

TEKNOLOJİ OLGUNLUĞU

Bir Teknoloji Ne Zaman Ürüne Dönüşmeye Hazırdır?

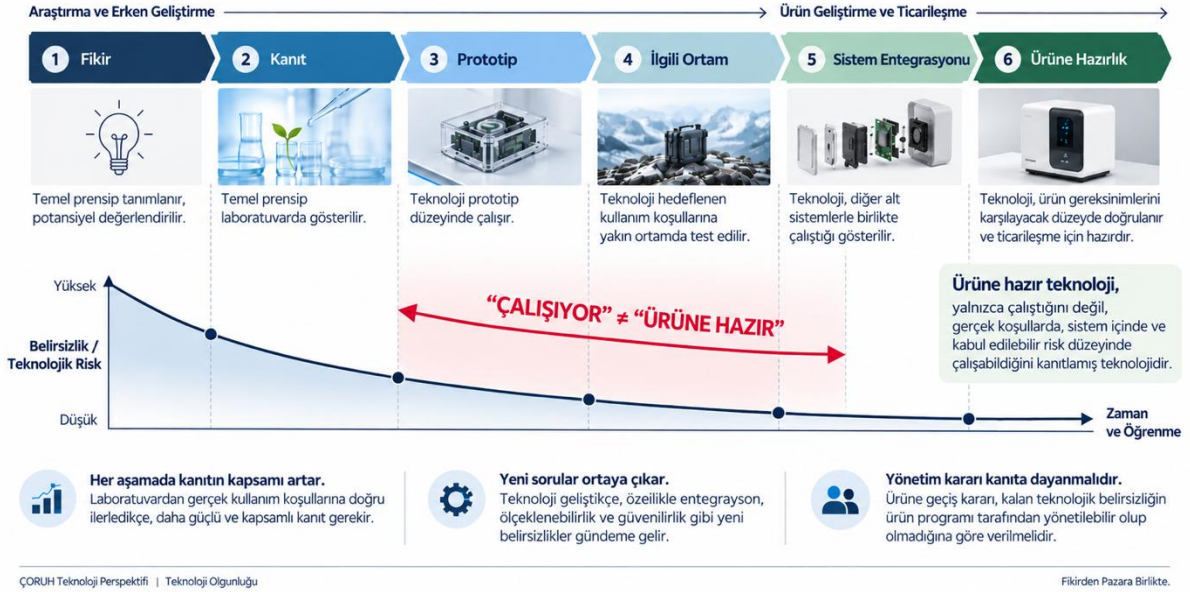
YÖNETİCİ ÖZETİ

Teknoloji geliştiren şirketler için en yanıltıcı başarı anlarından biri, yeni bir teknolojinin ilk kez çalıştığı andır. Bir sensör hedeflenen hassasiyette ölçüm yaptığında, bir algoritma beklenen doğruluğa ulaştığında, yeni geliştirilen bir malzeme laboratuvar testlerinde istenen özelliği gösterdiğinde veya yeni bir üretim yöntemi ilk başarılı numuneyi ortaya çıkardığında önemli bir teknik eşik aşılmış olur. Aylar, bazen yıllar süren araştırmanın ardından elde edilen bu sonuç doğal olarak organizasyonda güçlü bir ilerleme algısı yaratır. Teknolojinin artık “çalıştığı” düşünülür ve bir sonraki adımın onu ürüne dönüştürmek olduğu varsayılır.

Oysa teknoloji geliştirme açısından başarı olarak kabul edilen bu nokta, ürün geliştirme açısından çoğu zaman başlangıçtır. Laboratuvar da elde edilen performans kontrollü koşulların sonucudur; ürün ise kontrolün önemli ölçüde azaldığı bir dünyada çalışmak zorundadır. Kullanıcılar, çevresel koşullar, üretim toleransları, veri kalitesi, diğer alt sistemler ve kullanım biçimleri değişir. Teknolojinin bu değişkenlik karşısında nasıl davranacağı yeterince bilinmiyorsa, teknik prensibin kanıtlanmış olması ürün riskinin ortadan kalktığı anlamına gelmez. Tam tersine, teknoloji laboratuvar dan ürüne yaklaştıkça daha önce görünmeyen yeni belirsizlikler ortaya çıkabilir.

Bu nedenle teknoloji olgunluğunu yalnızca teknolojinin ne kadar ilerlediğini gösteren bir ölçek olarak ele almak eksik kalır. Yönetim açısından daha anlamlı olan, teknoloji geliştirme sürecinde **hangi belirsizliklerin ortadan kaldırıldığı, hangilerinin hâlâ açık olduğu ve kalan belirsizliğin ürün geliştirme programı tarafından taşınıp taşınmayacağıdır**. Bu bakış açısı teknoloji olgunluğunu teknik bir sınıflandırmadan çıkararak strateji, yatırım ve risk yönetimi problemine dönüştürür. Buradaki kritik ayrım “teknoloji çalışıyor mu?” ile “teknoloji ürüne hazır mı?” soruları arasındadır. Birincisi teknolojik fizibiliteyi sorgular. İkincisi ise çok daha geniş bir problemi kapsar: Teknoloji hedeflenen performansı ilgili kullanım koşullarında tekrarlanabilir biçimde sağlayabiliyor mu, diğer sistem bileşenleriyle birlikte çalışabiliyor mu ve hâlâ taşıdığı teknik belirsizlik ürün programının zaman, maliyet ve performans hedeflerini kabul edilemez ölçüde tehdit ediyor mu?

Bu ayrım aynı zamanda teknoloji geliştirme ile ürün geliştirme arasındaki sınırın neden takvimle çizilemeyeceğini de açıklar. Bir teknolojinin iki yıldır geliştiriliyor olması onu olgunlaştırmaz; on prototip üretilmiş olması da tek başına ürüne hazır hale getirmez. Olgunluğu yaratan şey geçen süre veya gerçekleştirilen faaliyet sayısı değil, bu faaliyetlerin ürettiği **kanıttır**. Her yeni deneyin, prototipin veya testin teknoloji hakkındaki kritik bir belirsizliği azaltması gerekir. Aksi durumda proje ilerliyor gibi görünürken teknolojik risk gerçekte aynı yerde kalabilir.



Şekil 1 – “Çalışıyor” ile “Ürüne Hazır” Arasındaki Mesafe
Teknolojik başarı, ürün hazırlığının başlangıcı olabilir; sonu değildir.

Bu nedenle teknoloji olgunluğunun yönetim açısından nihai amacı en yüksek olgunluk seviyesine ulaşmak değildir. Amaç, teknolojiyi ürün programına aktarırken kalan belirsizliğin kabul edilebilir olduğu noktayı belirlemektir. Başka bir ifadeyle teknoloji olgunluğu, yalnızca bir ilerleme ölçüsü değil, teknoloji geliştirmeden ürün geliştirmeye ne zaman risk transfer edilebileceğini belirleyen bir karar mekanizmasıdır.

1. TEKNOLOJİ OLGUNLUĞU ASLINDA BELİRSİZLİĞİN AZALTILMASIDIR

Teknoloji geliştirme sürecinin başlangıcında bir şirketin elinde genellikle bir fikirden çok daha fazlası, fakat bir üründen çok daha azı vardır. Temel bilimsel prensip biliniyor olabilir, ilk deneyler umut verici sonuçlar vermiş olabilir veya benzer bir teknoloji başka bir alanda başarıyla kullanılıyor olabilir. Ancak yeni kullanım bağlamında kritik soruların önemli bölümü henüz cevaplanmamıştır.

Teknoloji gerçekten beklenen fonksiyonu sağlayacak mıdır? Performans yalnızca belirli koşullarda mı elde edilmektedir, yoksa farklı örneklerde ve farklı koşullarda tekrarlanabilir midir? Ölçek büyüdüğünde aynı davranış korunacak mıdır? Diğer sistem bileşenleri teknolojinin performansını değiştirecek midir? Teknolojinin hassas olduğu çevresel veya operasyonel değişkenler nelerdir? Bu soruların cevapları bilinmediği sürece teknoloji üzerinde önemli miktarda belirsizlik bulunur. Dolayısıyla teknoloji geliştirme sürecini yalnızca performansı artırma faaliyeti olarak görmek yanıltıcıdır. İyi yönetilen bir teknoloji geliştirme programı aslında **belirsizlik azaltma programıdır**. Deneylerin, prototiplerin ve doğrulama faaliyetlerinin temel görevi teknolojinin daha gelişmiş bir sürümünü üretmekten önce, yönetimin teknoloji hakkında daha güvenilir karar verebilmesini sağlayacak bilgi üretmektir. Bu yaklaşım Ar-Ge'nin başarı tanımını da değiştirir. Başarılı deney yalnızca olumlu sonuç veren deney değildir. Bir varsayımı

geçersiz kılan deney de son derece değerlidir; çünkü şirketin daha büyük bir yatırım yapmadan önce yanlış bir varsayımı görmesini sağlar. Benzer şekilde başarısız bir prototip, hangi mekanizmanın çalışmadığını ortaya koyuyorsa teknoloji olgunluğuna katkıda bulunabilir. Buna karşılık çok sayıda prototip üreten fakat kritik belirsizlikleri değiştirmeyen bir proje, faaliyet açısından yoğun görünmesine rağmen olgunluk açısından çok az ilerlemiş olabilir. Bu nedenle teknoloji olgunluğunun temel yönetim sorusu “ne kadar çalışma yaptık?” değil, **“artık neyi biliyoruz ve hangi kritik sorular hâlâ cevapsız?”** olmalıdır. Bu bakış açısı yatırım kararları açısından da önemlidir. Teknoloji geliştirme ilerledikçe yatırımın gerekçesi yalnızca daha iyi performans elde etmek olmamalıdır. Her yeni yatırım diliminin hangi belirsizliği azaltacağı ve bu bilginin hangi sonraki kararı mümkün kılacağı açık olmalıdır. Böylece teknoloji geliştirme bütçesi, belirsiz bir geleceğe yapılan kesintisiz harcamadan çıkar ve birbirini takip eden öğrenme yatırımlarına dönüşür.

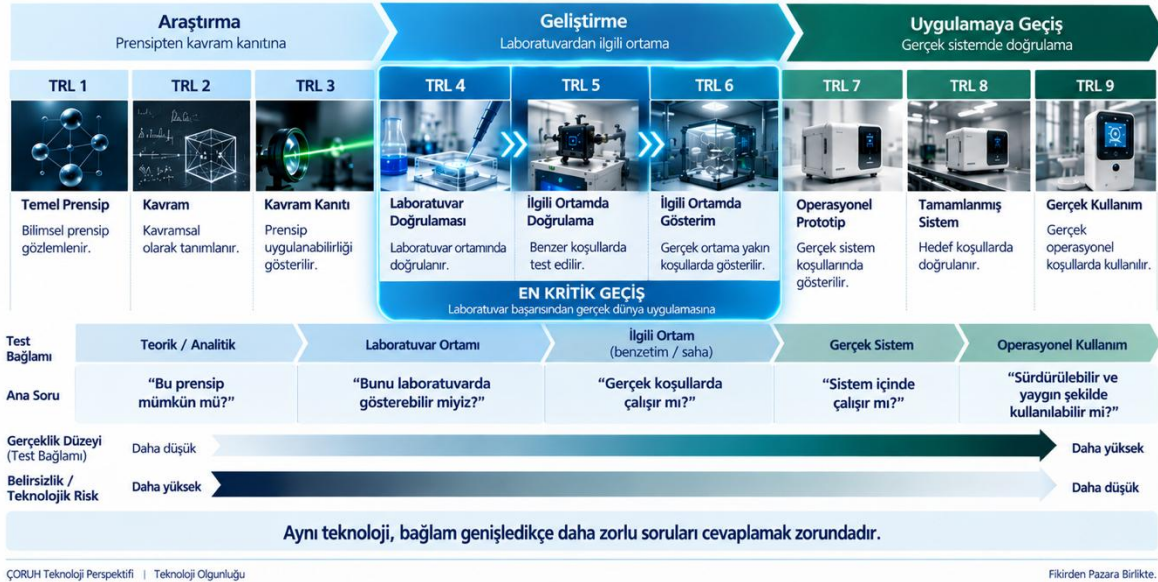
2. “TRL” BİZE NE SÖYLER, NEYİ SÖYLEMEZ?

Teknoloji olgunluğu tartışıldığında en yaygın kullanılan kavramlardan biri “Teknoloji Hazırlık Seviyesi (Technology Readiness Level)”, yani TRL'dir. NASA tarafından geliştirilen ve daha sonra farklı kurumlar ile programlarda kullanılan dokuz seviyeli yaklaşım, bir teknolojinin temel prensiplerin gözlenmesinden gerçek operasyonel koşullarda kanıtlanmış sisteme kadar ilerleyişini ortak bir dille ifade etmeyi amaçlar. NASA'nın güncel tanımlarında ölçek TRL 1'de temel prensiplerin gözlenmesiyle başlar ve TRL 9'da gerçek operasyonlar yoluyla kanıtlanmış sisteme kadar ilerler. Avrupa Komisyonu da araştırma ve inovasyon programlarında benzer dokuz seviyeli TRL yapısını kullanmaktadır.

TRL'nin yönetim açısından önemli bir faydası vardır: teknoloji ekiplerinin “neredeyiz?” sorusuna ortak bir dil sağlar. Fakat tam da bu kolaylık nedeniyle TRL bazen taşıyamayacağı kadar büyük bir anlamla yüklenir. Bir teknolojiye TRL 5 veya TRL 6 etiketi verilmesi, sanki teknoloji hakkındaki bütün önemli sorular cevaplanmış ve ürün geliştirmeye hazır hale gelmiş gibi yorumlanabilir. Oysa TRL'nin temel mantığında önemli olan yalnızca seviyenin numarası değil, **teknolojinin hangi bağlamda ve hangi kanıt düzeyinde gösterildiğidir**. Laboratuvar ortamında doğrulanan bir teknoloji ile ilgili kullanım ortamında gösterilen bir teknoloji arasında önemli bir fark vardır. Teknoloji yükselen olgunluk seviyelerinde yalnızca daha iyi çalışmaz; test edildiği bağlam giderek gerçek sisteme ve gerçek kullanım ortamına yaklaşır. Bu nedenle TRL'yi bir puanlama sistemi olarak değil, teknoloji hakkında üretilen kanıtın niteliğini sorgulayan bir çerçeve olarak kullanmak daha değerlidir. “TRL kaç?” sorusunun hemen ardından “Bunu hangi kanıtla söylüyoruz?” sorusu gelmelidir. Daha da önemlisi, yüksek bir TRL'nin otomatik olarak yüksek ürün hazırlığı anlamına gelmediği kabul edilmelidir.

Bir teknoloji teknik olarak oldukça olgun olabilir, fakat şirketin belirli ürünü açısından entegrasyon riski hâlâ yüksek olabilir. Teknoloji başka bir uygulamada başarıyla kullanılmış olabilir, ancak yeni ürünün performans gereksinimleri, kullanım ortamı veya

sistem mimarisi farklı olabilir. Dolayısıyla olgunluk bağlamdan bağımsız değildir. Bir teknolojinin geçmiş başarısı önemli bir kanıttır; fakat yeni ürün bağlamındaki belirsizliği otomatik olarak ortadan kaldırmaz. Burada önemli bir yönetim ilkesi ortaya çıkar: **TRL, ürün geliştirme kararının kendisi değil, bu karara girdi sağlayan göstergelerden biridir.**



Şekil 2 – Kanıtın Bağlamı Değiştikçe Olgunluk Artar

Aynı teknoloji, farklı bağlamlarda farklı soruları cevaplar.

Olgunluk, yalnızca daha iyi performans değil, daha gerçek koşullarda kanıtlama sürecidir.

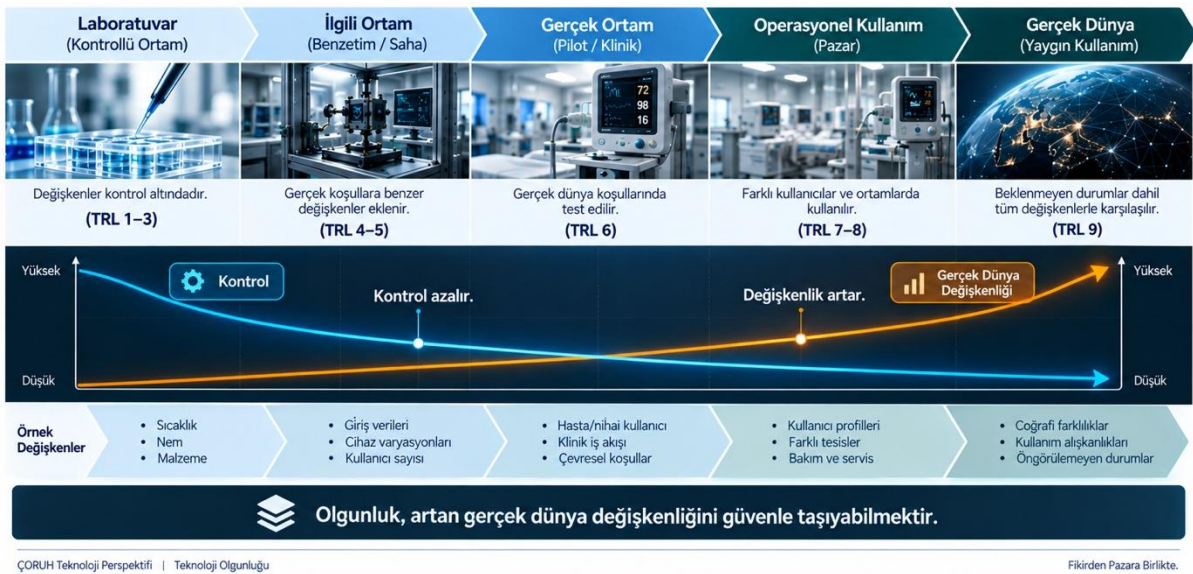
Olgunluk teknolojinin ne kadarının kanıtlandığını; ürüne hazırlık ise kalan belirsizliğin belirli bir ürün programı tarafından taşınıp taşınamayacağını ifade eder.

3. LABORATUVAR BAŞARISI NEDEN GERÇEK DÜNYA BAŞARISINA EŞİT DEĞİLDİR?

Teknolojinin olgunlaşma yolculuğundaki en kritik kırılmalardan biri laboratuvar ortamından ilgili kullanım ortamına geçiştir. Laboratuvarın temel avantajı kontrol edilebilirliktir. Araştırmacı sıcaklığı, numuneyi, operatörü, veri kalitesini ve diğer değişkenleri mümkün olduğunca kontrol altında tutabilir. Bu kontrollü ortam, teknolojinin temel çalışma prensibini izole etmek ve anlamak için gereklidir.

Ürün dünyası ise bunun tersidir. Ürün, teknolojinin etrafındaki değişkenlerin sürekli kontrol altında tutulamayacağı bir sistemde çalışır. Kullanıcı davranışları farklılaşır, çevresel koşullar değişir, bileşenler toleransları içinde farklı davranır, veri beklenen dağılımdan sapar ve ürün öngörülmeyle kullanım biçimleriyle karşılaşabilir. Bu nedenle teknoloji olgunlaştıkça testlerin yalnızca daha kapsamlı hale gelmesi yeterli değildir; **test bağlamının da gerçek dünyaya yaklaşması gerekir.**

Örneğin bir görüntü işleme algoritmasının dikkatle seçilmiş ve temizlenmiş bir veri setinde yüksek doğruluk göstermesi teknolojik fizibilite açısından önemli olabilir. Ancak gerçek üründe veri farklı cihazlardan, farklı kullanıcı gruplarından veya değişen çevresel koşullardan geliyorsa asıl olgunluk sorusu algoritmanın bu değişkenlik altında nasıl davrandığıdır. Benzer biçimde yeni bir sensör kontrollü laboratuvar koşullarında mükemmel performans gösterebilir; fakat sıcaklık, nem, titreşim veya farklı üretim partileri performansı etkiliyorsa ürün açısından kritik risk devam eder. Teknoloji geliştirme bu nedenle ideal koşullarda en yüksek performansı aramaktan, **gerçek koşullarda yeterince güvenilir performansı kanıtlamaya** doğru evrilmelidir.



Şekil 3 – Laboratuvar dan Gerçek Dünyaya
*Kontrol azılırken gerçek dünya değişkenliğinin arttığını;
 olgunluğunun bu değişkenliği taşıyabilmek olduğunu gösterir.*

Bu geçişin yönetim açısından önemli bir sonucu vardır. Teknoloji olgunlaştıkça yeni deneylerin amacı yalnızca performansı yükseltmek değil, performansın hangi koşullarda bozulduğunu anlamak olmalıdır. Başka bir ifadeyle olgun teknoloji yalnızca ne yapabildiğini bildiğimiz teknoloji değildir; **sınırlarını da bildiğimiz teknolojidir.**

4. TEKNOLOJİ TEK BAŞINA DEĞİL, SİSTEM İÇİNDE OLGUNLAŞIR

Teknoloji geliştirme ekiplerinin karşılaştığı bir başka yanıltıcı durum, tek başına başarılı çalışan bir teknolojinin sistem içine girdiğinde aynı performansı göstereceğinin varsayılmasıdır. Gerçekte ürünler tekil teknolojilerden değil, birbirine bağımlı alt sistemlerden oluşur. Bu nedenle teknolojinin olgunluğu arttıkça değerlendirme biriminin de değişmesi gerekir.

Bir sensör laboratuvar düzeneğinde hedeflenen hassasiyeti sağlayabilir; fakat elektronik sistemle entegre edildiğinde gürültü performansı değişebilir. Bir algoritma doğru veri

geldiğinde yüksek başarı gösterebilir; fakat ürünün veri toplama zinciri aynı veri kalitesini sağlayamayabilir. Yeni bir malzeme temel mekanik testlerde başarılı olabilir; ancak üretim prosesi, sterilizasyon veya uzun süreli depolama sonrasında özellikleri değişebilir. Bunların hiçbiri ilk teknoloji testinin yanlış olduğu anlamına gelmez. Sorun, teknolojinin bağlamının değişmesidir. Bu nedenle teknoloji olgunluğu ilerledikçe kanıtın kapsamı da genişlemelidir. İlk aşamada teknolojinin temel prensibi değerlendirilirken sonraki aşamalarda teknoloji ile alt sistem arasındaki etkileşim, daha sonra da teknolojinin bütün ürün sistemi ve kullanım ortamı içindeki davranışı değerlendirilmelidir.

Teknoloji olgunluğu böyle düşünüldüğünde doğrusal bir “prototip geliştirme” sürecinden çok, giderek genişleyen bir **sistem bağlamında kanıt üretme sürecidir**. Bu durum özellikle kritik teknolojiler açısından önemlidir. Bir teknolojinin ürünün performansına etkisi yüksekse, sistem mimarisinde değiştirilmesi zorsa veya başarısızlığı ürünün temel değer önerisini tehdit ediyorsa, entegrasyon belirsizliğinin ürün geliştirme programına taşınması çok daha pahalı hale gelebilir. Dolayısıyla “teknoloji çalışıyor” kararından sonra sorulması gereken soru şudur: **“Teknoloji, ait olacağı sistemin içinde de çalışıyor mu?”**

5. ÜRÜNE HAZIRLIK TEK BİR OLGUNLUK RAKAMINA İNDİRGENEMEZ

Teknoloji olgunluğunu yalnızca tek bir rakam üzerinden değerlendirmek, yönetim açısından farklı risklerin aynı sayı içinde kaybolmasına neden olabilir. Bir teknoloji fonksiyonel açıdan son derece güçlü olabilir, ancak üretim ölçeğinde aynı performansı sağlayamayabilir. Başka bir teknoloji sistem entegrasyonu açısından olgun olabilir, fakat gerçek kullanım ortamındaki davranışı yeterince bilinmiyor olabilir. Bu nedenle ürüne hazırlık değerlendirmesinde teknolojiye birkaç farklı açıdan bakmak gerekir.

- **İlk boyut** teknolojinin temel fonksiyonunu güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde yerine getirip getirmediğidir.
- **İkinci boyut**, bu performansın yalnızca kontrollü laboratuvar koşullarında değil, hedeflenen kullanım koşullarını temsil eden ortamlarda da korunup korunmadığıdır.
- **Üçüncü boyut**, teknolojinin diğer donanım, yazılım, veri ve mekanik bileşenlerle birlikte çalışabilmesidir.
- **Dördüncü boyut**, prototip düzeyinde elde edilen başarının üretim, hacim ve maliyet ölçeğine taşınabilirliğidir.
- **Beşinci ve bütün bunları birbirine bağlayan boyut** ise kanıtın olgunluğudur: teknoloji hakkındaki kararlar ne ölçüde varsayımlara ne ölçüde tekrarlanabilir ve izlenebilir verilere dayanmaktadır?

Bu beş boyut yeni bir olgunluk standardı oluşturmak amacıyla önerilmemektedir. Amaç, tek bir olgunluk seviyesinin arkasında saklanabilecek farklı riskleri yönetim açısından görünür hale getirmektir. Buradaki temel fikir şudur: **Bir teknoloji, en güçlü olduğu boyut kadar değil, ürün açısından kritik olan en zayıf boyut kadar hazır olabilir.**

Örneğin performans açısından çok ileri bir teknoloji, sistem entegrasyonu henüz gösterilmemişse ürün programı için hâlâ önemli bir risk taşıyabilir. Benzer şekilde teknik performansı ve entegrasyonu başarılı bir çözüm, üretim ölçeğine geçildiğinde kabul edilemez varyasyon gösteriyorsa ticarileşme açısından hazır olmayabilir. Bu nedenle teknoloji olgunluğunun yönetimi, ortalama bir skor arayışından çok **kritik zayıflıkları ortaya çıkarma** problemidir.



Şekil 4 – Ürüne Hazırlığın Beş Boyutu

Teknolojinin gerçek bir ürüne dönüşebilmesi, beş boyuta olgunlaşmayı gerektirir.

6. BÜTÜN TEKNOLOJİLERİN AYNI OLGUNLUK SEVİYESİNE ULAŞMASI GEREKMEZ

Bir ürünün içinde onlarca, bazen yüzlerce teknoloji bulunabilir. Bunların tamamını aynı olgunluk yaklaşımıyla yönetmek hem gereksiz hem de pahalıdır. Bazı teknolojiler uzun süredir kullanılan, iyi bilinen ve kolayca değiştirilebilen bileşenlerdir. Bazıları şirket açısından yeni olmakla birlikte endüstri açısından oldukça olgundur. Bazıları ise ürünün performansını, maliyetini veya farklılaşmasını doğrudan belirleyen kritik teknolojilerdir. Dolayısıyla teknoloji olgunluğu yönetiminin ilk görevlerinden biri, hangi teknolojilerin gerçekten **kritik teknolojik unsur** olduğunu belirlemektir. Burada kritikliği yalnızca teknik karmaşıklıkla eşitlememek gerekir. Basit görünen bir teknoloji, ürün mimarisinde değiştirilmesi son derece zor olduğu veya temel performansı belirlediği için kritik olabilir. Buna karşılık teknik olarak son derece karmaşık bir bileşen, piyasada çok sayıda güvenilir alternatif bulunduğu ve kolay değiştirilebildiği için şirket açısından daha düşük risk taşıyabilir. Bu ayrım ürün programının kaynak tahsisini doğrudan etkiler. Her teknoloji için

aynı sayıda deney yapmak veya aynı kanıt seviyesini istemek yerine, olgunluk yatırımının teknolojinin ürün üzerindeki potansiyel etkisiyle orantılı olması gerekir. Bu yaklaşım aynı zamanda “hangi TRL’de ürün geliştirmeye geçmeliyiz?” sorusunun neden tek bir cevabı olmadığını açıklar. Doğru geçiş seviyesi yalnızca teknolojinin kendisine değil, **ürün içindeki rolüne ve başarısızlığının sonuçlarına** bağlıdır.

Düşük kritikliği olan, kolay değiştirilebilen ve güçlü alternatifleri bulunan bir teknoloji daha fazla belirsizlikle ürün geliştirme programına alınabilir. Buna karşılık ürünün temel performansını belirleyen ve mimarinin büyük bölümünü kendisine bağımlı hale getiren bir teknolojinin daha güçlü kanıtlarla olgunlaştırılması gerekir.



Şekil 5 – Kritiklik Artıkça Gerekli Kanıt Artar
 Teknolojinin ürün açısından kritikliği yükseldikçe,
 ürüne geçmeden önce gerekli olgunluk ve kanıt seviyesi artar.

Bu yaklaşımın önemli bir sonucu vardır: ürünün teknoloji riskini belirleyen şey bütün teknolojilerin ortalama olgunluğu değildir. Bazı durumlarda **tek bir kritik ve yeterince olgunlaşmamış teknoloji bütün ürün programının risk profilini belirleyebilir.**

7. OLGUNLUK TAKVİMİLE DEĞİL, KANITLA İLERLEMELİDİR

Ar-Ge programlarının önemli bir bölümü hâlâ zaman ve faaliyet üzerinden yönetilir. Belirli tarihte prototip tamamlanır, bir sonraki faz başlar ve teknoloji geliştirme takvim üzerinde ilerler. Bu yaklaşım proje yönetimi açısından gerekli olsa da teknoloji olgunluğu açısından yetersizdir. Çünkü zamanın geçmesi belirsizliği kendiliğinden azaltmaz.

Bir teknolojinin altı ay daha geliştirilmiş olması, altı ay önce cevaplanmamış kritik soruların artık cevaplandığı anlamına gelmez. Benzer biçimde yeni bir prototipin ortaya çıkması da önceki prototipe göre hangi belirsizliği azalttığı bilinmiyorsa olgunluk göstergesi değildir. Bu nedenle teknoloji geliştirme aşamalarının arasındaki geçişlerin faaliyet tamamlanmasına değil, **kanıt tamamlanmasına** bağlanması gerekir.

Her olgunluk aşamasının başında hangi kritik varsayımların test edileceği, hangi performans sınırlarının gösterileceği, hangi ortam koşullarının temsil edileceği ve hangi entegrasyon risklerinin azaltılacağı tanımlanmalıdır. Aşamanın sonunda ise “planlanan faaliyetler yapıldı mı?” sorusundan önce “karar vermek için ihtiyaç duyduğumuz kanıt oluştu mu?” sorusu sorulmalıdır. Bu değişiklik küçük görünse de teknoloji yönetiminin mantığını kökten değiştirir. Proje artık faaliyetleri tamamlamaya değil, **karar belirsizliğini azaltmaya** çalışır.



Şekil 6 – Kanıt Temelli Olgunlaşma Döngüsü

Böyle bir sistemde başarısız bir test otomatik olarak proje başarısızlığı anlamına gelmez. Test kritik bir varsayımın yanlış olduğunu zamanında göstermişse önemli bir yönetim değeri üretmiştir. Asıl problem, testlerin yapılmasına rağmen karar açısından hiçbir yeni bilgi üretilmemesidir. Bu nedenle iyi teknoloji yönetiminin ölçüsü yalnızca “kaç deney yaptık?” veya “kaç prototip geliştirdik?” değildir. Daha anlamlı ölçü, **yatırımın her aşamasında ne kadar kritik belirsizliğin ortadan kaldırıldığıdır.**

8. TEKNOLOJİDEN ÜRÜNE GEÇİŞ BİR EŞİK KARARIDIR

Teknoloji geliştirme ile ürün geliştirme arasındaki geçiş çoğu organizasyonda sanıldığından daha stratejik bir karardır. Teknoloji çok erken ürün programına aktarılırsa

henüz çözülmemiş teknik belirsizlikler ürün ekibinin üzerine taşınır. Gereksinimler değişmeye başlar, sistem mimarisi yeniden tasarlanır, doğrulama faaliyetleri tekrarlanır ve başlangıçta küçük görünen teknoloji belirsizliği zaman ve maliyet açısından büyüyebilir. Bunun tersi de mümkündür. Şirket bütün belirsizliklerin ortadan kalkmasını beklerse teknoloji Ar-Ge ortamında gereğinden uzun süre kalabilir. Ürün ekibi gerçek sistem entegrasyonundan öğrenebileceği bilgiyi geç elde eder ve pazara çıkış süresi uzar. Dolayısıyla amaç teknoloji riskini sıfıra indirmek değildir. **Amaç, kalan teknoloji riskini ürün geliştirme programının yönetebileceği seviyeye indirmektir.** Bu ayrım, “Bir teknoloji ne zaman ürüne dönüşmeye hazırdır?” sorusunun cevabının neden mutlak olmadığını gösterir. Hazırlık bir mükemmellik durumu değildir. Bir **risk transferi eşiğidir**. Bu eşiğin nerede olması gerektiği teknolojinin kritikliği, ürün mimarisindeki rolü, alternatif çözümlerin bulunabilirliği, kalan belirsizliğin maliyeti ve başarısızlığın sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmelidir.



ÇORUH Teknoloji Perspektifi | Teknolojiden Ürüne

Fikirden Pazarla Birlikte.

Şekil 7 – Teknolojiden Ürüne Geçiş Eşiği
Teknoloji geliştirme ile ürün geliştirme arasındaki risk transferi

Bu noktada yönetim kurulunun veya teknoloji yönetim ekibinin sorması gereken soru “Teknoloji tamamlandı mı?” değildir. Teknoloji geliştirme doğası gereği çoğu zaman tamamen “tamamlanmış” değildir. Daha doğru soru şudur:

Bugün bildiklerimiz ve hâlâ bilmediklerimizle bu teknolojinin riskini ürün programına aktarmaya hazır mıyız?

Bu soru teknolojiden ürüne geçişi teknik ekiplerin örtük değerlendirmesinden çıkarıp açık bir yönetim kararına dönüştürür.

9. TEKNOLOJİ YOL HARİTASI YALNIZCA İHTİYAÇ TARİHİNİ DEĞİL, OLGUNLAŞMA TARİHİNİ DE GÖSTERMELİDİR

Teknoloji olgunluğu konusu teknoloji yol haritasından bağımsız düşünülemez. Bir şirket gelecekte hangi ürünleri geliştirmek istediğini belirlediğinde, bu ürünlerin gerektirdiği teknolojik yetkinlikleri de tanımlayabilir. Ancak bir teknolojinin gelecekte gerekli olduğunu bilmek tek başına yeterli değildir. Kritik olan, teknolojinin **ürün geliştirme programının ihtiyaç duyduğu tarihte yeterli olgunluğa ulaşmış olmasıdır**. Bu nedenle teknoloji yol haritasındaki zaman sorusunun iki ayrı anlamı vardır. Birincisi, önceki sayıda ele aldığımız yatırım zamanlamasıdır: şirkete göre bir teknolojiye ne zaman yatırım yapılmalıdır? İkincisi ise bu makalenin eklediği olgunluk zamanlamasıdır: teknoloji, gelecekteki ürün programına girebilmek için hangi tarihte hangi kanıt seviyesine ulaşmış olmalıdır?

Örneğin 2029 yılında pazara çıkması planlanan bir ürünün kritik teknolojisinin 2028 yılında sistem tasarımına entegre edilmesi gerekiyorsa, teknoloji geliştirme ekibinin 2028'de çalışmaya başlaması çok geç olabilir. İlgili ortam doğrulamalarının 2027'de tamamlanması gerekiyorsa, gerekli prototiplerin ve deneylerin daha önce planlanması gerekir. Bu durumda teknoloji yol haritası gelecekte bugüne doğru okunmaya başlar. Pazar tarihi ürün entegrasyon tarihini, ürün entegrasyon tarihi gerekli teknoloji olgunluğunu, gerekli olgunluk seviyesi ise hangi deneylerin ve kanıtların hangi tarihlerde üretilmesi gerektiğini belirler.



Şekil 8 – Gelecek Üründen Bugünkü Teknolojiye

Gelecek ürün tarihi → entegrasyon tarihi → gerekli olgunluk → gerekli kanıt → bugünkü Ar-Ge faaliyetleri şeklinde geriye doğru planlamayı gösterir.

Böylece teknoloji yol haritası yalnızca “2027’de yapay zekâ, 2028’de yeni sensör” gibi bir teknoloji takviminden çıkar. Şirketin gelecekte ihtiyaç duyacağı yetkinlikleri **doğru zamanda yeterli kanıt seviyesine getiren bir öğrenme ve yatırım planına** dönüşür. Bu nokta teknoloji stratejisi ile ürün stratejisinin birleştiği yerdir.

10. YÖNETİMİN SORMASI GEREKEN SORU ARTIK “TRL KAÇ?” DEĞİLDİR

Teknoloji olgunluğu kurumsal bir ölçüm sistemine dönüştüğünde başka bir risk ortaya çıkar: sayı, kararın önüne geçebilir. Bir teknoloji “TRL 5” olarak raporlanır ve organizasyon bu sayıyı ilerleme göstergesi olarak kullanmaya başlar. Zaman içinde ekiplerin hedefi teknolojik belirsizliği azaltmaktan çok bir sonraki TRL seviyesine geçmek haline gelebilir. Bu durum performans göstergelerinin sık görülen bir yan etkisidir. Ölçüm aracı amaç haline gelir. Bunu önlemek için yönetim toplantılarında TRL’nin yanında birkaç temel sorunun sürekli sorulması gerekir: Bu teknoloji hakkında son dönemde ne öğrendik? Hangi kritik varsayımlar kanıtlandı veya yanlışlandı? Hangi belirsizlikler hâlâ açık? Bu belirsizliklerden hangileri ürün açısından kritik? Bir sonraki yatırım dilimi hangi yeni kanıt üretecek? Bu kanıt ortaya çıkmazsa hangi kararı değiştireceğiz? Bu soruların ortak özelliği, geçmiş faaliyeti değil **gelecek kararı** sorgulamalarıdır. Bu nedenle teknoloji olgunluğu raporlamasının en değerli çıktısı bir skor değil, yönetimin önündeki belirsizlik haritasıdır. İyi bir olgunluk değerlendirmesi teknoloji ekibinin ne kadar ilerlediğini göstermekle kalmamalı; yönetimin **hangi riskleri kabul ettiğini, hangilerini azaltmak için yatırım yaptığını ve hangi koşullarda teknolojiyi ürün programına aktaracağını** görünür hale getirmelidir. Bu bakış açısıyla teknoloji olgunluğu, Ar-Ge’nin iç operasyonel konusu olmaktan çıkar. Portföy yönetimi, teknoloji yol haritası ve ürün stratejisi arasında bir karar mekanizmasına dönüşür.

11. TEKNOLOJİ OLGUNLUĞUNU PORTFÖY DÜZEYİNDE YÖNETMEK

Tek bir teknoloji için olgunluk değerlendirmesi yapmak görece kolaydır. Yönetim açısından daha zor olan, aynı anda farklı olgunluk seviyelerinde bulunan onlarca teknolojinin bulunduğu bir portföyü yönetmektir. Bu portföyde bazı teknolojiler henüz gözlem aşamasında olabilir. Bazıları temel fizibiliteyi kanıtlıyor olabilir. Bazıları ilgili ortam testlerine yaklaşmış, bazıları ise ürün programlarına aktarılmak üzere olabilir. Bunların tamamına aynı yatırım mantığını uygulamak mümkün değildir.

Erken aşamadaki teknolojilerde yatırımın amacı bilgi üretmek ve seçenekleri açık tutmaktır. Orta olgunluktaki teknolojilerde temel amaç kritik teknik belirsizlikleri hızla azaltmak olabilir. Ürüne yaklaşan teknolojilerde ise entegrasyon, tekrarlanabilirlik ve sistem bağlamındaki kanıt daha önemli hale gelir. Bu nedenle teknoloji portföyü yalnızca stratejik önem ve yatırım miktarı açısından değil, **olgunluk ve kalan belirsizlik açısından da** değerlendirilmelidir.

Yüksek stratejik öneme sahip fakat düşük olgunluktaki bir teknoloji şirket için önemli bir gelecek fırsatı yaratabilir; aynı zamanda önemli bir ürün riski de oluşturabilir. Yüksek olgunluğa ulaşmış fakat stratejik önemi azalan bir teknolojiye ise geçmişte büyük yatırım

yapılmış olması yeni yatırımları otomatik olarak haklı çıkarmaz. Burada teknoloji olgunluğu, önceki sayılarda ele aldığımız edinim modeli ve yatırım zamanlamasıyla birleşir. Bir teknoloji geliştirilebilir, satın alınabilir, ortaklıkla öğrenilebilir veya izlenebilir; ancak bu kararların her biri teknolojinin olgunluk seviyesi ve şirketin ihtiyaç duyduğu zamanla birlikte değerlendirilmelidir. Böylece teknoloji portföy yönetiminin sorusu genişler. Artık yalnızca “Hangi teknolojilere yatırım yapıyoruz?” diye sormayız. “Hangi teknolojik yetkinliklere ihtiyacımız var, bunları nasıl edineceğiz, hangi tarihte hangi olgunluğa ulaşmaları gerekiyor ve bugün hangi belirsizliği azaltmak için yatırım yapıyoruz?” sorularını birlikte yönetiriz. Bu, teknoloji stratejisinin proje listesinden gerçek bir yönetim sistemine dönüştüğü noktadır.

SONUÇ: TEKNOLOJİNİN ÇALIŞMASI BAŞLANGIÇTIR

Bir teknolojinin ilk kez çalışması önemli bir başarıdır. Fakat şirket açısından gerçek ekonomik değer, teknolojinin laboratuvarında başarılı olmasından değil, bir ürünün içinde güvenilir biçimde kullanılabilir hale gelmesinden doğar. Bu iki nokta arasındaki mesafe çoğu zaman sanıldığından büyüktür.

Teknoloji bu mesafeyi daha fazla prototip üreterek veya yalnızca zaman geçirerek aşmaz. Kritik varsayımları test ederek, başarısızlık sınırlarını öğrenerek, gerçek kullanım koşullarına yaklaşılarak, diğer sistem bileşenleriyle etkileşimini göstererek ve her aşamada daha güçlü kanıt üreterek aşar. Bu nedenle teknoloji olgunluğu en temelde bir **kanıt ve belirsizlik yönetimi problemidir**.

TRL gibi ölçekler bu yolculuğu yapılandırmak ve ortak bir dil oluşturmak açısından değerlidir. Ancak hiçbir olgunluk rakamı yönetimin asıl sorusunun yerine geçemez. Bir teknolojiye ilişkin en önemli bilgi kaçınıcı seviyede bulunduğu değil, hangi kritik belirsizliklerin artık kapandığı ve hangilerinin hâlâ açık olduğudur.

Ürüne geçiş kararı da teknolojinin kusursuz hale geldiği an değildir. Böyle bir an çoğu zaman hiç gelmez. Kritik olan, kalan teknolojik belirsizliğin ürün geliştirme programının yönetebileceği seviyeye gelip gelmediğidir. Bu nedenle teknoloji geliştiren şirketlerin temel sorusu: **“Teknoloji çalışıyor mu?”** olmaktan çıkmalıdır. Daha güçlü soru şudur: **“Bu teknolojinin ürünün içine girmesine yetecek kadar neyi kanıtladık?”** Teknoloji olgunluğunun yönetim açısından en kısa tanımı da budur: **Bir teknoloji çalıştığında değil, ürünün taşıyabileceği belirsizlik seviyesine ulaştığında ürüne hazırdır.**