

ANALİZ

ÇİP SAVAŞLARI

VE

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ

Dr. Celal Erbay

OCAK 2026



Milli İstihbarat Akademisi

ÇİP SAVAŞLARI VE NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ

Dr. Celal Erbay

ANALİZ / OCAK 2026





Telif
Millî İstihbarat Akademisi © 2026
Ankara - TÜRKİYE

Yayın Tarihi: Ocak 2026

Bu çalışmaya ait içeriğin telif hakları Millî İstihbarat Akademisine ait olup 5846 Sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu uyarınca kaynak gösterilerek kısmen yapılacak makul alıntılar dışında, hiçbir şekilde önceden izin alınmaksızın kullanılamaz, yeniden yayımlanamaz.

Millî İstihbarat Akademisi

E-Posta: bilgi@mia.edu.tr

"Bandrol Uygulamasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 5'inci maddesinin 2'nci fıkrası çerçevesinde bandrol taşıması zorunlu değildir."

ANALİZ / Ocak 2026

ÇİP SAVAŞLARI VE NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ

İÇİNDEKİLER

YÖNETİCİ ÖZETİ	5
GİRİŞ	7
ÇİP EKOSİSTEMİ	10
ABD VE ÇİN ARASINDAKİ ÇİP REKABETİ	17
KRİTİK HAM MADDE VE NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN STRATEJİK ÖNEMİ	23
SONUÇ VE TÜRKİYE İÇİN ÖNERİLER	30
KAYNAKÇA	34

İFOGRAFİK

İnfografik 1: Çiplerin Kullanıldığı Bazı Alanlar.....	7
İnfografik 2: Yarı İletken Tedarik Zinciri Aşamaları.....	11
İnfografik 3: 2024 Sonu İtibarıyla Çip Üretim Net Gelirinin Dağılımı.....	13
İnfografik 4: Süreç Düğümlerinin Gelişimi (2014-2027)	14
İnfografik 5: Yarı İletken Değer Zincirinde Coğrafi Uzmanlaşma.....	15
İnfografik 6: Son 10 Yılda Yaşanan Çip Savaşının Zaman Çizelgesi.....	22

FOTOĞRAF

Fotoğraf 1: Çip Üretimine Yapıldığı Bir Dökümhane	12
Fotoğraf 2: Hollanda Merkezli ASML'nin Ürettiği Aşırı Ultraviyole Litografi Makinesi.....	15

HARİTA

Harita 1: TSMC, Samsung ve Intel'in Dökümhane Tesisleri	16
Harita 2: ABD'de Yarı İletken Sektöründe Yatırım Yapılması Planlanan Eyaletler ve Bütçeleri.....	18
Harita 3: Çin Eyaletlerindeki Dökümhane Sayıları.....	20
Harita 4: Dünyada Nadir Toprak Elementleri Rezervleri	25

TABLO

Tablo 1: Nadir Toprak Elementlerinin Çip Teknolojisinde Kullanım Alanları ve Katkıları	24
---	----

GRAFİK

Grafik 1: Çip Üretiminde Öne Çıkan Kritik Ham Maddelerin Dünyada Önde Gelen Üretici Ülkeleri ve Oranları.....	27
--	----

YÖNETİCİ ÖZETİ

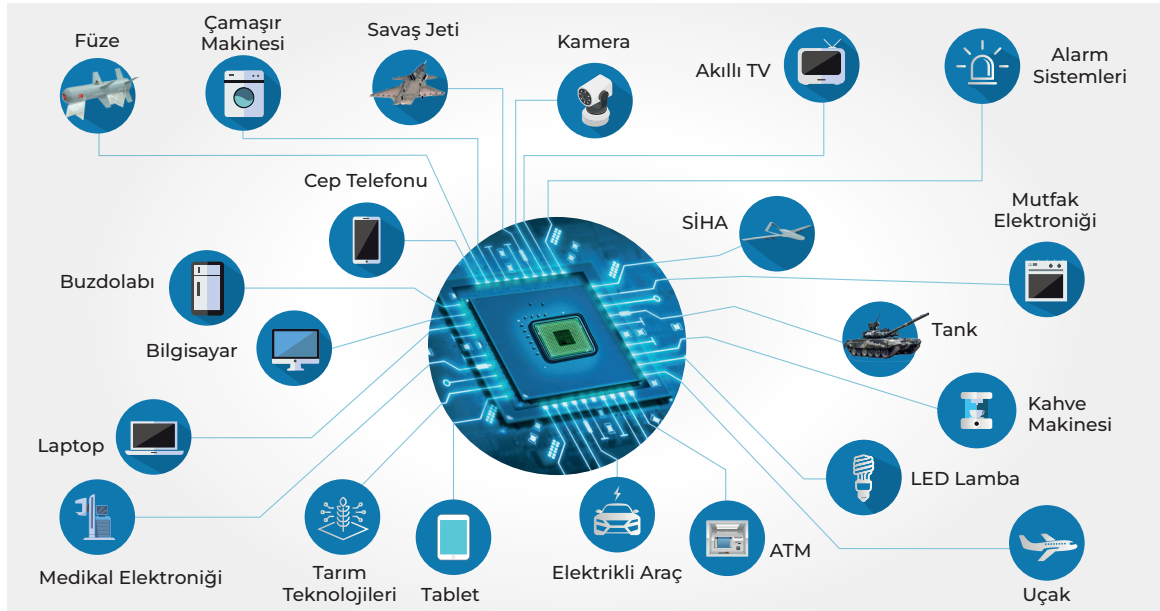
- Teknolojinin görünmez altyapısı olan çipler; telefonlardan savunma sistemlerine kadar birçok alanda kritik rol oynamaktadır. Bu nedenle çip konusu, ekonomik rekabet kadar ulusal güvenlikle de doğrudan ilgilidir.
- Çip üretimi, doğrusal bir hat olarak çalışmamaktadır. Tasarım, üretim, paketleme ve test adımları birbirine bağlı olup bir adımda alınan karar, diğer adımların nasıl ilerleyeceğini belirlemektedir. Bu nedenle süreç, iyi kurulan bir iş birliği ve güçlü bir koordinasyon gerektirmektedir.
- Çip ekosistemi, belirli ülkelerde yoğunlaşmıştır. Tasarımda, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) öne çıkarken üretimde, Tayvan ve Güney Kore kritik konumdadır. Üretim makineleri tarafında, Hollanda ve Japonya belirleyici rol oynamaktadır. Montaj ve paketleme tarafında ise Çin'in ağırlığı yüksektir. Bu tablo, verimlilik sağlasa da ülkeler arasında bağımlılıkları artırmaktadır.
- Çok pahalı ve hassas bir süreç olan çip üretiminde, hata toleransı oldukça düşüktür. Üretimdeki küçük bir sapma dahi verimi düşürerek maliyeti yükseltir ve teslimat planlarının uzamasına sebep olur. Dolayısıyla üretim kapasitesi kadar istikrarlı ve kaliteli üretim yapabilmek de önemlidir.
- Talep tarafında özellikle son dönemde, yapay zekâ ile veri merkezlerinin çip ihtiyacı dikkat çekmektedir. Bu alanlar, yüksek performans ve verimlilik gerektirdiğinden beklentiler de buna paralel olarak artmaktadır. Otomotiv elektroniği ve güç odaklı çipler de yükselen ikinci bir talep alanını oluşturmaktadır. Elektrikli araçlar ve enerji dönüşümü, bu artışı hızlandırmaktadır.
- 2020-2023 döneminde yaşanan küresel çip krizi, sistemin ne kadar kırılgan olabileceğini göstermiştir. Otomotiv sektörü, ilk dönemde siparişleri azalttığından toparlanma sürecinde çip bulmakta zorlanmıştır. Bu süreç, küçük bir çipin büyük sistemleri nasıl durdurabildiğini somut biçimde ortaya koymuştur.
- ABD, 2022'de yürürlüğe giren Çip Üretimini Teşvik ve Bilim Yasası ile ülke içindeki üretim ve AR-GE gücünü artırmayı hedeflemektedir. Stratejik amaç sadece çip üretimi yapmak değil; bilgi birikimini, standartları ve kritik alanlardaki yetkinliği de güçlendirmektir.

-
- Çin tarafında ise yerli üretimi büyütme yönelik uzun vadeli bir yaklaşım bulunmaktadır. Hedef sadece ileri teknolojik seviyelerde üretim yapmak değil, yaygın olarak kullanılan üretim sınıflarında da güçlü bir kapasite oluşturmaktır. Devlet destekleri, fonlar ve iç pazarın büyüklüğü; bu süreci destekleyerek hızlandırmaktadır. Böylece yaşayabilecekleri ticari baskı ve ambargo dönemlerinde dahi ilerlemenin sürdürülmesi amaçlanmaktadır.
 - Rekabetin önemli bir boyutu da kritik ham maddelerdir. Nadir toprak elementleri (NTE) ile galyum ve germanyum gibi girdiler hem çiplerde hem de üretim makinelerinde stratejik önem taşımaktadır. Bu alanlara getirilen kısıtlamalar, maliyetleri ve takvimleri olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle ülkeler, daha fazla çeşitlendirme arayışına girerek en az iki tedarikçi ve iki coğrafya yaklaşımını benimsemeye başlamıştır.
 - Tayvan'da bulunan ve dünyada çip üretiminde önde gelen TSMC'nin güçlü konumu, küresel sistem için hem avantaj hem de risk kaynağıdır. Olası bir üretim aksaklığı, elektronik dışında otomotiv ve savunma gibi birçok alanı da etkileyebilmektedir. Bu risk algısı, çip üretimini farklı coğrafyalara taşıyarak "Tayvan+1" yaklaşımını öne çıkarmaktadır. Kısa vadede çip yarışının net bir kazananının olması beklenmemektedir. Kalıcı bir üstünlük için dayanıklı tedarik ağları kurmak ve kriz anında hızlı uyum sağlamak, daha belirleyici olacaktır.
 - Türkiye için en gerçekçi yol, ileri düzey çip üretim tesisi kurmaya çalışmaktan ziyade güçlü olunabilecek alanlara odaklanmaktır. Tasarım yetkinliğini geliştirmek ve paketleme-test altyapısını kurmak, bu alanların başında gelmektedir. NTE'de uzmanlaşmak ve güvenilir bir tedarik ortağı olmak da önemli bir fırsat sunmaktadır. Böyle bir konumlanma; daha düşük riskle daha yüksek değer üretmeyi sağlamakla birlikte Türkiye'nin bölgesel tedarik güvenliğinde rolünü güçlendirerek özellikle NTE'de başat aktör olma yolunu açacaktır.

GİRİŞ

21. yüzyılın teknolojik mimarisini şekillendiren temel unsurlardan biri; yapay zekâ, büyük veri ve iletişim ağlarının işleyişini mümkün kılan yarı iletken tümleşik devrelerdir (çipler). Çipler; akıllı telefonlardan uydulara, elektrikli araçlardan savunma sistemlerine, sağlık teknolojilerinden enerji altyapılarına uzanan geniş bir alanda modern dünyanın görünmez altyapısını işler hâle getirmektedir (bk. İnfografik 1).¹ Bu nedenle yarı iletken sektörü yalnızca ekonomik değer üreten bir sanayi kolu değil; aynı zamanda ulusal güvenlik, stratejik özerklik ve küresel rekabet bakımından da kritik bir unsurdur.

İnfografik 1: Çiplerin Kullanıldığı Bazı Alanlar



Kum



Silisyum



Silisyum
Külçe



Silisyum Külçenin
Dilimlenmesi



Dilimlenmiş
Silisyum Plakalar



Yarı iletkenlerin stratejik önemi, sektörün genişliği kadar derinliğiyle de doğrudan ilişkilidir. 20. yüzyılda petrol güvenliği, devletlerin manevra alanını nasıl belirlediyse günümüzde de yarı iletkenlerde; tasarım yetkinliği (IP/EDA), ileri üretim ve verim, ekipman erişimi (özellikle litografi), gelişmiş paketlenme ve standart belirleme gücü stratejik sonuçlar doğurmaktadır. Dolayısıyla **küresel rekabet, yalnızca üretim kapasitesiyle değil; bu katmanların bütünlüğü ve tedarik zincirinin dayanıklılığıyla da şekillenmektedir.** Kritik teknolojilerin merkezinde yer alan çiplerin tasarlanması, üretilmesi ve güvenli biçimde tedarik edilmesi; ülkelerin ekonomik performansını ve dış politika esnekliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yarı iletkenlerin küresel güç dağılımındaki rolü hem ekonomik hem de politik dönüşümün odağındadır.

Son yıllarda yarı iletkenlerin önemi, küresel sistemdeki kırılganlıkların ortaya çıkmasıyla daha da görünür hâle gelmiştir. Pandemi döneminde artan dijitalleşme talebi, otomotiv sektöründeki üretim aksaklıkları, tedarik zinciri kesintileri ve çip kıtlığı; küresel ekonominin ne kadar hassas bir ekosistem üzerinde yükseldiğini göstermiştir.² Üretim, dağıtım ve lojistik süreçlerindeki herhangi bir aksama, milyarlarca dolarlık zarara yol açarak devletler ve şirketler üzerindeki etkisini kanıtlamıştır. Bu deneyim, yarı iletkenlerin teknik bir konu olmanın ötesinde ekonomik güvenlik ve sanayi politikası tartışmalarının merkezine yerleştiğini açıkça ortaya koymuştur.

Çipler, ekonomiyi yalnızca üretim ve teknoloji bağlamında değil; verim ve rekabet yapısı açısından da etkilemektedir. Özellikle dijital dönüşümün hızlandığı bir ortamda veri işleme kapasitesi, enerji verimliliği ve yüksek başarımlı hesaplama (HPC) gibi alanlardaki ilerleme, çip teknolojisinin niteliği ve erişilebilirliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu ilerleme; gelişmiş üretim düğümlerinin (node) yanı sıra gelişmiş paketlenme, yüksek bant genişlikli bellek entegrasyonu ve yazılım-donanım uyumu ile ölçülen performans/enerji başına maliyet kazanımları üzerinden gerçekleşmektedir. **Yarı iletkenler, Sanayi Devrimi'nin buhar gücü ve 20. yüzyılın petrolü kadar dönüştürücü bir etki yaratmaya devam etmektedir.**³

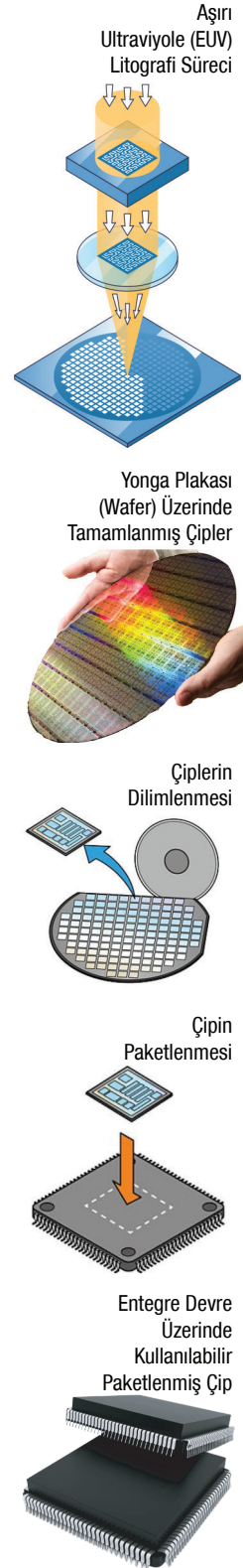
Çiplerin üretim süreçlerinin yürütüldüğü merkezlerin küresel dağılımı da stratejik bir mesele hâline gelmiştir. Nitekim çip ekosistemi, ülkeler arasında eşit dağılmış bir yapıdan uzak olup yüksek derecede

uzmanlaşmış ve coğrafi olarak yoğunlaşmış bir üretim ağına sahiptir.⁴ Tasarım aşamasında ABD'nin; üretimde Tayvan ve Güney Kore'nin; makine teknolojilerinde Hollanda ve Japonya'nın; montajda ise Çin'in ön plana çıktığı bu yapı, uluslararası bağımlılıkları artıran ve rekabeti daha sert bir hâle getiren ortam yaratmaktadır. Örneğin küresel çip üretiminin merkezinde yer alan TSMC firmasının Tayvan'da konumlanması, söz konusu ada ülkesini jeopolitik açıdan benzersiz bir kırılma noktasına getirmiştir.

Yarı iletkenlerin bu derece kritik, rekabetin ise bu denli sert hâle gelmesi; devletlerin teknoloji politikalarını yeniden şekillendirmesine yol açmıştır. ABD, Çin'in ileri çip teknolojilerine erişimini sınırlamak amacıyla çeşitli ihracat kısıtlamaları ve stratejik yatırımlar hayata geçirmiştir; Çin ise yerli üretim kapasitesini artırmaya yönelik devlet destekli programlar başlatmıştır. İki ülke arasındaki söz konusu teknolojik rekabet, günümüzün en görünür güç mücadelelerinden birine dönüşmüştür. **Bu sürecin bir diğer boyutu ise NTE'nin de içinde yer aldığı kritik ham madde savaşlarıdır.**⁵ Çin'in özellikle NTE'de sahip olduğu üretim ve rafine etme üstünlüğü, çip savaşlarının daha geniş bir ekonomik ve jeopolitik zemine yayılmasına neden olmaktadır.

Küresel yarı iletken ekosisteminin bu denli kritik ve karmaşık dinamiklere sahip olması; çipleri, 21. yüzyılın jeopolitik rekabetinin tam merkezinde konumlandırmaktadır. Rekabetin en görünür hattını ise ABD ile Çin arasındaki teknoloji yarışı oluşturmaktadır. Söz konusu yarış; "kurumsal kapasite, ulusal güvenlik, tedarik zinciri dayanıklılığı, standart belirleme gücü, jeopolitik direnç kapasitesinin derinliği ve ittifak ilişkileri" gibi birbiriyle bağlantılı unsurların iç içe geçtiği çok katmanlı bir güç mücadelesidir. **Bu çerçevede yarı iletkenler yalnızca ileri üretim süreçlerinin sonucu olarak değil; stratejik özerklik ve dijital egemenliğin somut göstergesi ile jeopolitik rekabet ve hegemonik mücadelede üstünlük sağlama arayışının temel bileşeni olarak ülkelerin gündemine yerleşmiştir.**

Bu çalışma da küresel üretim modellerinden ulusal güvenlik stratejilerine, ekonomik rekabetten kritik ham madde politikalarına uzanan geniş bir perspektif sunarak çip savaşlarının yalnızca teknoloji odaklı bir mesele olmadığını; aynı zamanda egemenlik, bağımsızlık ve küresel güç mücadelesinin merkezinde yer alan çok boyutlu bir konu olduğunu göstermeyi amaçlamaktadır.



ÇİP EKOSİSTEMİ

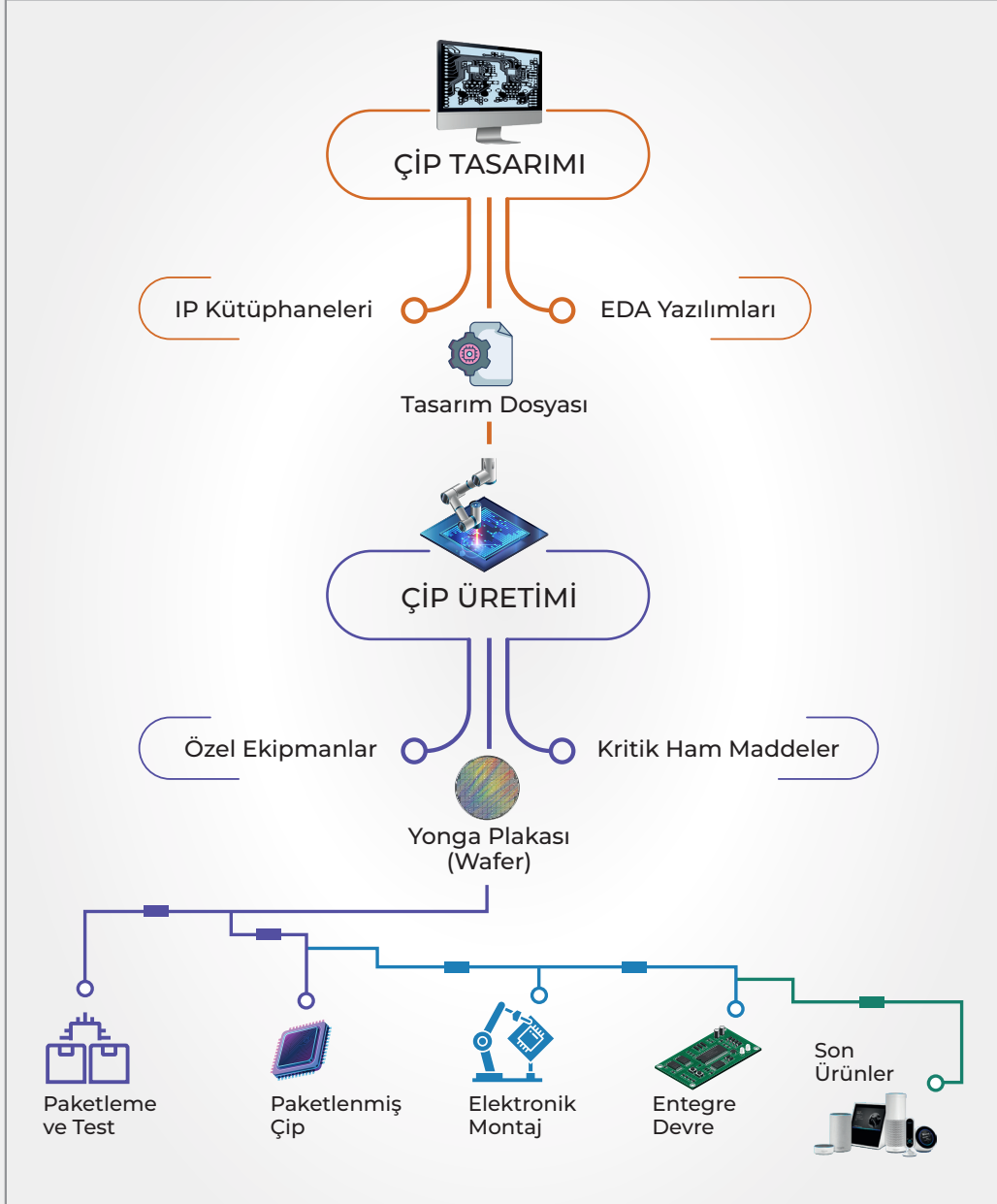
Yarı iletken endüstrisi; günümüz ekonomisinin görünmez itici gücü olup yapay zekâ, veri işleme, iletişim, ulaşım, enerji ve savunma sanayisi gibi pek çok alanda temel bir rol oynamaktadır. Bu yapıyı doğru kavramak için üretimi tek bir hat gibi değil, birbirine bağlı aşamalardan oluşan bir ağ gibi düşünmek gerekmektedir. Tasarım, üretim, paketlenme ve test aşamaları kâğıt üzerinde ardışık görünse de gerçekte, her adım diğerini etkilemekte ve ondan geri bildirim almaktadır (bk. İnfografik 2). Örneğin tasarımda verilen bir karar; üretim yöntemini, paketlenmede kullanılacak bağlantı düzenini ve testte izlenecek doğrulama adımlarını belirlemektedir. Benzer şekilde üretim sonrası ortaya çıkan bir sorun, tasarıma dönülerek düzeltmeler yapılmasını zorunlu kılabilir. Bu nedenle çip üretimi yalnızca teknik ilerlemenin değil, iyi kurgulanmış bir iş birliğinin de sonucudur.

Zincirin beyin kısmını oluşturan tasarım aşaması, çipin hangi görevleri yerine getireceğini belirleyen işlevsel blokların yerleştirildiği ve iyileştirildiği bölümdür. Bu alanda iki temel uzmanlık öne çıkmaktadır. Bunlar; donanımı tasarlayan ancak üretim yapmayan tasarım odaklı şirketler ve bu tasarımların hayata geçmesini sağlayan Elektronik Tasarım Otomasyonu (Electronic Design Automation, EDA) yazılımlarını geliştiren şirketlerdir. Tasarım şirketleri, donanımı ona eşlik eden yazılımla uyumlu şekilde kurgularken EDA araçları, yapılan tasarımın çip üzerinde yüksek performansla ve düşük güç tüketimiyle çalışmasını mümkün kılmaktadır.

Tasarım ekosistemi; küresel ölçekte paylaşılan fikrî mülkiyet (IP) kütüphanelerine erişim, ortak standartlara uyum ve birlikte çalışılabilirlik üzerine kuruludur. Bu aşamada üretilen mimari ve devre blokları, sonraki adımlarda fiziksel çipe dönüşmektedir. Bu nedenle tasarım yalnızca teknik bir başlangıç değil, aynı zamanda sektörün stratejik ağına giriş kapısıdır. Nitekim belirli EDA araçlarına ve IP kütüphanelerine erişim, firmalara hem ticari bir avantaj sağlamakta hem de tedarik, zamanlama ve ürün yol haritasında esneklik kazandıran stratejik bir ayrıcalık sunmaktadır. Bu ayrıcalığa sahip olan şirketler, üretim sürecinin geri kalanında daha geniş bir hareket alanı elde etmekle birlikte belirsizliklere karşı daha dayanıklı konumlanmaktadır.

Üretim, tasarımı izleyen ve çok büyük yatırımların atom ölçeğindeki hassasiyetle bulunduğu bir aşamadır. Milimetre karenin içine milyarlarca transistör yerleştirilen bu süreçte, malzeme bilimi ile optik fiziğin sınırları zorlanmaktadır. Yonga plakası (wafer) üzerinde yürütülen fotolitografi, ince film kaplama, iyonla işleme, plazma ile oyma ve metal bağlantı gibi onlarca alt adım; yüzlerce basamaktan oluşan kapsamlı bir üretim tarifinin parçası olup *çip üretim tesisi* veya *dökümhane* (bk. Fotoğraf 1) olarak adlandırılan çok özel laboratuvarlarda gerçekleştirilmektedir. Bu tarifteki küçük bir sapma bile verimi düşürerek maliyeti yükseltmektedir.

İnfografik 2: Yarı İletken Tedarik Zinciri Aşamaları



Fotoğraf 1: Çip Üretiminin Yapıldığı Bir Dökümhane

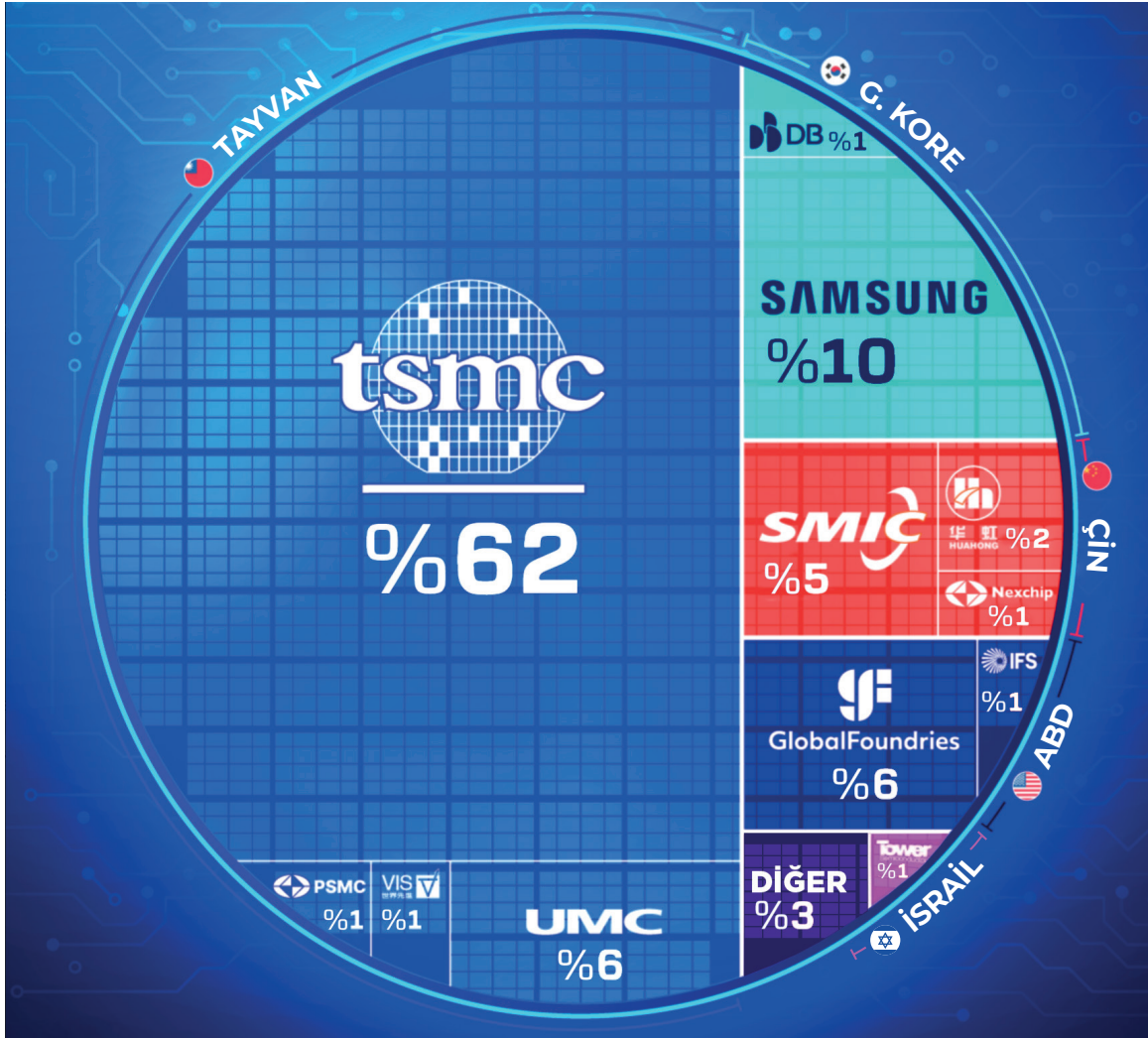


Kaynak: Bloomberg.

TSMC'nin yaklaşık %62 payla ilk sırayı koruduğu küresel dökümhane gelirleri, 2024'te yaklaşık 131,7 milyar dolar olmuştur.⁶ TSMC'nin 2024 net kârı da yaklaşık 36,5 milyar dolar olarak gerçekleşmiştir (bk. İnfografik 3).⁷

Üretim gücünü belirleyen iki temel unsur bulunmaktadır. İlki, süreç düğümü olarak anılan ve kullanılan üretim teknolojisi sınıfını ifade eden ölçek; ikincisi ise bu ölçeğin endüstriyel ölçekte, kabul edilebilir verimle sürekli tekrarlanabilmesidir. Bu nedenle 10 nm'den 7 nm'ye, 5 nm'den 2 nm'ye geçiş, yalnızca transistörlerin küçülmesi değil; tasarım kurallarının güncellenmesi, kullanılan maskelerin ve optik düzeneklerin değişmesi, kimi zaman da malzeme tercihinin baştan ele alınması anlamına gelen bütüncül bir sıçramadır.⁸ Ölçek küçüldükçe istenmeyen sızıntı akımları ve ısı yoğunluk artmakta, bu da çiplerin tüketebileceği güce doğal bir sınır getirmektedir.⁹ 2 nm ve altına yönelik hedefler; daha küçük bir boyuta ulaşmakla birlikte yeni transistör mimarilerine geçişi, daha gelişmiş yalıtkanların ve kimi uygulamalarda farklı kanal malzemelerinin devreye alınmasını gerektiren niteliksel bir dönüşümdür.¹⁰ Bu dönüşüm başarıyla yönetildiğinde, daha yüksek performans ile daha düşük güç tüketimi birlikte mümkün olmaktadır. Çip üretiminde önde gelen dökümhanelerin son yıllardaki süreç düğümlerinin gelişimi İnfografik 4'te gösterilmektedir.

İnfoğrafik 3: 2024 Sonu İtibarıyla Çip Üretim Net Gelirinin Dağılımı



Kaynak: Visual Capitalist.

Paketleme ve test; eskiden yalnızca çip üretimi sonrası son dokunuş olarak görülürken bugün, sistem performansını belirleyen temel bir aşamaya dönüşmüştür. Gelişmiş paketleme yöntemleriyle birden çok yonga, en uygun üretim teknolojilerinde ayrı ayrı üretilip aynı yapı üzerinde bir araya getirilebilmektedir.¹¹ Bu modüler yaklaşım, tek parça çip anlayışının yerini alarak bellek ile işlemci arasındaki veri akışını hızlandırmakta, üretim verimini artırmakta ve ürünlerin ömrü boyunca daha esnek güncellemelerin yapılmasına imkân tanımaktadır. Test süreci ise artık “Çalışıyor mu?” sorusunu

cevaplamakla kalmamakta; çevresel stres koşulları, hızlandırılmış yaşlandırma, radyasyona dayanım ve güvenlik kontrolleri gibi ölçütlerle çipin gerçek kullanım senaryolarına uygunluğunu güvence altına almaktadır.¹² Böylece tasarım, üretim, paketlenme ve test adımları; birbirini tamamlayan bir bütün olarak ele alınır ve tekli aşamaların toplamından daha yüksek bir performans ve güvenilirlik ortaya çıkar.

İnfoğrafik 4: Süreç Düzümlerinin Gelişimi (2014-2027)*

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
	22 nm	16 nm		12 nm	7 nm		5 nm		4 nm	3 nm		2 nm	1,6 nm	1,4 nm
	22 nm	14 nm		10 nm	8 nm	7 nm	5 nm	4 nm	3 nm			2 nm		1,4 nm
	14 nm					10 nm		7 nm		5 nm	3 nm	2 nm	1,6 nm	1,4 nm
		28 nm				14 nm	12 nm	7 nm	5 nm					
	22 nm			14 nm			12 nm							
	28 nm		14 nm											12 nm

Milli İstihbarat Akademisi



@miaedutr
@miaedutr
@milliistihbaratakademi

www.mia.edu.tr

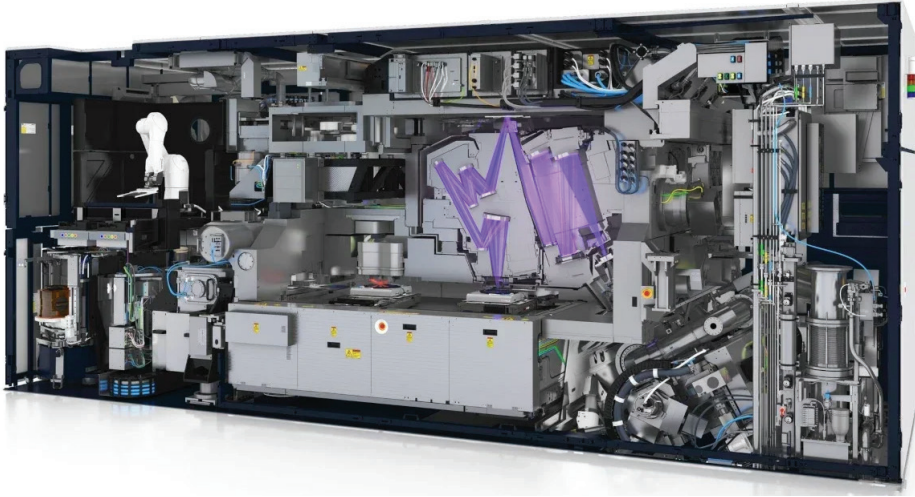
*2026 ve 2027, hedeflenen teknoloji düğümleridir.

Kaynak: TSMC, Samsung, Intel, SMIC, GlobalFoundries, UMC.

Çip tasarımında merkez konumunda yer alan ABD; üreten değil, tasarlayan şirket modelinin doğup geliştiği bir ekosisteme sahiptir. İleri düzey tasarım yazılımlarına erişim, mimari yenilik ve donanım ile yazılımın birlikte kurgulanması sayesinde yüksek bir sinerji üretmektedir. Üretim tarafında ağırlık, sırasıyla Tayvan ve Güney Kore'dedir. Tayvan'daki TSMC, firmaların tasarladığı çipleri üreten dökümhane modelinin belkemiğidir. TSMC, 5 nm ve 3 nm gibi ileri üretim sınıflarında standardı belirlerken çok sayıda müşteriyle çalışmanın sağladığı ölçek ve olgunluk sayesinde rekabetçi kalır.¹³ Güney Kore'de ise Samsung hem işlemci hem de bellek çiplerinde güçlü olup özellikle bellek üretimindeki yetkinlik, veri merkezleri ve yapay zekâ hızlandırıcıları için kritik bir tedarik güvencesi sağlamaktadır.¹⁴

Avrupa Birliği (AB) üyesi Hollanda, çip üretiminde kullanılan ileri litografi makineleri bakımından özel bir yere sahiptir. Bu ülkenin önde gelen üreticisi ASML'nin aşırı ultraviyole (EUV) litografi teknolojisi (nano ölçekli ince desen basımı, bk. Fotoğraf 2), 7 nm altındaki gelişmiş üretim sınıflarına geçişin fiili anahtarı olup alandaki benzersiz konumuyla tüm yarı iletken ekosistemini etkilemektedir.¹⁵

Fotoğraf 2: Hollanda Merkezli ASML'nin Ürettiği Aşırı Ultraviyole Litografi Makinesi*

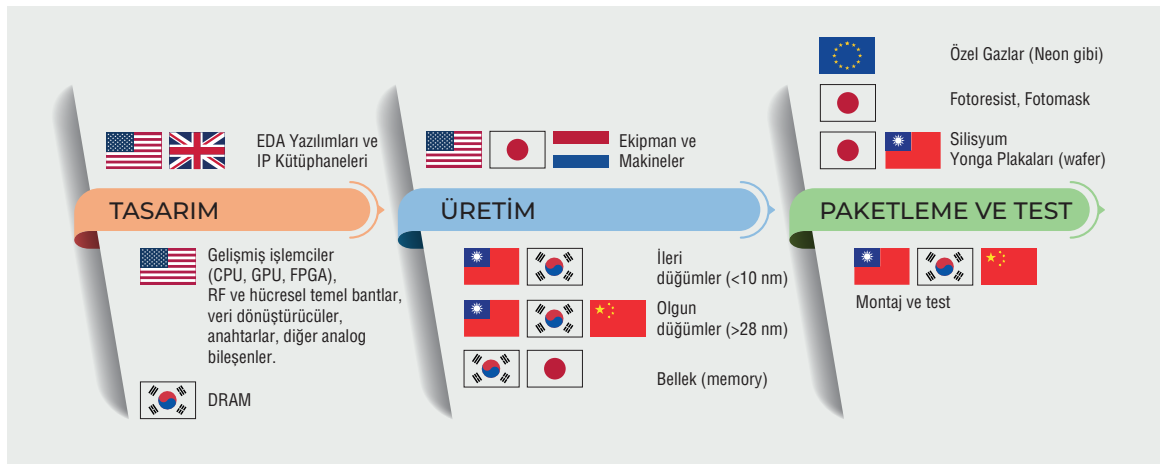


*Her cihazın fiyatı, yaklaşık 370 milyon dolardır.

Kaynak: ASML.

Çin ise geniş iç pazarının sağladığı ivme sayesinde paketlenme, test ve olgun süreç düğümlerinde (28 nm ve üzeri) hızla kapasite oluşturmakta, montaj ve yüksek ölçek ekonomisiyle küresel tedarik zincirinde önemli bir yer edinmektedir.¹⁶ Bu iş bölümü, taraflar arasında uyumu ve verimliliği artırsa da stratejik bağımlılıkların yoğunlaştığı açılarda jeopolitik kırılganlıkları da beraberinde getirmektedir. Her bir aşamada etkin olan ülkeler ve yetkinlikleri infografik 5'te gösterilmektedir.

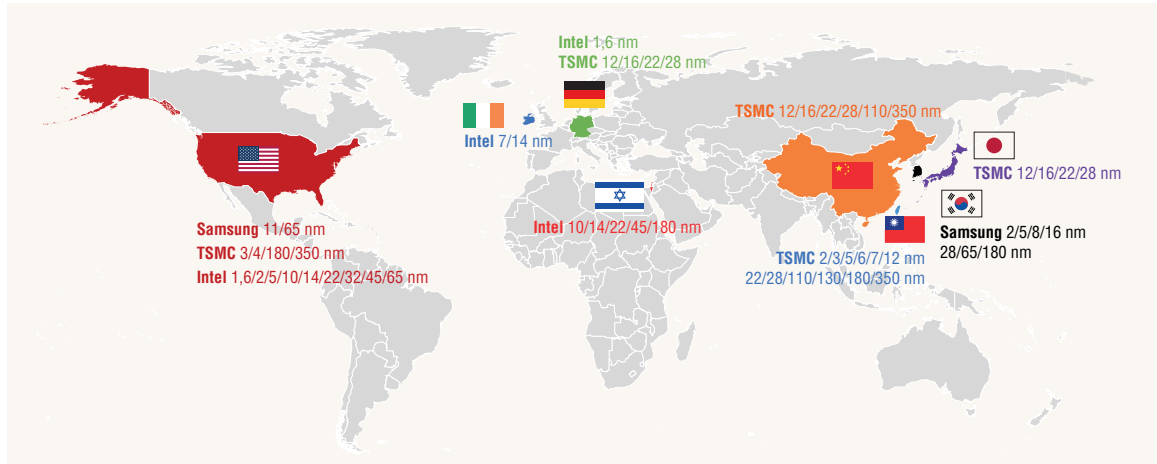
İnfografik 5: Yarı İletken Değer Zincirinde Coğrafi Uzmanlaşma



Yarı iletken endüstrisinde öne çıkan şirketler, coğrafi uzmanlaşmanın kurumsal yansımalarını temsil etmektedir (bk. Harita 1).

- **TSMC (Tayvan):** İleri üretim yetkinliğini, ölçek ve yüksek verimle birleştirerek küresel tasarım firmalarının öncelikli üretim ortağı ve sektörün açık ara farkla en büyük aktörü konumuna gelmiştir.
- **Samsung (Güney Kore):** Hem bellek hem de işlemci türü çiplerdeki gücüyle ön plana çıkmaktadır. Bu çift yönlü yetkinlik sayesinde şirketlerin tedariklerini çeşitlendirmesinde önemli rol oynamaktadır.
- **Intel (ABD):** Uzun süre, tasarım ve üretimi aynı çatı altında yürüten dikey modelin öncülerinden olmuştur. Son dönemde ise dökümhane hizmetlerini yeniden konumlandırarak ileri üretim sınıflarında yeniden varlık göstermeyi hedeflemektedir.
- **Nvidia (ABD):** Yapay zekâ teknolojilerinde sembol bir aktör olarak tasarımdaki yeniliklerini TSMC ve Samsung gibi ortakların üretim kapasitesiyle birleştirmektedir. Geliştirdiği GPU (grafik işlemcisi) mimarileri ve yazılım-donanım ekosistemiyle fiilen pazar standardını belirlemektedir.
- **ASML (Hollanda):** İkamesi zor olan litografi makineleriyle tüm ekosistemin kritik altyapısını sağlamaktadır. Üretim teknolojisi ne kadar ileri seviyeye çıkarsa bu ekipmanlara duyulan bağımlılık da o ölçüde artmaktadır.
- **SMIC (Çin):** Çin'in yerli üretim hedeflerinde merkezî bir rol oynamaktadır. Özellikle 28 nm ve üzeri olgun düğüm sınıflarında yakaladığı ölçek, iç pazarın tedarik güvencesini artırırken ülkedeki teknoloji birikiminin yayılmasına katkı sunmaktadır.

Harita 1: TSMC, Samsung ve Intel'in Dökümhane Tesisleri*



*Planlananlar dâhil.

Kaynak: TSMC, Samsung, Intel.

2020-2023 yılları arasında yaşanan küresel çip krizi, söz konusu stratejik alanın ne kadar kırılgan olabileceğini tüm açıklığıyla göstermiştir. Pandemi; uzaktan çalışma, dijital eğlence, bilgisayar ve oyun donanımına yönelen talebi hızla artırmış, talebin yapısını bir anda değiştirmiştir. Otomotiv sektörü ise ilk şokta siparişleri kısmış, toparlanma başladığında ise üretim hatlarına geri dönmekte zorlanmıştır.¹⁷ Arz tarafında; fabrikaların sağlık protokolleri nedeniyle kapasite kaybetmesi, küresel lojistikte yaşanan aksamalar ve bazı bölgelerde su ile enerji kısıtlarının üretimi etkilemesi, değer zinciri üzerindeki baskıyı artırmıştır. Aynı dönemde litografi ve diğer temel üretim makinelerinde teslim süreleri uzadığından ileri üretim sınıflarına ilişkin planlar daha temkinli bir çerçeveye çekilmiştir.¹⁸ Krizin sembolik etkisi, otomotiv sektöründe yoğun olarak görülmüştür. Bu süreçte çok küçük görünen bir elektronik kontrol parçasının tedarik edilememesi, yüzlerce kilogramlık bir aracın banttan inememesine yol açarak küçük bir bileşenin, büyük sistemi nasıl durdurabildiğini göstermiştir. **Bu deneyim, yarı iletken ekosisteminin yalnızca teknik değil, operasyonel ve yönetim boyutlarıyla da risk üretebileceğini gözler önüne sermiş; stok politikaları, çoklu tedarik stratejileri ve daha şeffaf planlama süreçlerinin önemini bir kez daha göstermiştir.**

Yaşanan kriz, şirketlerin çalışma biçiminde kalıcı değişiklikler yaratmıştır. İlk olarak uzun vadeli çerçeve anlaşmaları ve kapasite rezervasyonu sözleşmeleri yaygınlaşmıştır. Tasarım yapan firmalar, bazı üretim teknolojilerinde belirli miktarları peşinen taahhüt ederek hatlarda kendilerine yer ayırmaya başlamıştır. İkinci olarak tedarik zincirinin görünürlüğü bir satın alma faaliyeti olmaktan çıkarak üst yönetimin doğrudan takip ettiği bir risk yönetimi alanına dönüşmüştür. Üçüncü olarak ABD ve Avrupa, coğrafi çeşitlendirmenin ön plana çıkmasıyla yeni dökümhane yatırımları için teşvik programları açıklamıştır. Japonya ve Güney Kore ise yetkinliklerini güçlendirecek ortaklıklara girmiştir. Son olarak stok politikaları yeniden düzenlenmiş; "tam zamanında" yaklaşımı, kritik parçalar için emniyet stoku ile desteklenen hibrit bir modele dönüştürülmüştür.¹⁹ Böylelikle akış bozulmadan küçük bir güvenlik stoku tutulmaya başlanmıştır. Bu adımlar, kırılganlıkları azaltmayı amaçlarken eş zamanlı olarak yeni maliyet kalemlerini ve daha sıkı koordinasyon ihtiyacını da beraberinde getirmiştir.

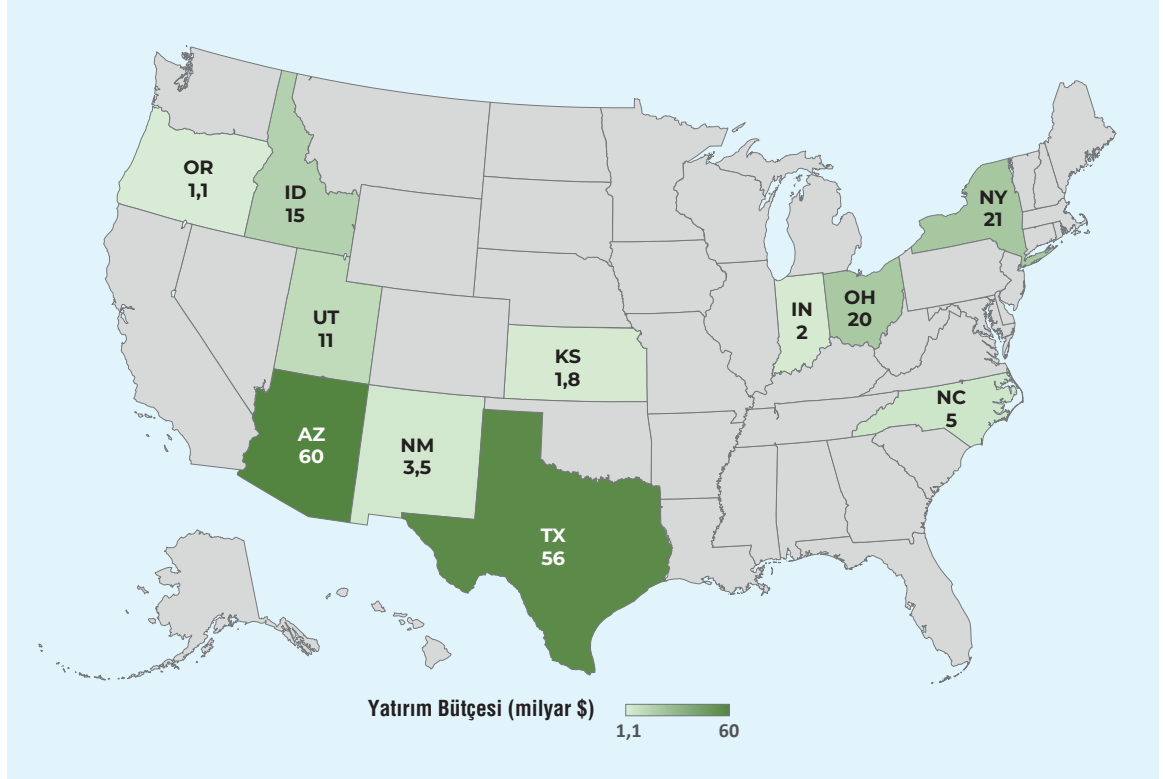
ABD VE ÇİN ARASINDAKİ ÇİP REKABETİ

ABD'nin, sanayi politikalarıyla dış ticaret kısıtlamaları; Çin'in ise yerli üretimi güçlendirmeye dönük ikame stratejileriyle kaynak politikaları, bugün çip savaşları olarak anılan sürecin yönünü belirleyen başlıca tercihleri ve jeoekonomik çatışmanın en önemli alanını ifade etmektedir.

ABD'de 2022'de yürürlüğe giren "Çip Üretimini Teşvik ve Bilim Yasası"²⁰ rekabetin ekonomik boyutunu somutlaştıran en önemli adımlardan biridir. Yasa; ülke içinde yarı iletken üretim kapasitesini artırmayı, ileri çip üretim sınıflarına (süreç düğümlerine) yatırım çekmeyi ve kritik AR-GE altyapısını güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu çerçevede vergi teşvikleri ve doğrudan hibeler sağlanmakta, üniversite-sanayi iş birliklerini destekleyen fonlar devreye alınmakta ve tedarik zinciri güvenliği için de belirli koşullar getirilmektedir. Düzenlemenin hedefi yalnızca üretimi ABD topraklarına taşımak değildir. Bunun dışında standart belirleme gücünü artırmak, ileri litografiye erişimi güvenceye almak, gelişmiş paketleme ile malzeme bilimi gibi alanlarda yenilik döngüsünü sürekli finanse etmek de yasanın hedefleri arasındadır.

Çip Üretimini Teşvik ve Bilim Yasası sonrası ABD'nin farklı eyaletlerinde yarı iletken sektöründe faaliyet göstermek üzere yaklaşık 200 milyar dolarlık yatırım yapılması planlanmıştır (bk. Harita 2).

Harita 2: ABD'de Yarı İletken Sektöründe Yatırım Yapılması Planlanan Eyaletler ve Bütçeleri



Kaynak: ABD Kongresi.

Tarihsel olarak ABD'nin; çip tasarımı, EDA yazılımları ve yüksek katma değerli IP kütüphaneleri üretiminde güçlü olduğu dikkate alındığında, **Çip Üretimini Teşvik ve Bilim Yasası'yla ulaşılmak istenen nihai hedef, tasarım üstünlüğünü ülke içinde bir üretim kapasitesiyle tamamlamaktır.** Böylece ileri düğüm süreçlerinde dışa bağımlılık azaltılarak olası darboğaz riskler düşürülmektedir. Bu bütüncül çerçeve, yalnızca yeni çip üretim tesislerinin kurulmasını değil; nitelikli iş gücünün yetiştirilmesini, tedarikte çoklu kaynak stratejisinin benimsenmesini ve uzun vadeli AR-GE yatırımlarının kalıcı bir politika zemini kazanmasını da hedeflemektedir.

ABD'nin sanayi politikası, dış ticaret ve teknoloji kontrolleriyle birlikte ilerlemektedir. İleri düğüm süreçleri, üretim ekipmanları ve ilgili yazılımlara getirilen ihracat sınırlamaları; özellikle yapay zekâ ve yüksek başarılı hesaplama kapasitesini doğrudan etkileyen ürünlere odaklanmaktadır. Bu çerçevede

belirli GPU sınıfları, yüksek bant genişlikli belleklerle yapılan kombinasyonlar, ileri düğüm süreçleri için gerekli EUV litografi makineleri ve bazı EDA yazılımları; kademeli olarak sıkılaştıran lisans kurallarına tabi olmuştur.²¹ Politikanın tasarımı yalnızca nihai ürün akışını değil; ara ürünleri ve yazılım-donanım bütünleşmesini de kapsadığından tedarik zincirinde yeni uyum maliyetleri ortaya çıkmıştır. **ABD, bir yandan kendi teknolojik üstünlüğünü pekiştirirken diğer yandan rakiplerin kapasite artışını yavaşlatmayı amaçlayan korumalı açıklık yaklaşımını izlemektedir.**²² **Açıklık, müttefiklerle derin entegrasyonu; koruma ise stratejik rakipler için kontrollü erişimi ifade etmektedir.**

Bu yaklaşımın etkili olabilmesi, ABD'nin ittifak ağını teknik düzeyde derinleştirmesine bağlıdır. Japonya, Hollanda ve Güney Kore ile kurulan iş birlikleri, çip ekosisteminin kritik aşamalarında hem kuralları uyumlu hâle getirmeyi hem de pratikte birlikte hareket etmeyi amaçlamaktadır.

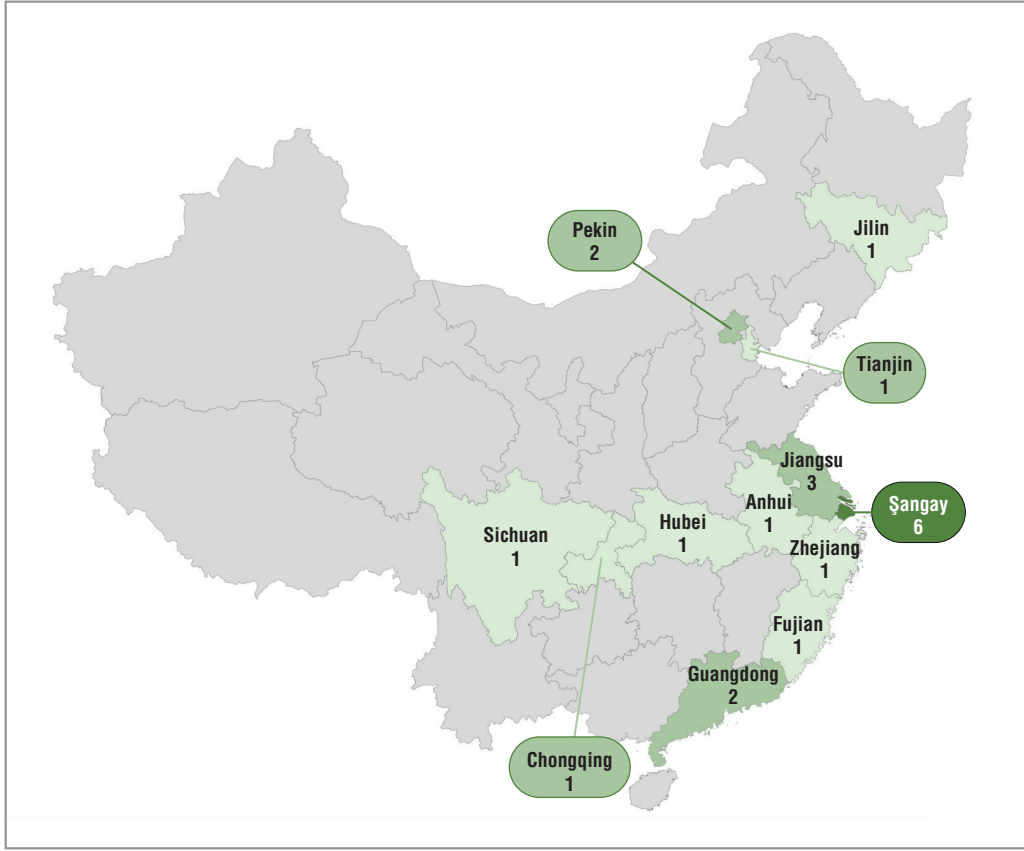
- Hollanda'da ileri litografi alanında güçlü bir konuma sahip olan ASML üzerinden ekipman erişiminin eş güdümlü yönetilmesi,
- Japonya'nın malzeme bilimi, kimyasallar ve üretim makinelerindeki yetkinliğinin politika düzeyinde entegrasyonu,
- Güney Kore'nin bellek ve işlemci türü çiplerdeki kapasitesiyle tedarik güvenliğine sigorta sağlaması,

bu mimarinin temel dayanaklarıdır. Böylesi bir teknik ve operasyonel uyum; ihracat kısıtlarının etkisizleşmesini önleyerek küresel standart ve sertifikasyon süreçlerinde ortak tutumu güçlendirir. Ayrıca kriz dönemlerinde üretimin koordineli bir biçimde başka tesislere kaydırılmasına imkân veren kurumsal düzenekler oluşturur. Bu çerçeve, standart koyma ve ekipman erişimini kalıcı hâle getirerek müttefiklerle teknik uyumu güçlendirir.

Çin cephesinde ise 2010'lardan bu yana hız kazanan yerli ikame yaklaşımının giderek tabana yayıldığı görülmektedir. Çin'de bulunan SMIC ve YMTC gibi çip üreticilerinin kapasite artışı ile Huawei'nin tasarım odaklı yenilikleri, ülkenin yarı iletken ekosistemini parçalı fakat istikrarlı biçimde güçlendirmektedir (bk. Harita 3).²³ Çin'in uzun vadeli planlaması yalnızca en ileri üretim sınıflarına (düşümlere) yönelmekle sınırlı değildir. Aynı zamanda maliyet ve performans dengesi görece elverişli olan olgun üretim sınıflarında; ulusal kapasiteyi büyütmeyi, böylece ölçek ekonomisi yaratmayı hedeflemektedir. Geniş iç pazar, bu stratejinin arz talep dengesinin daha öngörülebilir olmasına yardımcı olurken kamu destekli fonlar ve yerli tedarik programları, sektörel öğrenme hızını artırmaktadır.

Huawei'nin gelişmiş paketleme, mimari iyileştirme ve yazılım ile donanımın birlikte tasarlanması gibi alanlarda izlediği yol, ilerlemeyi yalnızca düğüm küçültmeye indirgemeyen bir performans artışının mümkün olduğunu göstermiştir.²⁴ Bu sayede kısıtlamaların tek bir ölçüte (örneğin yalnızca düğüm boyutuna) odaklanan etkisi sınırlanabilmektedir. Sistem düzeyinde yapılan optimizasyonlar, rekabet gücünü farklı kanallardan besleyebilmektedir. Kısacası **Çin'in yaklaşımı, en ileri teknolojiyi hedeflemekle birlikte ölçeklenebilirliği yüksek üretim sınıflarını güçlendirerek tedarik güvenliği ve maliyet etkinliği arasında dengeli bir yol arayışına dayanmaktadır.**

Harita 3: Çin Eyaletlerindeki Dökümhane Sayıları



Kaynak: TrendForce, Yole Group.

“Made in China 2025” ve onu izleyen sektör odaklı planlar, Çin’in politika çerçevesinin omurgasını oluşturmaktadır.²⁵ Bu planlar; yarı iletkenleri stratejik bağımsızlığın temel aracı olarak tanımlamakta, AR-GE ekosistemini yerli üretim hedefleriyle eşleştirmekte ve bölgesel kümelenmeler yoluyla kapasite artışını teşvik etmektedir. Üniversite ve sanayi iş birliğini kalıcı ağlara dönüştüren düzenlemeler, patent üretimini özendiren teşvikler ve standart belirleyen uluslararası platformlarda etkin temsil hedefi; bu politika setinin kurumsal bileşenleridir. Bu çerçevede Çin, teknolojik fay hattında yalnızca izleyen bir aktör olmak yerine belirli alt alanlarda kural koyucu ve öncü bir rol üstlenmeyi amaçlamaktadır. Yaklaşımın bir diğer sonucu, kısıtlamalar yoğunlaştığında dahi geniş iç pazarın dinamizmi sayesinde öğrenme eğrisini sürdürme ve birikimi içeride tutma kapasitesinin korunmasıdır. Dolayısıyla Çin hem yerli üretimi derinleştiren hem de kurumsal yetkinlikleri güçlendiren çok katmanlı bir sanayi politikası yürütmektedir.

Rekabetin kritik ham madde tarafında, Çin'in NTE ve bazı kritik girdiler üzerindeki hâkimiyeti; politika araçlarına yeni bir boyut eklemektedir.²⁶ Galyum ve germanyum gibi ürünlere getirilen ihracat kontrolleri, yarı iletken başta olmak üzere ileri imalat sektörlerinin maliyet ve takvimlerini çarpan etkisiyle etkilemektedir.²⁷ Bu kontroller çoğu zaman doğrudan ambargo biçiminde değil; lisans ve uygunluk şartlarının sıkılaştırılması, izlenebilirlik standartlarının yükseltilmesi ve sevkiyat süreçlerinin yavaşlatılması yoluyla uygulanmaktadır. Öngörülebilirliğin azaldığı bu ortamda üreticiler; daha yüksek güvenlik stoku tutmaya, alternatif tedarik anlaşmaları yapmaya ve coğrafi çeşitlendirmeye yönelmektedir. Ortaya çıkan ek maliyetler yalnızca nihai ürün fiyatlarına değil; yatırım ve AR-GE bütçelerinin dağılımına da yansımaktadır. Bu araç seti, yarı iletken teknolojilerine erişimin kısıtlandığı bir dönemde, Çin açısından dengeleyici bir unsur olarak öne çıkmış; kaynak jeopolitiğinin yeni bir yansıması olarak karşılıklı bağımlılığı yeniden tanımlayan bir düzen oluşturmuştur.

Bu tablonun merkezinde, Tayvan'ın çok stratejik bir konumu bulunmaktadır. Tayvan'da bulunan TSMC'nin ileri üretim teknolojilerindeki liderliği, ülkeyi yalnızca bölgesel değil, küresel ekonomi için de kritik bir altyapı hâline getirmektedir. TSMC'nin büyüklüğü, oturmuş süreçleri ve yüksek verimliliği; gelişmiş üretim kapasitesinin önemli bir kısmını tek yerde toplamaktadır. Bu durum, kriz anlarında kırılganlıkları artırsa da sektörde standardı belirleyen, bilgi birikimini hızlıca yayabilen güçlü bir merkez yaratmaktadır. **Tayvan üzerinde gerilimin yükseldiği dönemlerde, TSMC üretiminde yaşanabilecek bir kesinti, yalnızca elektronik ve bilişim alanlarını değil; otomotiv, savunma, enerji, iletişim ve sağlık gibi çok geniş bir yelpazeyi etkileyebilecek sonuçlar doğurabilir. Bu risk algısı, birçok ülkeyi "Tayvan+1" olarak anılan stratejiyle üretim coğrafyasını kısmen çeşitlendirmeye yöneltmektedir.**²⁸ ABD, Almanya ve Japonya'da devreye alınan yeni tesisler ile AB'nin üretimi çekmeye dönük programları; bu ihtiyat mimarisinin başlıca unsurlarıdır.²⁹ Amaç, Tayvan'ın merkezî rolünü zayıflatmak değil; tedarik güvenliğini güçlendirirken küresel sistemin tek bir coğrafi üretime aşırı bağımlılığını sınırlamaktır.

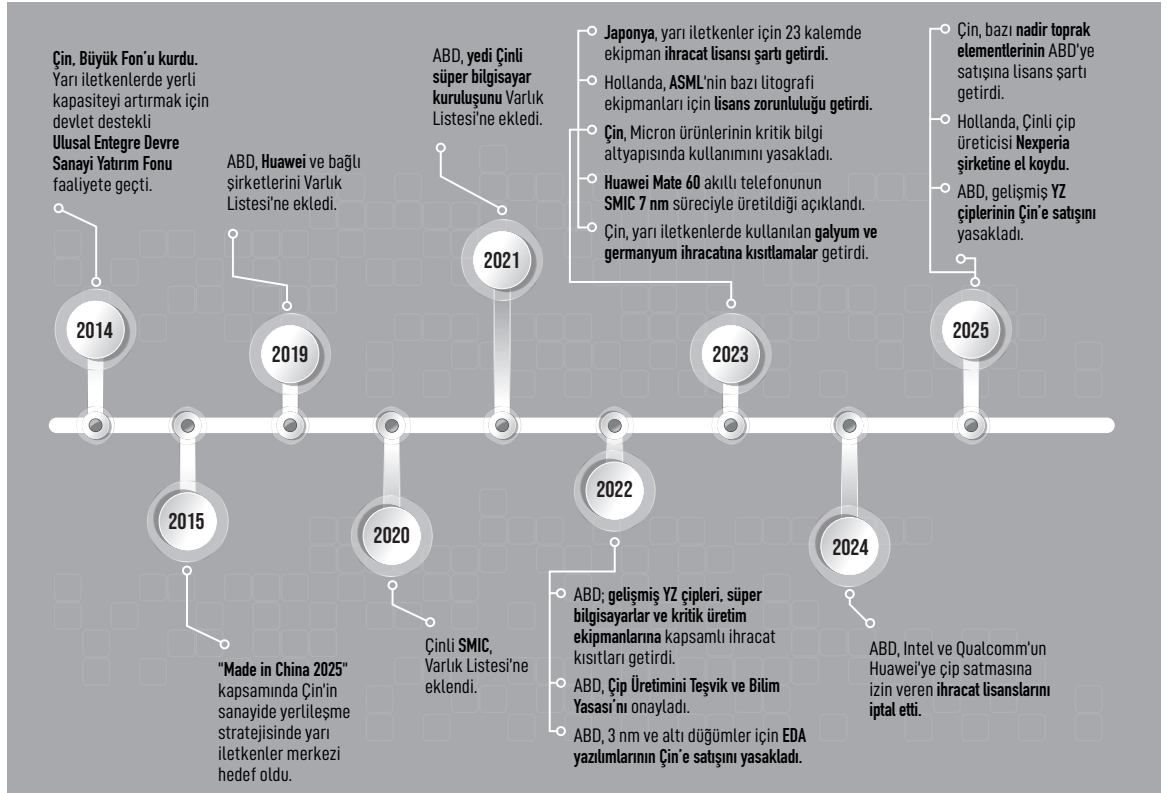
AB, Japonya ve Güney Kore; denge ve farklılaştırma siyasetinin somut örneklerini sunmaktadır. AB; "Çip Yasası" gibi adımlarla kıta içinde üretimi artırmayı, kritik ekipman ile malzeme tedarikinde stratejik özerklik kazanmayı ve AR-GE kapasitesini büyütmeyi hedeflemektedir.³⁰ Bu yaklaşım, farklı bölgesel güçlü yönleri ağ yapısı içinde birbirine bağlayarak dayanıklı bir ekosistem kurmayı esas almaktadır. Japonya; malzeme bilimi ve üretim makinelerindeki tarihsel birikimini, yeni nesil paketleme ve güç elektroniği gibi alanlara taşıyarak ittifak mimarisinde kritik bir rol oynamaktadır. Güney Kore ise bellek teknolojilerindeki liderliğini korurken dökümlü rekabetinde ve ileri üretim sınıflarında varlık göstererek portföyünü genişletmekte ve ABD ile yakın iş birliği sayesinde tedarik zinciri güvenliğini mimarisine kurumsal katkı sunmaktadır. Söz konusu üç aktörün ortak paydası, ABD-Çin rekabetinde birinin kazancını diğerinin kaybı sayan anlayışa kapılmadan; arz güvenliği, teknolojiye erişim ve ihracat pazarlarının sürekliliği arasında dengeli bir yol arayışını sürdürmeleridir.

ABD-Çin rekabetinin kurumsal etkileri, yalnızca üretimin nerede yapıldığını değil, hangi kuralların geçerli sayılacağını da belirlemektedir. Veri merkezlerinde yapay zekâ iş yükleri için kullanılan hızlandırıcılar, bellekle kurulan yüksek hızlı bağlantılar, gelişmiş paketleme düzenekleri ve enerji verimliliği ölçütleri gibi alanlarda; çoğu zaman resmî bir kurumdan çok pazarın ağırlık merkezi, fiilî standartları oluşturmaktadır.³¹ ABD merkezli tasarım şirketleri ile Tayvan ve Güney Kore'deki üreticilerin konumu, fiilî standartların dünya geneline hızla yayılmasını kolaylaştırmaktadır. Buna karşılık Çin, açık dönemlerde dış ticaretten yararlanırken kısıtlı dönemlerde iç pazarla kendine yeterliliği artırmayı hedeflemektedir. Söz konusu

iki yönlü mimari, kısa vadede verimlilik kaybı riski taşısa da uzun vadede, kurumsal dayanıklılığı artırma ve dış şoklara karşı seçenekleri çoğaltma potansiyeline sahiptir.

Rekabetin hukuki ve düzenleyici boyutu da giderek belirleyici hâle gelmektedir. İhracat kontrolleri, yatırımların önceden taranması, bazı yabancı şirketlere yönelik kısıtlayıcı listeler, kamu ihalelerinde tedarik güvenliği kriterlerinin sıkılaştırılması ve hassas verilerin sınır ötesi aktarımına ilişkin kurallar; yalnızca güvenlik kaygılarını değil, sanayi politikasının rekabet alanlarını da yeniden tanımlamaktadır. Bu çerçevede tedarik zincirinde güvenilir ortak olmanın ölçütleri; finansal sağlamlık, uyum ve şeffaflığın yanı sıra politika risklerine karşı esneklik gösterebilme kapasitesini de kapsamaktadır. Şirketler; yol haritalarını, kapasite planlarını ve coğrafi çeşitlendirme adımlarını yalnızca piyasa sinyallerine bakarak değil, düzenleyici dalgalara yönünü ve hızını dikkate alarak da kurgulamaktadır. **Stratejik kararlar; teknik yapılabirlik ve maliyet hesabının ötesine geçip hukuki çerçeve ve kamu politikalarıyla birlikte ele alınan bütüncül bir risk yönetimi anlayışına dayanmaktadır.** ABD ve müttefiklerinin son 10 yılda Çin’le yaşanan çip savaşının zaman çizelgesi İnfografik 6’da özetlenmiştir.

İnfografik 6: Son 10 Yılda Yaşanan Çip Savaşının Zaman Çizelgesi



Tüm unsurlar birlikte düşünüldüğünde, ABD-Çin arasındaki teknoloji rekabetinde, çip savaşlarının kısa vadeli bir kazananını ilan etmek zordur. Çünkü yarış, tek bir ölçütle değerlendirilemeyecek kadar çok katmanlıdır. **ABD'nin üstünlük alanları; üst düzey tasarım yetkinliği, EDA yazılımındaki belirleyici konumu, litografi ve malzeme ekipmanlarında müttefikleriyle kurduğu güçlü ağ, sermaye piyasaları ve üniversite-sanayi iş birliğine dayalı AR-GE ekosistemidir. Çin'in avantajları ise büyük iç pazarın sağladığı ölçek, kamu koordinasyon kapasitesi, olgun süreç düğümlerinde hızla kapasite kurabilme yeteneği ve kritik ham maddelerdeki gücüdür.** Bu nedenle lider-takipçi gibi statik bir ikiliğe indirgenemeyen söz konusu rekabet, farklı katmanlarda ve farklı zaman aralıklarında değişen göreceli üstünlüklerin dinamiği olarak anlaşılmalıdır. Kısıtlayıcı düzenlemeler ve bunlara verilen karşılıklar, kısa vadede tedarik zincirlerinde dalgalanmalara yol açarken uzun vadede, iki blok arasında kısmi teknik ayrışmayı ve uyumlu fakat ayrı ekosistemlere yönelişi teşvik edebilir. Kısacası yarı iletkenler; dijital çağın görünmeyen cephesinde, küresel düzenin hangi yöne evrileceğine dair en somut sinyalleri veren bir barometre işlevi görmeye devam etmektedir.

KRİTİK HAM MADDE VE NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN STRATEJİK ÖNEMİ

Çip savaşlarının gidişatını belirleyecek en önemli dinamiklerin başında NTE gelmektedir. Tabiatla genellikle birlikte bulunan ve kimyasal olarak benzer davranan bu elementler; sanayide sınırlı miktarlarda kullanılsa da yüksek işlevsellik sağlayan lantanit grubu, itriyum ve skandiyumla birlikte 17 elementten oluşmaktadır.³² **"Nadir" nitelemesi, elementlerin az bulunduğu anlamına gelmektedir. Bu elementleri nadir yapan asıl güçlük, ekonomik olarak çıkarılabilir cevherleşmelerin seyrekliği ve rafinaj süreçlerinin karmaşıklığıdır.** Bu elementler, özellikle günümüzde ihtiyaç duyulan yüksek teknolojik ürünlerde kaldıraç etkisi yaratmaktadır. Motorlarda ihtiyaç duyulan kalıcı mıknatıslar, yüksek performanslı alaşımlar, lazer sistemleri, katalizörler, optik camlar ve sensör bileşenleri bunların başlıcalarıdır. Temiz enerji dönüşümünün simgesi hâline gelen rüzgâr türbinlerinin, elektrikli araçların ve hassas hareket kontrolü gerektiren sanayi motorlarının verimini belirleyen kalıcı mıknatıslarda kullanılan "neodimyum, praseodim, disprosyum ve terbiyum" kritik elementlerdir. Aynı şekilde elektronik ve haberleşmede kullanılan optoelektronik bileşenlerde, evropiyum ve itriyum gibi elementlerin sağladığı spektral özellikler, cihaz performansını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla küçük paylı girdiler, nihai sistemlerde büyük performans farkları yaratmaktadır. Bu yüzden maliyet içindeki ağırlığıyla değil, işlevsel ikame edilmesi güçlüğüyle stratejik hâle gelmektedir. Bu tablo, enerji sistemleri ve ileri teknolojinin kritik ham madde bağımlılıklarını inceleyen uluslararası raporlarda da açık biçimde ortaya konulmuştur.³³

NTE'nin rolü, yarı iletken tedarik zincirinde iki düzeyde ortaya çıkmaktadır. İlk olarak bu elementler, çoğu yonganın içinde zorunlu bir bileşen olmasa da üretim süreçlerinin tamamlayıcı girdileri olarak önemlidir. Örneğin ileri üretimde yüzey kusurlarını azaltan CeO₂ tabanlı CMP bulamaçları ve mikrodalga/RF bileşenlerinde düşük kayıplı yönlendirme sağlayan itriyum-demir granat ferritleri, yüksek saflık ve kararlı performans için NTE'ye ihtiyaç duymaktadır. İkinci olarak NTE'ler çip üretiminde kullanılan makinelerin motorlarında yer alan kalıcı mıknatıslar ve hassas optik-manyetik bileşenler

yoluyla belirleyicidir. Litografi sistemlerinin wafer sahneleri, taşıma robotikleri ve vakum birimlerindeki mıknatıslar nanometre ölçeğinde hızlı ve hassas konumlandırmayı mümkün kılmakta; bu da hizalama doğruluğu ve hat verimini doğrudan etkilemektedir. Bu çift katmanlı bağımlılık, NTE arzındaki idari veya ticari değişikliklerin yarı iletken üretiminde kısa sürede maliyet ve takvim etkisine dönüşmesine yol açmaktadır. NTE'nin yarı iletken ekosistemindeki başlıca kullanım alanları ve sağladığı katkılar, Tablo 1'de özetlenmiştir.

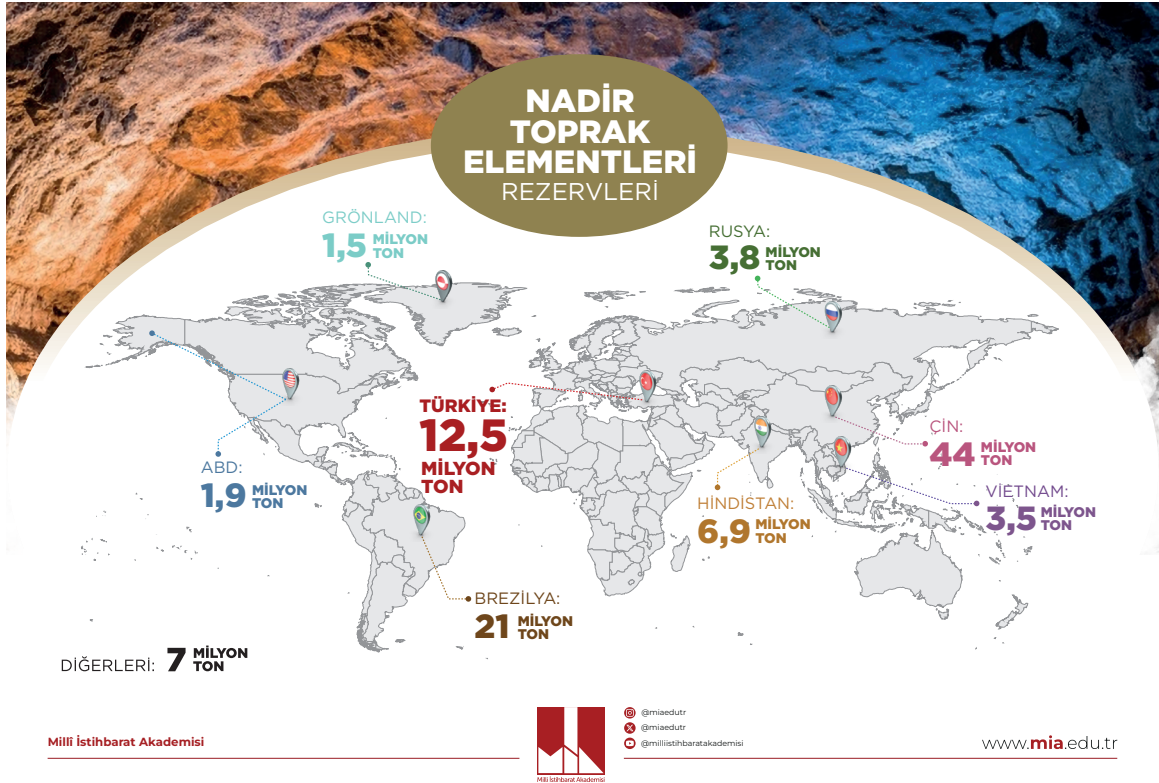
Tablo 1: Nadir Toprak Elementlerinin Çip Teknolojisinde Kullanım Alanları ve Katkıları

Kullanım Alanı	Örnek Bileşen/Süreç	Kullanılan NTE'ler	Sağladığı Katkılar
Üretim Süreci	STI/oksit CMP bulamaçları	Seryum	Yüksek seçicilikte, düşük kusurlu yüzey eldesi ve ileri düğümlerde kritik düzlemsellik ³⁴
Üretim Ekipmanı	Litografi wafer sahnesi lineer motorları, wafer-handling robotları, vakum pompaları	Neodimyum, Disprosyum (Mıknatıslar)	Nano-ölçekte hızlı/hassas konumlandırma, yüksek tork yoğunluğu ve ısı dayanımı ³⁵
RF/İletişim (5G, Radar)	İzolatör/dolaştırıcı ferritleri	İtriyum, Terbiyum	Mikrodalga yönlendiricilerde düşük kayıp ve yüksek yalıtım, 5G baz istasyonlarında yaygın ³⁶
Optik/Ekran ve Sensör Ekosistemi	LED fosforları, IR optikler, bazı lens camları	Evropiyum, Terbiyum, İtriyum, Seryum	Yüksek parlaklık ve doğru renk, bazı kamera/sensör optiklerinde performans artışı ³⁷
Yüksek Verimli Güç Elektroniği	Endüktör/trafo çekirdekleri, soğutma fanları, güç modüllerinin manyetikleri	Neodimyum, Disprosyum (Mıknatıslar)	Güç yoğunluğu artışı, kayıpların düşmesi, yapay zekâ sunucuları ve otomotiv elektroniğinde kritik ³⁸
Yapay Zekâ/ Veri Merkezi Altyapısı	Sunucu fan/aktüatörleri, HDD/robotik, güç elektroniği		Büyük ölçekli veri merkezlerinde sistem bütününde enerji/verim kazanımı

NTE'nin tedarik zinciri; madenden çıkarılmasından ayrıştırma ve rafinaja, ardından alaşım ve mıknatıs üretimine ve son olarak geri dönüşüme uzanan çok aşamalı bir süreçtir. Zincirin gerçek darboğazını oluşturan ayrıştırma ve rafinaj kapasitesi, pazar gücünü büyük ölçüde belirlemektedir. Bu çerçevede Çin'in hem rezerv hem de ayrıştırma ve rafinaj basamaklarındaki yüksek payı, uluslararası bağımlılık ağında asimetrik bir tablo yaratmaktadır (bk. Harita 4). Son yıllarda ABD'nin NTE ithalatının önemli bölümü, doğrudan ya da dolaylı olarak Çin kaynaklı olarak gerçekleşmiştir.³⁹ Estonya, Japonya ve Malezya gibi ara tedarikçiler dahi çoğu zaman Çin veya Avustralya menşeli konsantreleri işleyerek

ürün sunmaktadır. Bu tablo, Çin'in hem rezerv hem rafinaj hem de mıknaatıs üretiminde kurmuş olduğu değer zinciri sayesinde kamuoyunda %90 üzerindeki küresel hâkimiyeti olarak ifade edilen durumu somutlaştırmaktadır.⁴⁰ Yoğunlaşma, en çok rafinaj ve kalıcı mıknaatıs üretimi aşamalarında görülmekte; dolayısıyla küresel tedarik güvenliği bu basamaklardaki kapasiteye duyarlı hâle gelmektedir.

Harita 4: Dünyada Nadir Toprak Elementleri Rezervleri



Çin'in konumu, kritik ham madde diplomasisinin politika araç setine dâhil edilmesini kolaylaştırmıştır. Pekin yönetimi, Temmuz 2023'te sekiz galyum ve altı germanyum ürünü için ihracat kısıtlamaları ilan ederek lisans onayı ve uç kullanım beyanları üzerinden sevkiyat akışını denetim altına almıştır.⁴¹ Galyum ve germanyum; bazı özel yarı iletkenlerde, kızılötesi optiklerde ve güneş hücresi üretiminde zor ikame edilebilir girdilerdendir. Kısıtlamaların hemen ardından galyum ve germanyum sevkiyatları durma noktasına gelmiştir.⁴² Bu gelişmeler, kritik ham madde kontrollerinin yalnızca bir ambargo değil; aynı zamanda üretici ülkelerin elindeki esnek bir ekonomik kaldıraç olduğunu da göstermiştir.

Arz şoklarına verilen politika yanıtları genellikle çeşitlendirme, yerlileştirme ve stratejik stok başlıklarında toplanmaktadır. ABD ve müttefikleri, bir yandan yeni maden ve rafinaj projelerine yatırım yaparken diğer yandan kalıcı mıknaatıs üretimi ile geri dönüşüm için ülke içinde kapasite kurmayı hedeflemektedir.⁴³ Bu çerçevede Lynas Rare Earths (Avustralya), Çin dışındaki en büyük rafinaj kapasitesiyle kalıcı mıknaatıs tedarik zincirinde kilit bir konumda yer almaktadır.⁴⁴ Şirketin Batı Avustralya'daki

Kalgoorlie tesisinin amaçlarından biri, Mt Weld sahasından çıkarılan cevheri yerinde işleyerek ara ürünlere bağımlılığı azaltmaktır. Malezya'daki tesisleri ise bölgesel işleme ağının omurgasını oluşturmaktadır. ABD'de ise MP Materials, Mountain Pass sahasındaki üretimini ara ürünlere doğru güçlendirirken ülke içinde mıknaş üretimi için de adımlar atmaktadır.⁴⁵ Bu girişimler, uzun süredir Çin dışında zayıf kalan rafinaj ve mıknaş üretimi halkalarının yeniden canlandırılmasında önem taşımaktadır. Buradaki temel amaç; kritik girdilerde tek bir kaynağa aşırı bağımlılığı azaltmak, tedarik güvenliğini güçlendirmek ve fiyat ile teslimat sürelerindeki dalgalanmalara karşı daha dayanıklı bir yapı kurmaktır.

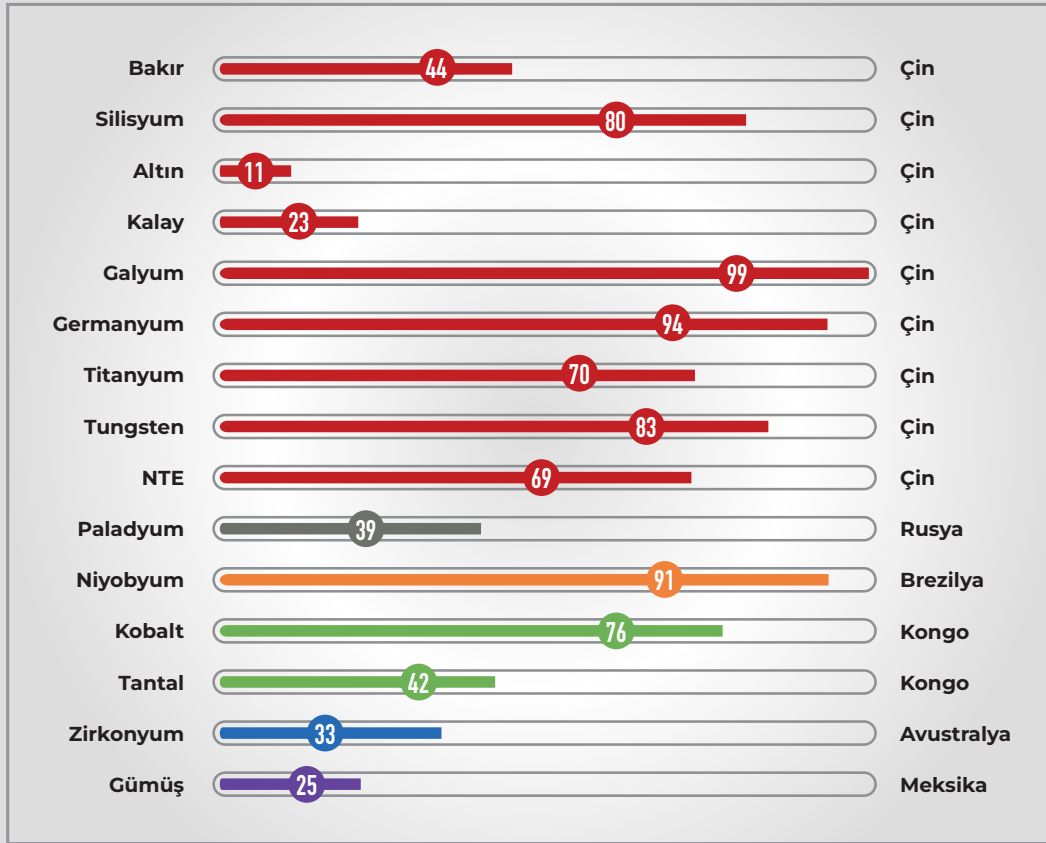
Çeşitlendirme çabaları yalnızca Avustralya ve ABD ile sınırlı değildir. AB, kritik ham maddelere erişimi güvence altına almak için mevzuatını ve finansman araçlarını 2024'te güncellemiştir.⁴⁶ Ancak bir madeni işletme açmaktan ayrıştırma tesislerinin çevresel onaylarına, kimyasal tedarik altyapısından nihai kalıcı mıknaş üretimine kadar uzanan tüm zinciri aynı anda büyütmek; zaman, yüksek sermaye ve politik tutarlılık gerektirmektedir. Bu nedenle arz güvenliği, kısa vadeli piyasa müdahaleleriyle sağlanamamaktadır. Devlet garantileri, alım taahhütleri ve teknoloji paylaşımı gibi araçlar; yatırım riskini azaltmada belirleyici bir rol oynamaktadır.⁴⁷ Ayrıca geri dönüşümün ölçeklenmesi ve sanayi hurdasının verimli toplanması, özellikle kalıcı mıknaşlar için ikinci bir kaynak tabanı oluşturma potansiyeli taşımaktadır.⁴⁸ Bununla birlikte kalite standardizasyonu ve toplama ağları, birçok ülkede henüz yeterince olgun değildir. Bu yüzden politika tasarımı, birincil üretim (maden ve rafinaj) ile ikincil üretim (geri kazanım) arasında dengeli bir yol izlemek zorundadır.

Çip üretiminde öne çıkan kritik ham maddelerin en önemli üretici aktörü Çin'dir (bk. Grafik 1).⁴⁹ Tüm gelişmeler kritik ham maddelerin, çip rekabetinde yardımcı unsur olmaktan çıkıp stratejik bir denge unsuru olduğunu göstermektedir. Bu çerçevede ABD için en gerçekçi yol; yerli rafinaj ve mıknaş üretimini artırmak, Avustralya ve benzeri ortaklarla uzun vadeli tedarik anlaşmaları yapmak, çevresel standartları rekabeti zorlaştırmayacak biçimde uyumlu hâle getirmek ve geri dönüşümü ikincil fakat güvenilir bir kaynak tabanı seviyesine taşımaktır. **Çin açısından kritik ham madde kontrolleri, tek başına kesin çözüm değildir. Bu araçlar; uzun süre sert biçimde kullanıldığında, küresel alıcıların kalıcı çeşitlendirmeye yönelmesini hızlandırabilir.** Bununla birlikte NTE'de sermaye ve teknoloji yoğun rafinaj yetkinliği ile mıknaş üretimindeki birikim, Çin'in pazarlık gücünü orta vadede korumasına imkân tanımaktadır.

Kritik ham maddeler, yarı iletkenlerin geleceğini belirleyecek başlıca unsurlardan biri hâline gelmiştir. NTE, galyum ve germanyum gibi malzemeler, litografi ve lazer sistemleri için gereken neon/helyum gazları ile yüksek saflıkta kullanılan kimyasallar; çip üretimini doğrudan etkilemektedir. NTE'lerin manyetik ve optik işlevleri, gelişmiş paketleme ile üretim ekipmanlarında vazgeçilmezliğini korurken arz kurallarındaki lisans ve kısıtlama gibi değişiklikler, tedarik zincirinde gecikme ve maliyet artışına yol açabilmektedir. **Bu nedenle en az iki tedarikçi ve en az iki coğrafya yaklaşımı kurumsallaşacaktır.** Çin dışındaki maden, rafinaj, alayım ve mıknaş kapasitesinin büyütülmesi; devlet garantileri ve alım taahhütleriyle desteklenmelidir. Avustralya, ABD ve Kanada'da "NTE, grafit, nikel ve kobalt" gibi tamamlayıcı girdilerde yeni projelerin hızlanması; Afrika ve Grönland'ın ise -çevresel izin süreçleri

güvenilir biçimde yürütüldüğü takdirde- arzı çeşitlendirmede öne çıkması beklenmektedir. Ancak yalnızca maden açmak yeterli olmamakta, ayrıştırma ve rafinaj zinciri kurulmadıkça pazar gücü sınırlı kalmaktadır. Bu eksikliği gidermek için standart uyum, çevresel altyapı ve nitelikli insan kaynağına yapılacak yatırımlar; politika tasarımının ayrılmaz parçaları olmalıdır. Aksi hâlde birincil üretim artsa dahi ara aşamalardaki darboğazlar, bağımlılığı farklı bir halkada yeniden ortaya çıkaracaktır.

Grafik 1: Çip Üretiminde Öne Çıkan Kritik Ham Maddelerin Dünyada Önde Gelen Üretici Ülkeleri ve Oranları



SONUÇ VE TÜRKİYE İÇİN ÖNERİLER

SONUÇ VE TÜRKİYE İÇİN ÖNERİLER

Çipler; teknolojinin görünmez altyapısını oluşturan teknik bileşenler olmanın ötesinde, egemenlik ve bağımsızlık arayışının merkezinde yer alan stratejik unsurlardır. Bu çalışmada gösterildiği üzere **çip savaşları, yalnızca teknoloji alanındaki bir rekabeti değil; güvenlik mimarisi, jeopolitik dengeler, ittifak ilişkileri, jeoekonomik çatışmalar, sanayi politikası ve kritik ham madde stratejilerinin iç içe geçtiği daha geniş bir güç mücadelesini de ifade etmektedir.**

Bugün, gücün ölçüsü yalnızca kaynağa sahip olmak değildir. Belirleyici olan husus; bilgi, sermaye, ekipman ve tedarikten oluşan karmaşık bir ağı yönetebilme kapasitesidir. Bu nedenle teknolojik güç, yalnızca donanım üretmek anlamına gelmemekte; standartları belirlemek, makine ve yazılım darboğazlarında söz sahibi olmak, kritik ham madde zincirlerini dayanıklı kılmak ve tüm bunları sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu yürütmek anlamı da taşımaktadır. **Bu çerçevede yarı iletkenler, küresel düzenin yönünü tayin eden temel göstergelerden biri hâline gelmiştir.**

Bu kapsamda, küresel tedarik zincirlerinin yeniden şekillenmekte olduğu **çok kutuplu bir teknolojik rekabet döneminde bulunduğumuz açıktır.** ABD'nin tasarım, EDA yazılımları ve ileri ekipmanlarda ittifak temelli bir üstünlüğü sürdürme hedefi; Tayvan ve Güney Kore'nin ileri çip üretimindeki belirleyici rolleri; Avrupa'nın ekipman, malzeme ve düzenleyici standartlarda derinleşme stratejisi; Çin'in ise ölçek, olgun düğümler ve kritik ham madde kaldırıcılarıyla inşa ettiği yaklaşımı, tek bir hat üzerinde buluşmayan fakat birbirini tamamlayan ve dengeleyen bir tablo ortaya çıkarmaktadır. **Bu tablo, tam bir ayrışmayı değil; seçici ayrışmayı işaret etmektedir.** Söz konusu yaklaşım, köprülerin tamamen kopmadığı ancak kritik katmanlarda bölgesel esneklik ve ikili ilişkilerin belirleyici kural hâline geldiği bir yapıyı tanımlamaktadır. Bu durum; şirketlerin ürün yol haritalarını, coğrafi risk dağılımını ve finansman modellerini köklü biçimde dönüştürecektir.

Kritik ham madde güvenliği, bu dönüşümün ihmal edilemez bir eksenidir. NTE, galyum ve germanyum gibi önemli girdiler, litografi ve kaplama süreçlerine eşlik eden yüksek saflıkta kimyasallar, kritik gazlar ve ileri paketleme malzemeleri; tedarik stratejilerinin ayrılmaz parçaları hâline gelmiştir. **Bu bağlamda sıfır bağımlılık hedefi, gerçekçi değildir. Gerçekçi olan "çeşitlendirme, yerli işleme kapasitesi, ikincil kaynak/geri dönüşüm ve stratejik stok yönetimi"nden oluşan dört sütunlu bir dayanıklılık mimarisidir.** Aksi hâlde zincirin bir halkasında yaratılan herhangi bir belirsizlik, tüm değer zincirine maliyet ve gecikme olarak yansıyacaktır. Bu nedenle zorunlu asgari stok seviyeleri, uzun vadeli alım taahhütleri, çevresel faktörlerin gözetildiği maden ayrıştırma yatırımları ve standart uyumu; sadece kaynak siyasetinin değil, çip politikasının da kritik konusudur.

Ulusal politika düzeyinde çıkarımlar:

- Çip üretim kapasitesi sadece fiziksel dökümhane sayısı ile ölçülmemeli; bunun dışında ileri düğüm süreç olgunluğu, verim yönetimi, gelişmiş paketleme ve ekipman bakım/ikmal kabiliyetiyle birlikte ele alınmalıdır.

- AR-GE'nin hedefi yalnızca transistörleri küçültmek değil; enerji verimliliği, performans artışı, yazılım ile donanımın birlikte tasarlanması ve tedarikte yaşanabilecek aksaklıklara karşı çalışmalar yapmak da olmalıdır.
- Stratejik stok yönetimi, kriz zamanı beklenmeden tedarik ikame planları ve asgari stok kurallarıyla kurumsallaştırılmalıdır.
- Yetenek havuzu ve eğitim ekosistemi, uzun vadeli rekabet gücünün anahtarı olduğundan "yarı iletken tasarım ve üretim mühendisliği, malzeme bilimi, EDA yazılımları ve sistem mimarisi" gibi alanlarda insan kaynağı arzı artırılmadan, sermaye ve regülasyon tek başına sonuç üretmez.

Türkiye açısından çıkarımlar:

- **En gerçekçi strateji**, ileri düzey çip fabrikalarını sıfırdan kurmaya çalışmak yerine güçlü ve avantajlı olunabilecek aşamalara odaklanmaktır.
- **Bu çerçevede çip tasarımı faaliyetlerinin desteklenmesi, ileri paketleme ve test aşamalarında bölgesel bir kapasite oluşturulması ve güç elektroniği gibi talebi artan alanlara uygun modüllerin geliştirilmesi ön plana çıkmalıdır.**
- Türkiye'nin NTE varlığı dikkatle ele alınmalı; NTE'ler çıkarıldıktan sonra ülke içinde ayrıştırılıp kalıcı müknaş gibi katma değerli ürünlere dönüştürülmelidir. **Bu yaklaşım; ileri üretim hattına girmeden, yarı iletken tedarik zincirinde Türkiye'ye kritik ve güvenilir bir aktör olma imkânı sunacaktır.**
- Bu hedefe ulaşmak için tasarım ekosisteminin erişilebilir araçlarla ve ortak laboratuvarlarla güçlendirilmesi, paketleme ve test tarafında otomotiv ve endüstriyel standartlarla uyumlu merkezlerin kurulması ve belgelendirme süreçlerinin hızlandırılması önemlidir.
- NTE ve kritik kimyasallar için uzun vadeli tedarik anlaşmaları yapılması, geri dönüşümün ölçeklendirilmesi ve çevresel izinlerin öngörülebilir şekilde yönetilmesi de stratejinin tamamlayıcı unsurlarıdır.
- AB ile standart ve sertifikasyon alanlarındaki yakın uyum, Türkiye'yi kıta pazarına yakın ve güvenilir bir tedarik ortağı hâline getirebilir.
- **Türkiye açısından stratejik hedef; tasarımda yetkin, paketleme ve testte güçlü, NTE girdilerinde dayanıklı bir konumlanma olmalıdır.** Söz konusu konumlanma; iç pazarın ihtiyaçlarını karşılayanın ötesinde, bölgesel ölçekte istikrarlı hizmet sunan ve kriz anlarında esnek üretim kaydırmaları yapabilen bir altyapının kurulmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

KAYNAKÇA

- ¹ Ondrej Burkacky, Julia Dragon ve Nikolaus Lehmann, The semiconductor decade: A trillion-dollar industry (2022). Erişim Adresi: <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/the-semiconductor-decade-a-trillion-dollar-industry> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ² Hyunjoo Jin, Automakers, Chip firms differ on when semiconductor shortage will abate (2022). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/automakers-chip-firms-differ-when-semiconductor-shortage-will-abate-2022-02-04/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³ Akhil Thadani ve Gregory C. Allen, Mapping the semiconductor supply chain: the critical role of the Indo-Pacific region (2023). Erişim Adresi: <https://www.csis.org/analysis/mapping-semiconductor-supply-chain-critical-role-indo-pacific-region> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴ Jan-Peter Kleinhans, Mario Alejandro Nieves, Sara Romaniega Sancho ve Charles-Édouard van de Put, Mapping the semiconductor value chain (2025). Erişim Adresi: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/06/mapping-the-semiconductor-value-chain_5ba52971/4154cdbf-en.pdf [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁵ Reuters, China to restrict exports of chipmaking materials as US mulls new curbs (2023). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/markets/commodities/china-restrict-exports-chipmaking-materials-us-mulls-new-curbs-2023-07-04/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁶ Kayla Zhu, Ranked: semiconductor foundries by revenue share (2025). Erişim Adresi: <https://www.visualcapitalist.com/ranked-semiconductor-foundries-by-revenue-share/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁷ TSMC, 2024 annual report (2025). Erişim Adresi: <https://investor.tsmc.com/static/annualReports/2024/english/index.html> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁸ TSMC, Logic technology (2025). Erişim Adresi: <https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁹ James Myers, Future chips will be hotter than ever (2025). Erişim Adresi: <https://spectrum.ieee.org/hot-chips> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹⁰ Ed Sperling, Multi-Patterning Issues At 7nm, 5nm (2016). Erişim Adresi: <https://semiengineering.com/multi-patterning-problems-grow/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹¹ Cp Hung, Advanced packaging design for heterogeneous integration (2024). Erişim Adresi: <https://semiengineering.com/advanced-packaging-design-for-heterogeneous-integration/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹² IEEE Heterogeneous Integration Roadmap, Test technology (2024). Erişim Adresi: https://eps.ieee.org/images/files/HIR_2024/HIR_2024_ch17_Test_Technology.pdf [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹³ Anton Shilov, TSMC Outlines 3nm roadmap: five finflex nodes (2022). Erişim Adresi: <https://www.tomshardware.com/news/tsmc-outlines-3nm-roadmap> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹⁴ Hyunjoo Jin ve Fanny Potkin, Samsung hikes memory chip prices by up to 60% as shortage worsens (2025). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/world/china/samsung-hikes-memory-chip-prices-by-up-60-shortage-worsens-sources-say-2025-11-14/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹⁵ Reuters, Semiconductor equipment maker ASML ships second High NA EUV machine (2024). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/technology/semiconductor-equipment-maker-asml-ships-second-high-na-euv-machine-2024-04-17/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].

- ¹⁶ TrendForce, Top 10 OSAT companies of 2024 revealed-China players see double-digit growth, reshaping the global market landscape, says trendforce (2025). Erişim Adresi: <https://www.trendforce.com/presscenter/news/20250513-12577.html> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹⁷ Joseph White, Supply chain snarls could cost automakers \$210 billion this year, forecast finds (2021). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/supply-chain-snarls-could-cost-automakers-210-billion-this-year-forecast-finds-2021-09-23/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹⁸ Toby Sterling ve Nathan Vifflin, ASML's order book expected to jump on AI chip boom (2024). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/technology/asmls-order-book-expected-benefit-ai-chip-boom-2024-07-16/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ¹⁹ Timothy Aeppel, Just-in-time gives way to "buy everything you can" as U.S. supply disruptions persist (2022). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/business/just-in-time-gives-way-buy-everything-you-can-us-supply-disruptions-persist-2022-01-28/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²⁰ 117th Congress (2021-2022), CHIPS and science act (2022). Erişim Adresi: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/4346> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²¹ Reuters, ASML says geopolitics, new export restrictions remain risks (2024). Erişim Adresi: <https://www.reuters.com/technology/asml-says-geopolitics-new-export-restrictions-remain-risks-2024-02-14/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²² The White House, Remarks by national security advisor Jake Sullivan on renewing American economic leadership at the brookings institution (2023). Erişim Adresi: <https://bidenwhitehouse.archives.gov/briefing-room/speeches-remarks/2023/04/27/remarks-by-national-security-advisor-jake-sullivan-on-renewing-american-economic-leadership-at-the-brookings-institution/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²³ Tim Rühl, China's legacy chip buildout a new EU strategic dependency that needs de-risking? (2025). Erişim Adresi: <https://www.ui.se/globalassets/ui.se-eng/publications/ui-publications/2025/ui-brief-no.-2-2025-china-legacy-chips.pdf> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²⁴ Anton Shilov, Huawei reportedly acquired two million Ascend 910 AI chips from TSMC last year through shell companies (2025). Erişim Adresi: <https://www.tomshardware.com/tech-industry/artificial-intelligence/huawei-reportedly-acquired-two-million-ascend-910-ai-chips-from-tsmc-last-year-through-shell-companies> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²⁵ Jost Wübbeke, Mirjam Meissner, Max J. Zenglein, Jaqueline Ives ve Björn Conrad, Made in China 2025 (2016). Erişim Adresi: <https://merics.org/sites/default/files/2020-04/Made%20in%20China%202025.pdf> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²⁶ Millî İstihbarat Akademisi, Nadir toprak elementleri ve Türkiye: Jeopolitik satrançta yeni dinamikler ve aktörler (2025). Erişim Adresi: https://mia.edu.tr/uploads/f/nadir-toprak-elementleri-ve-turkiye-jeopolitik-satrancta-yeni-dinamikler-ve-aktorler_1.pdf?v=1748588357 [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²⁷ Gracelin Baskaran ve Meredith Schwartz, China imposes its most stringent critical minerals export restrictions yet amidst escalating U.S.-China tech war (2024). Erişim Adresi: <https://www.csis.org/analysis/china-imposes-its-most-stringent-critical-minerals-export-restrictions-yet-amidst> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ²⁸ Chen Yu-fu, Taiwan keeping its industrial roots: Cho (2025). Erişim Adresi: <https://www.taipeitimes.com/News/front/archives/2025/08/26/2003842673> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].

-
- ²⁹ Peter S. Goodman, 18,000 Reasons It's So Hard to Build a Chip Factory in America (2025). Erişim Adresi: <https://www.seattletimes.com/business/18000-reasons-its-so-hard-to-build-a-chip-factory-in-america/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³⁰ European Commission, European Chips Act (2023). Erişim Adresi: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³¹ IoT Analytics, The leading generative AI companies (2023). Erişim Adresi: <https://iot-analytics.com/wp-content/uploads/2023/12/INSIGHTS-RELEASE-The-leading-generative-AI-companies.pdf> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³² Vysetti Balaram, Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact (2019). Erişim Adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987119300258> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³³ International Renewable Energy Agency, critical materials for the energy transition: rare earth elements (2022). Erişim Adresi: https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Technical-papers/IRENA_Rare_Earth_Elements_2022.pdf [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³⁴ Jaewon Lee vd., Improvement of oxide chemical mechanical polishing performance by increasing Ce³⁺/Ce⁴⁺ ratio in ceria slurry via hydrogen reduction (2023). Erişim Adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369800123000422> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³⁵ Alan Patterson, China's rare earth controls may impact chip industry by 2026 (2025). Erişim Adresi: <https://www.eetimes.com/chinas-rare-earth-controls-may-impact-chip-industry-by-2026/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³⁶ Michael D. Hill ve David B. Cruickshank, Ceramic materials for 5G wireless communication systems (2019). Erişim Adresi: https://ceramics.org/wp-content/uploads/2019/07/August-2019_Feature.pdf [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³⁷ Rare Earth Exchanges, 7 rare earth phosphors LED insights you need in 2024 (2024). Erişim Adresi: <https://rareearthexchanges.com/rare-earth-phosphors-led/> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³⁸ European Raw Materials Alliance, Rare earth magnets and motors: a european call for action (2021). Erişim Adresi: https://www.eit.europa.eu/sites/default/files/2021_09-24_ree_cluster_report2.pdf [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ³⁹ U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries (2025). Erişim Adresi: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-rare-earths.pdf> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴⁰ Gracelin Baskaran, China's new rare earth and magnet restrictions threaten U.S. defense supply chains (2025). Erişim Adresi: <https://www.csis.org/analysis/chinas-new-rare-earth-and-magnet-restrictions-threaten-us-defense-supply-chains> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴¹ Ministry of Commerce People's Republic of China, MOFCOM regular press conference (2023). Erişim Adresi: https://english.mofcom.gov.cn/News/PressConference/art/2023/art_36fb2d80e4b4453891bb8fc83e2b3c4e.html [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴² The Straits Times, China exported no germanium, gallium in August due to curbs on the chipmaking metals (2023). Erişim Adresi: <https://www.straitstimes.com/business/china-exported-no-germanium-gallium-in-august-due-to-export-curbs> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].

- ⁴³ U.S. Department of Energy, Rare earth permanent magnets (2022). Erişim Adresi: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/Neodymium%2520Magnets%2520Supply%2520Chain%2520Report%2520-%2520Final%5B1%5D.pdf> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴⁴ The Northern Miner Group, Lynas becomes first producer of heavy rare earths outside China (2025). Erişim Adresi: <https://www.mining.com/subscribe-login/?id=1179138> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴⁵ Matt Sloustcher, MP materials begins construction on texas rare earth magnetics factory to restore full U.S. supply Chain (2022). Erişim Adresi: <https://investors.mpmaterials.com/investor-news/news-details/2022/MP-Materials-Begins-Construction-on-Texas-Rare-Earth-Magnetics-Factory-to-Restore-Full-U.S.-Supply-Chain/default.aspx> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴⁶ European Union, Establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending regulations (2024). Erişim Adresi: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/2024-05-03/eng> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴⁷ International Energy Agency, Global critical minerals outlook 2025 (2025). Erişim Adresi: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ef5e9b70-3374-4caa-ba9d-19c72253bfc4/GlobalCriticalMineralsOutlook2025.pdf> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴⁸ International Energy Agency, Recycling of critical minerals (2024). Erişim Adresi: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3af7fda6-8fd9-46b7-bede-395f7f8f9943/RecyclingofCriticalMinerals.pdf> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].
- ⁴⁹ Ryan C. Berg, Henry Ziemer ve Emiliano Polo Anaya, Mineral demands for resilient semiconductor supply chains (2024). Erişim Adresi: <https://www.csis.org/analysis/mineral-demands-resilient-semiconductor-supply-chains> [Erişim Tarihi: 10.12.2025].

NOTLAR

[illegible]





ÇİP SAVAŞLARI
VE NADİR TOPRAK
ELEMENTLERİ

OCAK 2026