mevcut konvensiyonel, bir aday konvensiyonel ve bir aday rüzgâr santrali bulunmaktadır.



Şekil 1. Garver Test Sistemi

Bu çalışmada, yükler için kullanılan normal dağılımın iki spesifik parametresi 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı baralar için ortalama ve standart sapması sırasıyla [0.4922, 1.4765, 0.2461, 0.9843, 1.4765] ve [0.0122, 0.1098, 0.0031, 0.0488, 0.1098] şeklindedir. Diğer taraftan Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametreleri 2.7 ve 5.4’tür. Spesifik bir rüzgâr türbininin karakteristik denklemi (23)’te verilmiştir. Türbin karakteristik değerleri V_{ci} , V_{co} , V_{rate} ve P_{rate} sırasıyla 3 m/s, 15 m/s, 5 m/s ve 3.0 pu, olarak kabul edilmiştir.

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq V \leq V_{ci} \\ P_{rate}(V - V_{ci}) / (V_{rate} - V_{ci}) & V_{ci} \leq V \leq V_{rate} \\ P_{rate} & V_{rate} \leq V \leq V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq V \end{cases} \quad (23)$$

1 ve 3 numaralı baralarda bulunan mevcut konvensiyonel jeneratörlerin üst limitleri 2.25 ve 5.40 pu olarak kabul edilmiştir. Üretim maliyetleri 10 \$/MWh and 25 \$/MWh şeklindedir. Yük atma maliyetleri 120 \$/MWh olarak kabul edilmektedir. 6. barada bulunan maksimum aday konvensiyonel üretim kapasitesi 5.0 pu, yatırım maliyeti 550000

\$/MW ve üretim maliyeti 30 \$/MWh olarak kabul edilmiştir. Maksimum 3.0 pu değerindeki ve üretim maliyeti olmadığı kabul edilen aday rüzgâr santrali 6. barada bulunmaktadır.

Mevcut ve aday iletim hatlarının bilgileri Tablo 1’de verilmektedir.

TABLO I
İLETİM HAT BİLGİSİ

Hat No	Başl. bara	Bitiş bara	B (pu)	F_{max} (pu)	Yatırım Maliyeti [\$ 10000]
l_1	1	2	2.500	1.44	40
l_2	1	4	1.66	1.20	60
l_3	1	5	5	1.44	20
l_4	2	3	5	1.44	20
l_5	2	4	2.5	1.44	40
l_6	3	5	5	1.44	20
l_7	1	3	2.6315	1.44	38
l_8	1	6	1.470	1.20	68
l_9	2	5	3.225	1.44	31
l_{10}	2	6	3.33	1.44	30
l_{11}	3	4	1.6949	1.44	59
l_{12}	3	6	2.083	1.44	48
l_{13}	4	5	1.587	1.14	63
l_{14}	4	6	3.33	1.44	30
l_{15}	5	6	1.639	1.176	61

Bu çalışmada iki farklı çözüm yaklaşımı sunulacak ve karşılaştırılacaktır. İlk yaklaşım yüksek boyutlu örneklem kullanılarak çözüm elde etmek, ikinci yaklaşım çok sayıda düşük boyutlu bağımsız örneklem üretmek şeklindedir. Optimizasyon çalışmaları farklı risk seviyeleri ve güven aralıkları için gerçekleştirilecektir.

TABLO II
OPTİMİZASYON SONUÇLARI N=1000
GÜVEN ARALIĞI (α) = 0.95

	β	Temel Yük	1.5x	2x
Toplam maliyet	$\beta = 0$	735212,02	1609143,52	3107623,96
	$\beta = 0.5$	813664,67	1679145,59	3327285,11
	$\beta = 1$	867108,93	1716466,12	3475495,97
İletim Hatları	$\beta = 0$	-	l_4	l_4, l_6, l_{14}
	$\beta = 0.5$	-	l_4, l_6	l_4, l_6, l_{10}
	$\beta = 1$	-	l_4, l_6	l_4, l_6, l_{14}
Üretim Kapasite Yatırımı	$\beta = 0$	-	-	1,0116
	$\beta = 0.5$	-	-	1,3592
	$\beta = 1$	-	-	1,4056

Tablo II’de $N = 1000$ örneklem boyutuyla problemin sonuçları farklı β ve yük koşulları altında özetlenmiştir. $\beta = 0$ riskin yok sayıldığı sonuçlarken, bu değer artırıldığında operasyon maliyetindeki düşük olasılıklı kötümser senaryolar optimizasyon problemine belirlenmiş bir güven ağırlığıyla eklendiği için maliyetin arttığı, daha fazla iletim hattı veya üretim kapasitesine yatırım yapıldığı gözlemlenmektedir.

Güvenilirlik seviyesinin sonuçlara etkisi $N=1000$ örneklem boyutu, $\beta = 1$ durumu ve yükün iki katına çıktığı koşullar için Tablo III’te özetlenmiştir.

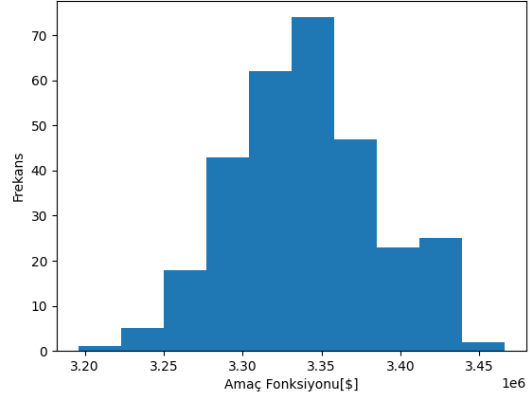
TABLO III
OPTİMİZASYON SONUÇLARI $N=1000$

	Güvenilirlik Seviyesi	2xYük
	$\alpha = 0,75$	3356795,80
Toplam maliyet	$\alpha = 0,85$	3410214,46
	$\alpha = 0,95$	3473921,27
	$\alpha = 0,75$	l_4, l_6, l_{10}
İletim Hatları	$\alpha = 0,85$	l_4, l_6, l_{10}
	$\alpha = 0,95$	l_4, l_6, l_{10}, l_{14}
	$\alpha = 0,75$	1.3913
Üretim Kapasite Yatırımı	$\alpha = 0,85$	1.3688
	$\alpha = 0,95$	1.9466

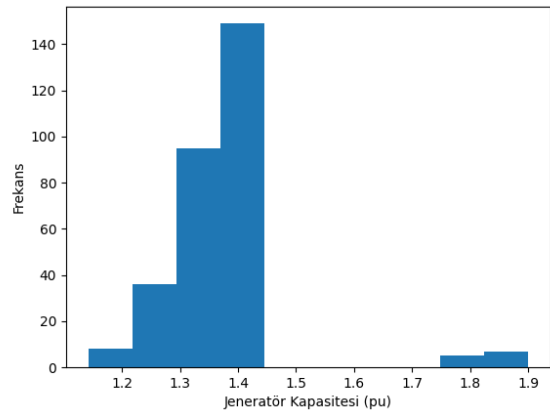
Güvenilirlik seviyesinin artırılması daha kötü olasılıklı üretim maliyetlerinin hesaba katılması nedeniyle maliyet, iletim hattı ve kapasite yatırım miktarını artırdığı sonuçlardan gözlemlenebilmektedir.

Son olarak örnekleme yönteminin sonuçlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi adına daha küçük boyutta ama sayıca fazla örneklem ile bir çözüm kümesi elde edilmiştir. Maliyet sonuçları Şekil 2’de histogram şeklinde sunulmuştur. Sonuçların ortalamasının belirli bir değere yakınsadığı gözlemlenmiştir. Bu yakınsanan değerler daha büyük boyutlu örneklem kullanıldığında elde edilen değerler ile uyumlu olduğu görülebilmektedir. Örneklem sayısı düşük olduğunda problem boyutu daha küçük olduğundan optimizasyon daha hızlı çözüme ulaşılabilen ve çok sayıda çözümün bulunarak istatistiksel olarak

yorumlanabilecek bir sonuç kümesi elde edilebilmektedir. Şekil 2’de yükün iki katına çıktığı, $\beta = 1$, $\alpha = 0.75$ durumu için toplam maliyet ve Şekil 3’te aynı koşullar için üretim kapasitesi yatırımının histogramı görülmektedir.



Şekil 2. Maliyetler ($N = 1000$ $M=300$)



Şekil 3. Jeneratör kapasiteleri

V. SONUÇ

Bu üretim ve iletim planlaması çalışmasında stokastik programlamada kullanılan önemli yöntemlerden birisi olan ortalama örnekleme yaklaşımı ve riskin yönetilebilmesi için CVaR metriği kullanılmıştır. Örneklem boyutu artırıldıkça belirsizlik koşulları daha iyi betimlenebilirken, bu örneklem sayısını artırmak problemin boyutunu çok fazla artırdığından dolayı bilgisayar işlemcilerinin kapasitelerinin zorlanmasına ve hatta bazı problemlerin çözülememesine sebep olmaktadır. Bu nedenle alternatif bir yöntem olarak boyutu küçük daha çok sayıda

örneklem ile elde edilen çözüm kümeleri elde edilerek yatırım kararları istatistiksel olarak yorumlanabilmektedir. Sonuç olarak sunulan yöntemin yük ve rüzgâr enerjisindeki belirsizlikler altında risk derecesi belirlenerek üretim ve iletim planlamasının yatırım kararlarının alınmasında alternatif bir yaklaşım olarak kullanılabilceği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar ilave hat ve kapasite yatırımları için üretim ve iletim planlamasında daha düşük olasılıklı senaryoların da kapsandığı optimum sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir.

REFERANSLAR

- [1] Breyer C., Khalili S., et al. "On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research." *IEEE Access* 10 (2019).
- [2] Gonzalez-Romero I.C., Wogrin S., and Gómez T. "Review on generation and transmission expansion co-planning models under a market environment." *IET Generation, Transmission & Distribution* 14 (2020): 931-944.
- [3] Garver Len L. "Transmission network estimation using linear programming." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 7 (1970): 1688-1697.
- [4] Zakaria A., Ismail F.B., et al. "Uncertainty models for stochastic optimization in renewable energy applications." *Renewable Energy* 145 (2020): 1543-1571.
- [5] Conejo A. J., Carrión M., and Morales J.M. "Decision making under uncertainty in electricity markets". Springer, 2010.
- [6] Rockafellar R. T. and Uryasev S. "Optimization of conditional value-at-risk." *Journal of Risk* 2 (2000): 21-41.
- [7] Liu D., Zhang S., et al., "Reducing wind power curtailment by risk-based transmission expansion planning" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 124 (2021).
- [8] Mir G.B. and Karatepe E., "Stochastic AC Transmission Expansion Planning: A Chance Constrained Distributed Slack Bus Approach With Wind Uncertainty" *IEEE Access* 10 (2022).
- [9] Ranjbar H., Hosseini S.H., et al., "Resiliency-Oriented Planning of Transmission Systems and Distributed Energy Resources" 36 (2021): 4114- 4125.
- [10] Mehrtash M. and Kargarian A., "Risk-based dynamic generation and transmission expansion planning with propagating effects of contingencies" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 118 (2020).
- [11] Ahmadi S., Mavalizadeh H., et al., "Dynamic robust generation-transmission expansion planning in the presence of wind farms under long- and short-term uncertainties" *IET Renewable Power Generation* 14 (2020): 5418-5427.
- [12] Jia L., Liu F., et al. "Robust coordinated transmission and generation expansion planning considering ramping requirements and construction periods." *IEEE Transactions on Power Systems* 33.1 (2018): 268-280.
- [13] Zhang H., Cheng H., et al., "Coordination of generation, transmission and reactive power sources expansion planning with high penetration of wind power," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 108 (2019): 191-203.
- [14] da Costa L. C., Thome F.S., et al. "Reliability-constrained power system expansion planning: A stochastic risk-averse optimization approach." *IEEE Transactions on Power Systems* 36 (2021): 97-106
- [15] Moradi-Sepahvand M., Amraee T., et al. "Coordinated expansion planning of transmission and distribution systems integrated with smart grid technologies." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 147 (2023).
- [16] Gan W., Ai X., et al. "Security constrained co-planning of transmission expansion and energy storage." *Applied Energy* 239 (2019): 383-394.