

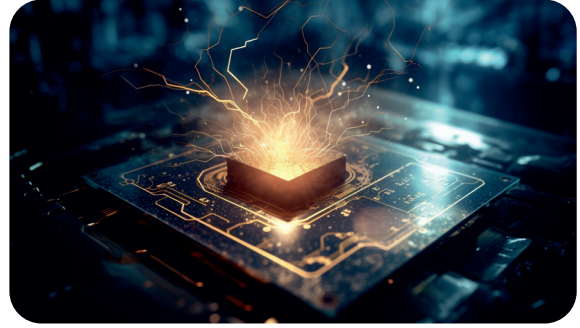
ELEKTRİĞİN YENİ ÇAĞI

Doğukan Yurttaş
Elektrik Mühendisleri Odası Müdürü
dogukan.yurttas@emo.org.tr

Son birkaç yılda elektrik şebekesinin üzerine binen yük sadece niceliksel bir artıştan ibaret değil niteliksel bir dönüşümü de içeriyor. Elektrik talebinde yaşanan sıçrama, yalnızca toplam tüketimin artmasıyla değil, bu tüketimin nerede, ne zaman ve nasıl gerçekleştiğiyle de tanımlanıyor artık. Veri merkezleri, yapay zekâ altyapıları, elektrikli araçlar ve 7/24 çalışan dijital sistemler, klasik yük profillerinin öngörücü gücünü törpüleyen, kesintisiz ve ani tepki isteyen talepler yaratıyor. Bu taleplerin yönetilebilmesi için üretim, iletim ve dağıtım altyapılarında da köklü değişiklikler gerekiyor.

Meslektaşlarımız yüzyılı aşkın süre boyunca büyük ölçekli, yukarıdan aşağıya planlanan ve öngörülebilir talebe göre şekillenen bir şebeke inşa etti. Ancak yeni talep biçimleri, bu mühendislik mirasını sınırlarına kadar zorluyor. Örneğin, yapay zekâ veri merkezlerinin elektrik talebi, konut veya sanayi tüketiminden farklı olarak sürekli ve yoğun bir yük yaratıyor. Elektrikli araçlar ise ulaştırma sektörünü yeniden şekillendirirken, şehir içi şarj altyapılarında saatlik yük yığılmalarına neden oluyor. Bu durum, talep eğrisinin uç noktalarında ani ve şiddetli değişimler yaratıyor.

Ne var ki bu dönüşüm yalnızca talep yönlü değil. Fosil yakıt temelli baz yük santrallerinin yerini



rüzgâr ve güneş gibi değişken kaynakların alması, sistem işletimini karmaşıktırırken; arzın öngörülemezliği, talebin değişkenliğiyle çarpan etkisi yaratıyor. Bir yandan termik santrallerin çevresel ve ekonomik sürdürülemezliği netleşirken, diğer yandan yenilenebilirlerin kesikli doğası karşısında yeterli dengeleme kapasitesi oluşturulamıyor. Yatırımlar ise, kamu planlamasının zayıfladığı ve özel sektörün kısa vadeli kârı öncellediği koşullarda, sistemsel ihtiyaçlar doğrultusunda değil, piyasa sinyalleriyle şekilleniyor.

Bu çifte yönlü dönüşümün içinde, elektrik şebekesi bir sıkışmışlık yaşıyor. Hem yukarıdan gelen yeni üretim modelleri hem aşağıdan gelen yeni tüketim alışkanlıkları ve biçimleri, iletim ve dağıtım altyapısının fiziksel ve kurgusal sınırlarını zorluyor. Bununla beraber trafodan kabloya, bataryadan invertere kadar sistem bileşenlerinde yaşanan tedarik krizleri, bu dönüşümü salt bir mühendislik problemi olmaktan çıkartıp yatırım ve sanayi politikalarıyla doğrudan ilişkilendiriyor.

Talep Cephesi

Elektrik şebekesi tarih boyunca endüstriyel üretim, konut kullanımı ve kamu hizmetleri gibi ana eksenlerde şekillenen talep kalıplarına göre biçimlendi. Ancak bugün yeni bir elektrik talebi biçimiyle karşı karşıyayız; değişken, yoğun, zaman



ve mekânda eşitsiz dağılmış, algoritmik kararlarla yönlendirilen ve sistem düzeyinde anlık etki yaratan bir biçim bu. Veri merkezleri ve yapay zekâ altyapıları, elektrikli araçlar ve soğutma sistemleri üzerinden şekillenen bu yeni yük profili, yalnızca tüketim miktarını değil, tüketim biçimini de dönüştürüyor. Talep artık statik değil, programlanabilir; yavaş yükselen değil, ani sıçrayışlar içeren bir karaktere sahip. Bu da mühendislik düzeyinde klasik tahmin yöntemlerini zorlarken, şebekenin tasarımı ve işletimi için köklü bir yeniden düşünme çağrısı yapıyor.

Yapay zekâ uygulamalarının yükselişi, veri işleme kapasitesine yönelik talebi katlanarak artırırken, bu talebin biçimi yeni bir yük karakteri yaratıyor. LLM'ler (büyük dil modelleri), görüntü işlemcili sinir ağları ve bu modellerin sürekli aktif eğitim süreçleri ile birlikte veri merkezleri dünya genelinde payı en hızlı büyüyen elektrik tüketicilerinden biri hâline geldi. Nitekim bazı tahminlere göre 2030'a kadar veri merkezlerinin küresel elektrik tüketiminden aldığı pay %4 ila %6'ya çıkacak; yapay zekâ temelli merkezlerde ise bu artışın daha fazla olacağını öngörmek mümkün.

Bu yük yalnızca yüksek hacimli değil bölgesel olarak da yığılmış bir nitelik taşıyor. Bu da klasik yük merkezlerinin tersine, yeni bir altyapı planlama biçimi dayatıyor: Şebeke, nüfustan çok işlemci yoğunluğuna göre şekillenmek zorunda kalıyor. Ayrıca bu sistemlerin ikincil bir enerji tüketici bileşeni de var; soğutma sistemleri.

Yüksek yoğunluklu işlemciler hem yüksek miktarda elektrik tüketiyor hem de ciddi ısı üretiyor. Bu nedenle yapay zekâ altyapısının soğutma ihtiyacı, doğrudan elektrik yüküne ek bir katman olarak yansıyor. Özellikle sıcak iklimlerde ve yaz aylarında şebeke tepe yüklerini artırıyor. Bu du-

rum aşırı sıcaklar ile bir araya geldiğinde çözüm için sıvı soğutma gibi seçenekler gündeme gelse de bu sistemlerin enerji talebi klasik sistemlere göre daha yüksek. Önümüzdeki yıllarda soğutma ihtiyacının elektrik talebinde en hızlı büyüyen kalemlerden biri olacağını söylemek mümkün. Soğutma sistemlerinin özellikle öğle saatlerinde tepe yükü oluşturmaması, güneş santrallerinin üretilmesiyle örtüşse de akşam saatlerinde devam eden yük talebi depolama ya da dengeleme ihtiyaçlarını artırıyor.

Bununla beraber ulaşım sektörünün elektrifikasyonu şarj altyapısı üzerinden elektrik sisteminin işleyişine doğrudan müdahil oluyor. EV (elektrikli araç) sayısındaki artış, sistem düzeyinde yeni bir yük türü yaratıyor. Zaman ve mekânda öngörülmesi güç, kümülatif etkisi yüksek ve senkronize şarj dalgalarına yol açan bir yük. Özellikle mesai çıkışı gibi belli saatlerde yaşanan ani şarj talepleri, şehir içi dağıtım trafolarında lokal gerilim düşüşlerine ve aşırı yüklenmelere neden olabiliyor.

Arz Cephesi

Elektrik talebindeki dönüşüm kadar, bu talebi karşılamaya aday üretim kaynaklarındaki değişim de sistemin doğasını baştan aşağı yeniden biçimlendiriyor. 2000'lerin başında hâlâ marjinal kabul edilen güneş ve rüzgâr enerjisi, artık küresel elektrik üretiminde ana eksen hâline geldi. Ancak bu dönüşüm yalnızca kaynak tipini değil, arzın mekânsal dağılımını, zamansal öngörülebilirliğini ve sistem esnekliği ihtiyacını da dönüştürüyor.

Güneş ve rüzgâr santralleri, 2020'li yıllarda dünya çapında rekor düzeyde kapasite artışı yaşadı. Örneğin sadece 2023 yılında kurulan güneş enerjisi kapasitesi 400 GW'ı aşarak tarihsel olarak kaydedilen en yüksek yıllık artışı gerçekleştirdi. Bugün birçok ülkede yenilenebilir üretim, kömür ve doğal





gazı geride bırakmaya başladı. Ancak bu büyüme, beraberinde teknik zorlukları ve sistem düzeyinde yeni sınamaları da getiriyor.

Güneş ve rüzgâr üretiminin doğası, konvansiyonel santrallere göre iki temel fark içeriyor. Bunlardan ilki üretim tahminlemesinin sınırlı oluşu, ikincisi ise üretim ile talebin örtüşmüyor oluşu. Özellikle öğle saatlerinde yaşanan güneş üretimi artışı, bazı ülkelerde “negatif fiyat” oluşumlarına yol açıyor. Bu durum, üretimin bolluğu karşısında sistemde arz fazlası oluştuğunu ve şebekenin bunu tüketemediğini gösteriyor. Birçok yerde güneş ve rüzgâr için üretimde kısıtlamaya gidilmek zorunda kalınıyor.

Yenilenebilir üretimin büyük kısmı, rüzgâr için kıyı bölgelerinde, güneş içinse yüksek güneşlenme sürelerine sahip iç kesimlerde kümeleniyor. Ancak bu bölgeler çoğu zaman yoğun tüketim merkezlerinden uzak. Mevcut haliyle bile büyük üretim sahalarından kentlere enerji taşıma kapasitesi açısından sınırlarına yaklaşmış durumda olan elektrik şebekesi bu mekânsal ayrışma ile yeni bir zorlukla karşılaşılıyor. Bu nedenle birçok ülkede “şebekeye bağlanmayı bekleyen proje stoku” büyüyor.

Yenilenebilir üretimin düzensizliği ise şebeke kararlılığı açısından “esneklik” başlığını öne çıkarıyor. Sistemler artık yalnızca toplam üretim miktarına değil, anlık arz-talep dengesine ve frekans kontrolüne daha bağımlı. Bu noktada klasik dengeleme araçları – gaz türbinleri, barajlı hidroelektrik gibi kaynaklar – yetersiz kalıyor. Ayrıca enerji ithalatı gibi dışa bağımlı esneklik kaynakları ise jeopolitik risklerle sınanıyor.

Bu durumda sistemlerin yeni bir esneklik mimarisi geliştirmesi gerekiyor. Bu mimarinin başlıca bileşenleri arasında kısa ve orta vadeli enerji depolama, talep tarafı yönetimi ve inverter tabanlı

grid-forming teknolojiler yer alıyor. Ancak bu teknolojilerin yaygınlaşması hâlâ sınırlı ve yatırım maliyetleri yüksek. Örneğin BESS (batarya enerji depolama sistemleri), sadece pil hücreleriyle değil, güç elektroniği, soğutma sistemleri ve yangın güvenliği gibi bir dizi bütünsel mühendislik çözümleri gerektiriyor.

Üstelik esnekliğin kendisi de bir planlama problemi hâline geliyor. Nerede, ne zaman, ne tür esnekliğe ihtiyaç duyulacağı önceden kestirilemiyor. Bu belirsizlik, enerji planlamasını deterministik olmaktan çıkarıp olasılıklı modellere doğru yönlendiriyor. Bir bakıma, üretim ve tüketim teoride artıyor ama kullanma kapasitesi sınırlı; ya da başka bir ifadeyle: “Kapasite devrimi, sistem darboğazına dönüştü.”

Ekipman Darboğazı

Enerji dönüşümünün yalnızca üretim veya talep tarafına değil, bu iki ucu birbirine bağlayan “altyapı katmanına” da dayandığı artık inkâr edilemez bir gerçek. Şebekeye entegre edilen her yeni rüzgâr türbini, her güneş paneli ve her elektrikli araç, altyapıda belirli türden bir donanımsal karşılık gerektiriyor; daha yüksek güçte trafolar, daha sofistike kontrol sistemleri, daha hızlı açma-kapama yapan anahtarlar devreleri vs. Ne var ki bu fiziksel altyapının kendisi, günümüz enerji dönüşümünün yeni darboğazı hâline gelmiş durumda. Çünkü donanım üretimi ve tedariki, enerjideki dönüşümün ve büyümenin hızına ayak uyduramıyor.

Enerji altyapısının omurgasını oluşturan trafolar, bugün küresel ölçekte hem arz hem teslimat süreleri bakımından ciddi bir darboğaz yaratıyor. Çoğu ülkelerde yeni trafolar için bekleme süresi 24 ayı geçmiş durumda. Türkiye’de de benzer şekilde OSB’lerde, RES-GES bağlantılarında ve

yeni sanayi yatırımlarında trafo temini hem ekonomik hem de takvimsel olarak yatırım kararlarını belirleyen en kritik unsur hâline geldi.

Bu krizin altında yatan nedenler ise çok katmanlı. Bir yanda artan bakır ve çelik fiyatları, diğer yanda ise trafo çekirdeği üretiminde sınırlı bir küresel kapasite var. Ayrıca trafo üreticileri pandemi sonrası dönemde üretim planlamalarını düşük taleplere göre yapmış; enerji dönüşümünün ivmesi bu öngörülerin çok ötesine geçince arz-talep uyumsuzluğu baş göstermiş durumda.

Daha önce bahsettiğim üzere güneş ve rüzgâr santrallerinin çoğu, şehirlerden uzak, ulaşımı zor bölgelerde konumlanıyor. Bu üretimin tüketim merkezlerine taşınabilmesi için kilometrelerce uzunlukta iletim/dağıtım hatları gerekiyor. Ancak iletim/dağıtım hatlarının kurulumu sadece mühendislik değil, aynı zamanda yer seçimi, kamulaştırma ve çevresel etki değerlendirmesi gibi bürokratik ve politik süreçleri de içeriyor. Öte yandan, bu projelerin fiziksel bileşenleri bakır ve alüminyum gibi metallerdeki küresel darboğazlardan doğrudan etkileniyor. Ayrıca kablo üretiminde kullanılan özel izolasyon malzemeleri ve yangına dayanıklı dış kılıflar da benzer tedarik zinciri sorunlarına sahip.

Enerji sistemlerinin dijitalleşmesi ve yenilenebilir üretimin inverter temelli olması, güç elektroniği bileşenlerini enerji altyapısının asli unsurlarından biri hâline getirdi. Ancak bu bileşenler büyük oranda birkaç ülkenin (özellikle Çin, Tayvan, Güney Kore) üretim tekeline dayanıyor. Jeopolitik risklerin ve ticaret savaşlarının bu üretim zincirlerini kırılganlaştırdığı bir dünyada, inverter veya güç kontrol ünitelerine erişim de kritik bir soruna dönüşüyor.

Özellikle grid-forming inverter gibi ileri teknoloji bileşenler, yalnızca üretim değil, aynı zamanda teknik bilgi birikimi açısından da birkaç merkezde yoğunlaşmış durumda. Kimi ülkeler, ileri inverter teknolojilerine sahip olsalar da onu şebeke yönetimiyle entegre edecek yazılım ve mühendislik kapasitesine sahip değil. Böylece sadece donanımsal değil, aynı zamanda kurumsal ve insan kaynağı temelli bir darboğaz oluşuyor.

Sonuç

Enerji sistemlerinin geleneksel planlama mantığı, yük tahminleri üzerine kuruluydu. Yani bugünden gelecekteki elektrik talebi kestirilir, bu talebi karşılayacak üretim yatırımları ve iletim-dağıtım altyapısı buna göre tasarlanır. Ancak bugün karşı karşıya kaldığımız tablo bu yaklaşımı temelden sarsıyor. Yazı boyunca ifade ettiğim üzere elektrik tüketimi artık doğrusal artmıyor; sektörel sıçramalar, coğrafi yoğunlaşmalar ve saatlik dal-

galanmalarla dolu. Yine eski sistemlerde üretim sabit, tüketim ise değişti. Termik santraller yük takibi yapar, talebe göre çalışırdı. Bugün ise üretim de değişken. Bu da üretim-tüketim dengesini anlık çözümlerle değil, esnek altyapılarla yönetmeyi gerektiriyor.

Karşı karşıya olduğumuz bu tablo, geleneksel mühendislik aklını kökten sarsıyor. Arzın ve talebin artmakla kalmadığı, mekânsal, sektörel ve zamansal olarak parçalara ayrıldığı bir dönemdeyiz. Bu kırılma yalnızca planlama yaklaşımlarını değil, mühendislik anlayışını da değiştiriyor.

Şebekenin geleceği, statik bir dengeye değil, dinamik bir esnekliğe bağlı. Bu esnekliğin inşası ise yalnızca teknik çözümlerle değil; yatırım planlaması, finansman modelleri, regülasyon yapıları ve donanım tedarik zincirlerinin de bu yeni gerçeğe uyarlanmasıyla mümkün olacak.

Bugün geldiğimiz eşik, yalnızca bir enerji dönüşümü değil, bir yönüyle de mühendislik dönüşümüdür. Bu dönüşüm, yalnızca teknolojik değil; aynı zamanda politik, iktisadi ve sınıfsal bir içerik de taşımaktadır. Çünkü elektrik şebekesinin nasıl planlanacağı, kimin için esneklik sağlanacağı ve hangi altyapıya öncelik verileceği soruları da cevaplanmayı beklemektedir. Yapay zekâ veri merkezlerinin taleplerini mi karşılayacağız, yoksa konut bölgelerinde temel enerji hakkını mı güvence altına alacağız? Elektrikli araçlara ultra hızlı şarj mı kuracağız, yoksa kırsal bölgelerde elektrik altyapısını mı sağlamlaştıracacağız? Bu sorular, mühendislik kadar politik tercihler meselesidir.

Sonuç olarak, elektriğin yeni çağı; sadece yüksek teknolojiyle değil, yüksek “gerilimli” kararlarla da şekilleniyor ve bu kararların mühendislik pratiğiyle uyumlu, toplumsal faydayla örtüşen ve ekolojik gerçeklikleri gözetken bir şekilde alınması, geleceğin enerji sistemlerinin adil ve sürdürülebilir olmasını belirleyecek temel faktörlerden biri olacak.

