GEÇİCİ KAPAK

Kapak tasarımı
devam ediyor.

BİDGE Yayınları

Tarımsal Üretimin Geleceği: Tarım Makinaları ve Teknolojileri

Editör: MAKSUT BARIŞ EMİNOĞLU

ISBN: -

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: -
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

Tarımsal Üretimin Geleceği: Tarım Makinaları ve Teknolojileri

Önsöz

İnsanlık tarihi boyunca tarım; gıda güvencesinin, ekonomik kalkınmanın ve toplumların sürdürülebilirliğinin temel taşı olmuştur. Ancak günümüzde küresel iklim değişikliği, azalan doğal kaynaklar, hızlı nüfus artışı ve hızla değişen sosyo-ekonomik dinamikler, tarımsal üretimi her zamankinden daha karmaşık ve kritik bir boyuta taşımıştır. Bu zorlukların üstesinden gelmek, geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek bilim, mühendislik ve teknolojiyi tarımsal süreçlerin merkezine konumlandırmayı zorunlu kılmaktadır. Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği, yalnızca ekipmanların mekanik tasarımıyla sınırlı bir disiplin değildir. Günümüzde bu alan; sensör teknolojileri, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), değişken oranlı uygulama (VRA) sistemleri, yapay zekâ, robotik ve veri analitiği ile entegre olmuş çok disiplinli bir mühendislik dalına dönüşmüştür. Bu kitabın temel amacı; tarım makinalarının temel tasarım ilkelerinden mekanizasyon süreçlerine, hassas tarım uygulamalarından dijitalleşen saha teknolojilerine kadar geniş bir yelpazeyi bütüncül bir bakış açısıyla sunmaktır. Eserde, teorik mühendislik esasları ile sahadaki pratik uygulamalar arasında güçlü bir köprü kurulması hedeflenmiştir. Kitap; üniversitelerin Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği bölümlerindeki öğrencilerimiz, akademik çalışmalar yürüten araştırmacılarımız, sahada yenilikçi çözümler geliştiren mühendislerimiz ve üretimde verimliliği artırmayı hedefleyen yenilikçi üreticilerimiz için kapsamlı bir başvuru kaynağı olarak tasarlanmıştır. Bu eserin hazırlanmasında emeği geçen, teorik bilgi ve saha tecrübeleriyle katkı sunan değerli meslektaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kitabın, ülkemiz ve dünya tarımının teknolojik dönüşümüne katkı sağlamasını temenni ederim.

M. Barış Eminoğlu

14.10.2026

İÇİNDEKİLER

TARIMSAL ROBOTLARDA DİJİTAL İKİZ: MODELLEME, SANAL DEVREYE ALMA VE DOĞRULAMA YAKLAŞIMLARI 1

OSMAN ECEOĞLU, İLKER ÜNAL

BÖLÜM 0

TARIMSAL ROBOTLARDA DİJİTAL İKİZ: MODELLEME, SANAL DEVREYE ALMA VE DOĞRULAMA YAKLAŞIMLARI

Osman ECEOĞLU[1]
İlker ÜNAL[2]

Giriş

Tarımsal mobil robotların geliştirilmesi, mekanik ve elektronik bileşenlerin bütünleştirilmesinin yanı sıra kontrol, algılama ve karar verme işlevlerinin farklı çalışma koşullarında sınanmasını gerektiren çok aşamalı bir mühendislik sürecidir. Açık tarla, bağ, bahçe ve sera gibi tarımsal ortamlarda zemin yapısı, bitki özellikleri, arazi geometrisi ve çevresel koşullar zaman ve mekâna bağlı olarak değişebilmektedir. Bu değişkenlik, robotların yalnızca ideal çalışma koşullarında değil, farklı işletme senaryoları altında da değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bununla birlikte fiziksel sistem üzerinde yürütülen testler; zaman, maliyet, güvenlik ve deney koşullarının tekrarlanabilirliği açısından çeşitli sınırlılıklar taşımaktadır. Sanal test ortamları, robotun algılama, navigasyon ve

[1] Öğr. Gör. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, ORCID: 0000-0001-5778-6655
[2] Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, ORCID: 0000-0002-5188-4438

kontrol işlevlerinin fiziksel robota veya ürüne zarar verme riski oluşturmadan değerlendirilmesine ve gerçek ortamda oluşturulması güç, maliyetli veya mevsimsel koşullara bağlı senaryoların kontrollü biçimde tekrarlanmasına olanak sağlamaktadır (Kusper et al., 2026).

Dijital ikiz yaklaşımı, fiziksel sistem ile bu sistemin dijital temsili arasındaki ilişkinin veri, model ve sistem davranışı temelinde kurulmasına yönelik bütünleşik bir yapı sunmaktadır. Ancak tarımsal sistemlerde biyotik ve abiyotik bileşenlerin birlikte bulunması, çevresel koşulların sürekli değişmesi ve fiziksel sistem sınırlarının her zaman açık biçimde tanımlanamaması, dijital ikiz uygulamalarını geleneksel endüstriyel uygulamalara göre daha karmaşık hâle getirmektedir. Tarım ve ormancılık alanındaki uygulamalarda dijital ikizlerin entegrasyon ve olgunluk düzeylerinin önemli ölçüde farklılaştığı, çalışmaların yalnızca sınırlı bir bölümünün tam bütünleşmiş dijital ikiz düzeyine ulaştığı bildirilmektedir. Bu durum, tarımsal sistemlerde kullanılan dijital temsillerin sahip oldukları fiziksel–dijital entegrasyon düzeyine göre değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır (Tagarakis et al., 2024).

Tarımsal robotik açısından dijital ikiz, robotun yalnızca geometrik veya görsel bir kopyasının oluşturulmasıyla sınırlı değildir. Dijital temsilin, fiziksel robotun görev açısından önemli davranışlarını uygun bir modelleme düzeyinde yansıtması ve geliştirme sürecinde analiz, simülasyon ve test amacıyla kullanılabilecek bir yapı oluşturması beklenmektedir. Tarımsal robotlara yönelik güncel yaklaşımlar, robotik sistemlerin çevresel modeller ve fiziksel sistemden elde edilen bilgilerle birlikte ele alınmasını önermekte; böylece robot davranışının içinde bulunduğu tarımsal ekosistemden bağımsız değerlendirilmesinin önüne geçilmektedir. Bu yaklaşım, dijital ikizin tarımsal robotlar için yalnızca bir sanal prototip değil, fiziksel sistem ile çevresinin birlikte

temsil edildiği bütünleşik bir geliştirme aracı olarak ele alınabileceğini göstermektedir (Sibona et al., 2025).

Dijital bir temsilin mühendislik kararlarında güvenilir biçimde kullanılabilmesi, modelin fiziksel sistem davranışını kullanım amacı açısından yeterli doğrulukta temsil etmesine bağlıdır. Bu nedenle dijital ikiz geliştirme sürecinde modelin yalnızca hesaplamalı olarak çalışması yeterli görülmemekte; modelin güvenilirliğinin doğrulama ve geçerleme süreçleriyle değerlendirilmesi gerekmektedir. Dijital ikizlerde doğrulama ve geçerleme uygulamalarını inceleyen sistematik çalışmalar, bu iki sürecin model güvenilirliğinin oluşturulmasında temel bir işleve sahip olduğunu, ancak mevcut uygulamalarda yöntemlerin ve değerlendirme yaklaşımlarının henüz tam olarak standartlaşmadığını göstermektedir (Bitencourt et al., 2025).

Sanal modeller, fiziksel sistem tamamen devreye alınmadan önce kontrol ve yazılım bileşenlerinin değerlendirilmesine de imkân vermektedir. Sanal devreye alma yaklaşımında gerçek sistem üzerinde uygulanacak kontrol mantığı ve sistem davranışı dijital ortamda sınanabilmekte, böylece bazı tasarım ve entegrasyon sorunlarının fiziksel uygulamadan önce belirlenmesi mümkün olmaktadır. Dijital ikiz destekli sanal devreye alma çalışmalarında model ile fiziksel sistem arasındaki tutarlılığın korunması ve sanal ortamda elde edilen sonuçların gerçek sistem davranışıyla ilişkilendirilmesi, güvenilir bir geliştirme sürecinin temel gereksinimleri arasında değerlendirilmektedir (Ni et al., 2025).

Bu kitap bölümünde tarımsal mobil robotların geliştirilmesinde dijital ikiz yaklaşımı; sanal modelleme, model sadakati, sanal devreye alma, doğrulama ve simülasyon tabanlı test aşamalarından oluşan bütünleşik bir mühendislik süreci çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu doğrultuda öncelikle dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz arasındaki kavramsal sınırlar açıklanmakta; ardından tarımsal mobil robotların sanal

modellenmesi ve model sadakati, Model-in-the-Loop (MIL), Software-in-the-Loop (SIL) ve Hardware-in-the-Loop (HIL) temelli sanal devreye alma yaklaşımları ile model doğrulama ve simülasyon tabanlı test süreçleri değerlendirilmektedir. Son aşamada ise bu bileşenler tarımsal mobil robotlara yönelik bütünleşik bir dijital ikiz geliştirme ve doğrulama çerçevesi altında bir araya getirilmektedir.

Dijital Model, Dijital Gölge ve Dijital İkiz

Dijital ikiz kavramının farklı disiplinlerde değişen kapsamlarla kullanılması, fiziksel bir sistemin sayısal ortamda temsil edilmesinin hangi durumda dijital ikiz olarak değerlendirilebileceği konusunda terminolojik belirsizlik oluşturmuştur. Bu nedenle fiziksel varlık ile dijital temsil arasındaki entegrasyon düzeyinin açık biçimde tanımlanması gerekmektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan sınıflandırmada dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz arasındaki temel ayrım, fiziksel ve dijital sistemler arasındaki veri akışının yönü ve otomasyon düzeyi üzerinden yapılmaktadır (Kritzinger et al., 2018).

Dijital model, fiziksel bir sistemin geometrik, kinematik, dinamik veya davranışsal özelliklerinden belirli bir bölümünü sayısal ortamda temsil eden ancak fiziksel sistemle otomatik veri alışverişi bulunmayan yapıdır. Model parametreleri ölçüm sonuçları, teknik özellikler veya daha önce toplanmış veriler kullanılarak oluşturulabilir ve gerektiğinde kullanıcı tarafından güncellenebilir. Bununla birlikte fiziksel sistemde meydana gelen bir değişikliğin dijital modele otomatik olarak aktarılmaması, iki varlığın birbirinden bağımsız biçimde çalışabilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle çevrim dışı çalışan bir robot simülasyonu, ayrıntılı bir üç boyutlu model veya gerçek robot parametreleri kullanılarak oluşturulmuş bir fizik tabanlı simülasyon, yüksek model doğruluğuna sahip olsa dahi tek başına dijital ikiz olarak değerlendirilmemelidir. Güncel literatürde de dijital model, fiziksel karşılığıyla gerçek zamanlı

bağlantısı bulunmayan ve çoğunlukla tasarım, simülasyon veya optimizasyon amaçlarıyla kullanılan temel dijital temsil düzeyi olarak tanımlanmaktadır (Sajadieh & Noh, 2025).

Dijital gölge, dijital modele kıyasla daha gelişmiş bir entegrasyon seviyesine karşılık gelir. Bu mimaride sahadaki fiziksel sistem verileri dijital ortama otomatik aktarılır ve dijital model, gerçek varlığın anlık durumundaki değişimleri takip eder. Robotun anlık konumu, kinematiği ve görev parametreleri söz konusu akış kanalıyla dijital ortamdan izlenebilir. Ancak dijital gölgede sanaldan fiziksel sisteme otomatik bir komut geri bildirimi bulunmadığı için, izleme ve analiz imkânına rağmen kapalı çevrim bir fiziksel–dijital etkileşim sağlanamaz (Sajadieh & Noh, 2025).

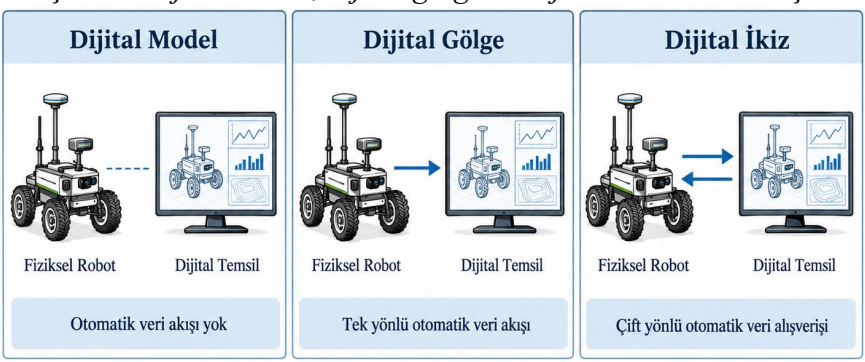
Dijital ikiz mimarisinde ise fiziksel robottan toplanan veriler eş zamanlı ve otomatik olarak dijital modele işlenir. Benzer şekilde, sanal ortamda üretilen görev veya kontrol komutları da fiziksel robota otomatik aktarılır. Platformun bu komutlara gösterdiği fiziksel tepkilerin yeniden sanal modele beslenmesiyle çift yönlü ve dinamik bir etkileşim çevrimi kurulur. Yine de sadece bir haberleşme altyapısının kurulması yeterli değildir. Veri trafiğinin, fiziksel sistemin durumunu dijital modelde sürekli güncellemesi ve hedeflenen mühendislik amacına uygun bir etkileşim sunması şarttır (Sajadieh & Noh, 2025).

Bir yapının dijital ikiz olarak değerlendirilmesinde kullanılan simülasyon yazılımı, üç boyutlu modelin ayrıntı düzeyi veya işlenen veri miktarı belirleyici değildir. Esas ölçüt, fiziksel sistem ile dijital temsil arasındaki otomatik veri alışverişinin yönü ve bu etkileşimin uygulamadaki işlevidir (Kritzinger et al., 2018).

Tarımsal mobil robotlar açısından bu ayrım daha belirgin hâle gelmektedir. Örneğin gerçek robottan herhangi bir çevrim içi veri almadan çalışan Gazebo, Isaac Sim, Webots veya benzeri bir ortamda oluşturulmuş sanal robot, fiziksel sisteme yüksek derecede

benzese dahi dijital model düzeyindedir. Fiziksel robotun konumu, görev durumu veya çevre ölçümlerinin sanal ortama sürekli aktarılması ancak sanal sistemden robota otomatik bir geri dönüşün bulunmaması durumunda yapı dijital gölge özelliği göstermektedir. Sanal modelden üretilen karar, görev veya kontrol bilgisinin fiziksel robota otomatik olarak aktarılması ve robotun yeni durumunun yeniden dijital ortama beslenmesiyle kapalı bir fiziksel–dijital çevrim oluşturulması ise dijital ikiz düzeyine geçiş için temel koşulu oluşturmaktadır. Tarımsal robotlara yönelik güncel dijital ikiz çalışmalarında da robotik algılama, çevresel modelleme, sanal tahmin ve fiziksel müdahalenin aynı çevrim içerisinde bütünleştirilmesi, tam işlevli robot odaklı dijital ikizlerin geliştirilmesinde temel hedeflerden biri olarak ele alınmaktadır (Sibona et al., 2025). Bu nedenle fiziksel robotla gerçek zamanlı ve otomatik çift yönlü veri alışverişi bulunmayan bir simülasyon modeli, dijital ikiz olarak değil, sahip olduğu entegrasyon düzeyine göre dijital model veya dijital gölge olarak değerlendirilmelidir. Dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz arasındaki veri akışı ve entegrasyon farkları Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1 Dijital model, dijital gölge ve dijital ikizde veri akışı



Tarımsal Mobil Robotların Sanal Modellenmesi ve Model Sadakati

Tarımsal bir mobil robotun sanal olarak modellenmesinde ilk aşama, modelin hangi mühendislik amacı için kullanılacağının ve hangi fiziksel bileşenleri kapsayacağının belirlenmesidir. Tasarım değerlendirmesi, kontrol yazılımının sınanması, görev planlama veya sanal devreye alma gibi uygulamalar farklı modelleme gereksinimleri ortaya çıkarmaktadır. Model kapsamının, yapılacak analiz üzerinde etkili olan özelliklerle sınırlandırılması; fiziksel sistemin tüm ayrıntılarının aynı düzeyde temsil edilmesinden daha uygun olmaktadır. Robot dijital ikizlerine yönelik güncel çalışmalar da modelleme ve simülasyon bileşenlerinin kullanım amacı ve sistem mimarisiyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Qin et al., 2026).

Mobil robotun sanal temsili; gövde geometrisi, kinematik yapı, kütle, atalet momentleri, aktüatör özellikleri ve hareketi belirleyen fiziksel kısıtlar gibi bileşenlerden oluşabilmektedir. Bu özelliklerin tamamının aynı ayrıntı düzeyinde modellenmesi zorunlu değildir. Örneğin yalnızca görev güzergâhının incelendiği bir modelde ayrıntılı aktüatör dinamiğinin temsil edilmesi ikincil düzeyde kalabilmektedir. Buna karşılık hızlanma, yön değiştirme veya yük etkilerinin değerlendirildiği uygulamalarda kütle dağılımı ile aktüatör tepkileri model davranışı üzerinde daha belirleyici hâle gelmektedir. Tarımsal robotlara yönelik bir dijital test ortamında robot modeli; kinematik yapı, kütle, atalet momentleri, aktüatörler ve transmisyon özelliklerini içerecek biçimde tanımlanmış ve sanal robotun fiziksel platformla benzer şekilde kontrol edilebilmesi amaçlanmıştır (Sibona et al., 2025).

Robot modelinin yanı sıra çalışma çevresinin temsil edilmesi de tarımsal uygulamalarda ayrı bir modelleme problemidir. Tarla sınırları, bitki sıraları, geçiş alanları, arazi yüzeyi ve görevle ilişkili nesneler robotun sanal ortamla etkileşimini doğrudan

etkileyebilmektedir. Tarımsal ortamların mevsimsel ve mekânsal olarak değişmesi, çevrenin tek ve değişmez bir geometrik modelle temsil edilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle çevresel ayrıntının seçimi, gerçekleştirilecek testin gerektirdiği bilgi düzeyiyle ilişkilendirilmelidir. Tarımsal bir çalışma alanının fotogerçekçi dijital temsili ile simüle edilmiş bir kara aracının birlikte kullanıldığı bir uygulamada, sanal ortamdan yüksek sadakatli Red, Green, Blue (RGB) görüntüler ile Light Detection and Ranging (LiDAR) verileri üretilerek fiziksel saha çalışmalarına geçmeden önce algoritmaların geliştirilmesi ve değerlendirilmesi sağlanmıştır (Mirbod et al., 2025).

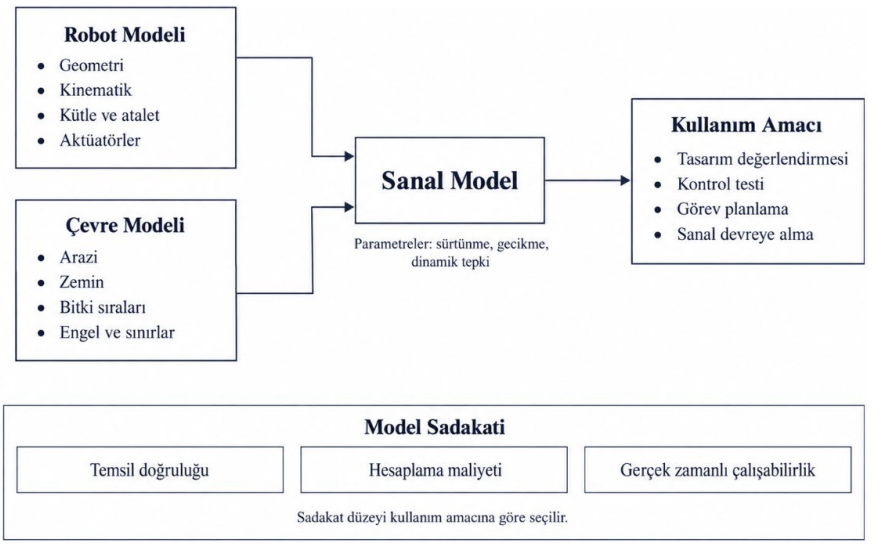
Model sadakati, sanal temsilin fiziksel sistemdeki incelenen özellikleri hedeflenen kullanım amacı doğrultusunda ne derece yansıttığını ifade eder. Söz konusu kavramı yalnızca üç boyutlu modelin görsel gerçekçiliğine indirgemek doğru değildir. Nitekim modelin; robotun hareketini sınırlayan fiziksel kısıtları, çevre etkileşimini ve zamana bağlı dinamik tepkilerini kullanım amacına uygun detayda içermesi gerekir. Görsel açıdan ayrıntılı bir 3B görünüm sunulması, hareket ve kontrol mekaniğinin de aynı doğrulukta modellendiği anlamına gelmez. Yalın geometrik modeller belirli test senaryoları için yeterli kalabilse de doğal saha düzensizlikleri, algılama/sensör belirsizlikleri ve hesaba katılmayan fiziksel etkenler simülasyonun gerçekçi kapsama alanını daraltmaktadır (Antonelli et al., 2024).

Model sadakatinin yükseltilmesi genellikle daha ayrıntılı fiziksel modeller, daha fazla parametre ve daha yüksek hesaplama gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Bu durum özellikle sanal modelin gerçek zamanlı veya gerçek zamana yakın biçimde çalışması gereken uygulamalarda önem kazanmaktadır. Hesaplama süresi fiziksel sistemin çalışma çevrimiyle uyumlu değilse, çok yüksek ayrıntı düzeyine sahip bir model sanal devreye alma veya çevrim içi dijital ikiz uygulamalarında pratikliğini kaybedebilmektedir. Bu

nedenle modelleme sürecinde doğruluk ile hesaplama maliyeti arasında uygun bir denge kurulması gerekmektedir. Çoklu sadakat düzeylerine dayanan güncel robotik dijital ikiz çalışmalarında da yüksek sadakatli fizik tabanlı modellerin hesaplama gecikmesini artırabildiği ve uygulamanın zaman gereksinimine göre farklı sadakat düzeylerinin kullanılmasının gerekli olabileceği gösterilmektedir (Yao et al., 2026).

Tarımsal mobil robotlarda sanal modelin kullanılabilirliği, modelde yer alan ayrıntıların sayısından çok, gerekli robot ve çevre davranışlarının yeterli doğrulukta temsil edilmesine bağlıdır. Sanal modeli oluşturan temel bileşenler ile model sadakatini etkileyen unsurlar Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2 Tarımsal mobil robotlarda sanal model ve model sadakati



Sanal Devreye Alma: MIL, SIL ve HIL Yaklaşımları

Sanal devreye alma, robotik sistemin kontrol yazılımı ile sanal sistem modeli arasındaki etkileşimin fiziksel devreye alma aşamasından önce sınanmasına olanak sağlayan model tabanlı bir geliştirme yaklaşımıdır. Bu süreçte kontrol mantığı, görev akışı ve

sistem bileşenleri arasındaki etkileşim sanal ortamda çalıştırılarak yazılım ve entegrasyon sorunlarının erken aşamada belirlenmesi amaçlanmaktadır. Dijital ikiz destekli sanal devreye alma çalışmalarında sanal model yalnızca görselleştirme amacıyla değil, kontrol davranışının değerlendirilmesi ve fiziksel uygulama öncesinde sistem tepkilerinin incelenmesi için de kullanılmaktadır (Ni et al., 2025).

MIL aşamasında kontrol algoritması ile kontrol edilen sistemin modeli simülasyon ortamında birlikte çalıştırılmaktadır. Bu aşama, fiziksel kontrol donanımına veya gerçek robota ihtiyaç duyulmadan kontrol mantığının ve model tabanlı davranışın erken geliştirme evresinde değerlendirilmesine imkân vermektedir. Parametre değişimleri, referans girişleri ve farklı çalışma koşulları sanal ortamda uygulanarak kontrol yapısının beklenen temel davranışı üretip üretmediği incelenebilmektedir. MIL, SIL ve HIL yaklaşımlarının sistem geliştirme sürecinde birbirini izleyen veya gereksinime göre seçilen doğrulama aşamaları olarak kullanılabildiği bildirilmektedir (Dudek et al., 2025).

SIL aşamasında kontrol algoritmasının model düzeyindeki gösteriminden yazılım düzeyindeki gerçekleştirimine geçilmektedir. Kontrol yazılımı gerçek kontrol donanımı yerine bilgisayar ortamında yürütülürken, robot veya süreç sanal model tarafından temsil edilmektedir. Böylece yazılım kodunun sanal sistemle etkileşimi, veri alışverişi ve kontrol akışı fiziksel donanıma geçilmeden değerlendirilebilmektedir. Sanal devreye alma uygulamalarında SIL yaklaşımının temel özelliği, kontrol sistemi ile kontrol edilen sürecin donanıma ihtiyaç duyulmadan sanal ortamda birlikte çalıştırılmasıdır (Noga et al., 2022).

HIL aşamasında test yapısına gerçek kontrol donanımı veya belirli fiziksel bileşenler dâhil edilirken, kontrol edilen robotun ya da sürecin geri kalan bölümü gerçek zamanlı çalışan sanal model tarafından temsil edilmektedir. Böylece kontrol donanımının giriş–

çıkış davranışı, iletişim gecikmeleri, zamanlama özellikleri ve arayüz etkileşimleri fiziksel robotun tamamı kullanılmadan sınanabilmektedir. Bu özellik HIL yaklaşımını, yalnızca algoritma ve yazılım davranışını inceleyen önceki aşamalardan ayırmakta ve sanal sistem ile gerçek donanım arasındaki entegrasyonun değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Noga et al., 2022).

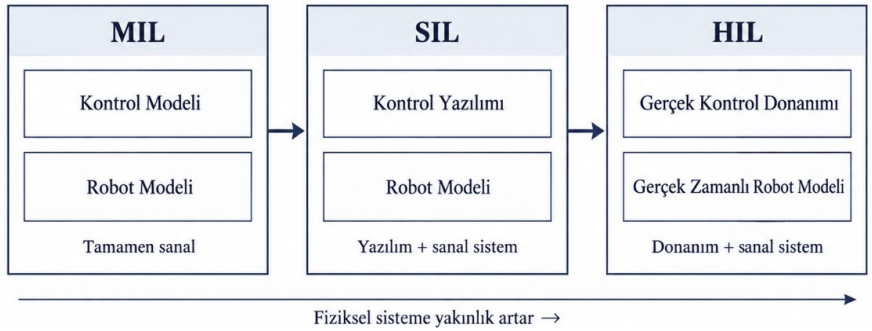
Tarımsal robotlar açısından HIL, sanal ortamda geliştirilen kontrol ve görev yürütme yapılarının gerçek donanımla etkileşimini kontrollü koşullarda incelemek için önemli bir geçiş aşaması oluşturmaktadır. Hidroponik seralarda ekim gerçekleştiren çift kollu otonom bir robot için geliştirilen güncel dijital ikiz uygulamasında fiziksel ve sanal bileşenler gerçek zamanlı olarak bütünleştirilmiş, görev davranışları simülasyon ve HIL testleriyle değerlendirilmiştir.

Bu uygulama, tarımsal robotlarda gerçek donanımın test sürecine kademeli biçimde dâhil edilebildiğini ve sanal ortamdan fiziksel uygulamaya geçişin aşamalı olarak yürütülebileceğini göstermektedir (Rodríguez-Nieto et al., 2026).

MIL, SIL ve HIL arasındaki temel ayrım, gerçek yazılım ve donanım bileşenlerinin test döngüsüne hangi aşamada dâhil edildiğiyle ilgilidir. MIL aşamasında kontrol yaklaşımı ile robot modeli sanal ortamda birlikte değerlendirilmektedir. SIL aşamasında uygulanacak kontrol yazılımı sanal sistem üzerinde çalıştırılmakta, HIL aşamasında ise gerçek kontrol donanımı gerçek zamanlı sanal modelle etkileşime girmektedir. Bu yapı, test ortamının fiziksel sisteme kademeli olarak yaklaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Tarımsal mobil robotlar için MIL–SIL–HIL tabanlı sanal devreye alma akışı Şekil 3’te gösterilmiştir.

Şekil 3 MIL–SIL–HIL tabanlı sanal devreye alma süreci



Model Doğrulama ve Simülasyon Tabanlı Test

Dijital ikizlerin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde doğrulama (verification) ve geçerleme (validation) birbirinden farklı ancak tamamlayıcı iki süreçtir. Doğrulama, geliştirilen modelin tanımlanan matematiksel, mantıksal ve hesaplamalı yapıya uygun biçimde gerçekleştirildiğinin kontrol edilmesine odaklanmaktadır. Geçerleme ise model çıktılarının fiziksel sistem davranışını amaçlanan kullanım bakımından yeterli düzeyde temsil edip etmediğini değerlendirmektedir. Dijital ikiz literatüründe her iki sürecin birlikte uygulanması model güvenilirliğinin oluşturulması açısından temel kabul edilmekle birlikte, mevcut uygulamalarda ortak bir doğrulama ve geçerleme prosedürünün henüz tam olarak yerleşmediği bildirilmektedir (Bitencourt et al., 2025).

Geçerleme sürecinde karşılaştırılacak değişkenlerin ve kabul edilebilir hata düzeylerinin modelin kullanım amacına göre belirlenmesi gerekmektedir. Tarımsal mobil robotlarda konum, yönelim, doğrusal veya açısal hız, görev süresi ve izlenen yörünge gibi ölçülebilir çıktılar fiziksel sistem ile sanal model arasında karşılaştırılabilmektedir. Ortalama mutlak hata, kök ortalama kare hata veya göreve özgü başarı ölçütleri bu amaçla kullanılabilir. Modelin geçerliliği tek bir hata değerine dayanılarak genellenmemelidir. Yeterli doğruluğun hangi değişkenlerde ve

çalışma koşullarında sağlandığı açıkça vurgulanmalı, değerlendirme bu sınırlar dahilinde yürütülmelidir (Bitencourt et al., 2025).

Sanal modelin başlangıçta saha verileriyle örtüşmesi, bu uyumun operasyon boyunca devam edeceğini garanti kılmaz. Robot bileşenlerindeki aşınmalar ya da ortam şartlarındaki değişimler, simülasyon çıktıları ile gerçek sistem tepkileri arasında farklılıklara yol açabilir. Dolayısıyla çevrim içi çalışan dijital ikiz yapılarında bu tür sapmaların düzenli periyotlarla veya belirlenen tolerans limitlerine göre takibi gereklidir. İmalat sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, fiziksel platform ile dijital temsil arasındaki farkın çalışma esnasında izlenebildiğini ve modelin güncelliğini değerlendirmede kullanılabildiğini göstermektedir (Lugaresi et al., 2023).

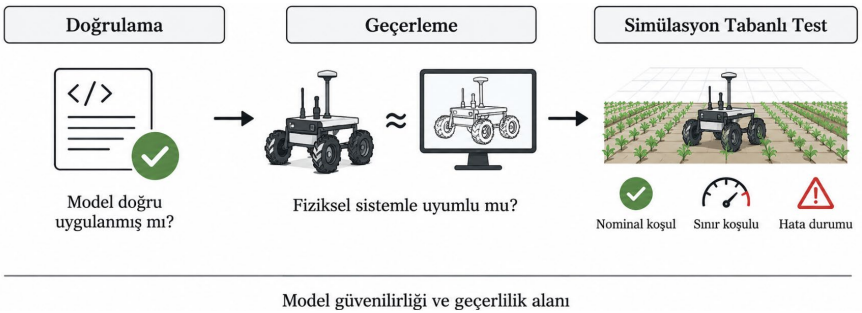
Sanal ortam simülasyonlarında yalnızca robotun tipik işletme şartlarındaki performansını incelemek kâfi gelmez. Çevre koşullarındaki oynamalar, aşırı sınır durumlar ve olası donanım arızaları da test prosedürlerine eklenmelidir. Buna karşın senaryo sayısını artırmak, sistemin tüm kritik fonksiyonlarının test edildiğini kanıtlamaz. Uygulanan her senaryoda incelenecek işlevler, başlangıç değerleri, çevresel etkenler ve başarı ölçütleri baştan tanımlanmalıdır. Mobil robotik alanındaki çalışmalar; test senaryolarının metodik biçimde kurgulanıp karmaşıklığın kademeli olarak yükseltilmesinin, işlevsellik ve güvenlik analizlerini doğrudan beslediğini ortaya koymaktadır (Ortega et al., 2024).

Simülasyon çıktıları, fiziksel platform davranışının doğrudan bir delili şeklinde ele alınmamalıdır. Modellenemeyen çevresel faktörler ile parametre belirsizlikleri, sanal ortam ile saha sonuçları arasında sapmalara neden olabilir. Bu sebeple simülasyon tabanlı testler, saha deneylerinin yerini tutan bir yaklaşım değil; fiziksel doğrulama öncesinde kritik risklerin ve senaryoların netleştirilmesini sağlayan destekleyici bir evre olarak görülmelidir. Simülasyon ile gerçek ortam deneylerinin aşamalı biçimde birlikte

yürütülmesi, robotik sistemlerin daha sağlıklı değerlendirilmesine olanak tanır (Ortega et al., 2024).

Doğrulama, geçerleme ve senaryo tabanlı test arasındaki ilişki Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4 Model doğrulama ve simülasyon tabanlı test süreci



Tarımsal Robotlar İçin Dijital İkiz Geliştirme ve Doğrulama Çerçevesi

Tarımsal bir mobil robot için dijital ikiz geliştirme sürecinin başlangıç noktası, kullanılacak yazılım veya simülasyon platformundan önce sistemin kullanım amacının tanımlanmasıdır. Dijital temsilin tasarım değerlendirmesi, kontrol geliştirme, sanal devreye alma, durum izleme veya karar desteği gibi hangi görev için kullanılacağı; model kapsamını, gerekli ayrıntı düzeyini ve doğrulama ölçütlerini doğrudan belirler. Bu nedenle geliştirme süreci, birbirinden bağımsız modeller ve testler yerine aynı kullanım amacı etrafında ilerleyen bütünleşik bir yapı olarak ele alınmalıdır. Dijital ikizlerin güvenilir karar desteği sağlayabilmesi için doğrulama ve geçerleme faaliyetlerinin geliştirme sürecinin ayrılmaz bir parçası olması gerektiği de vurgulanmaktadır (Bitencourt et al., 2025).

Kullanım amacı belirlendikten sonra fiziksel sistemin sınırları ile sanal modelde temsil edilecek bileşenler tanımlanmalıdır. Robotun hareketi ve görev performansı üzerinde etkili olan

özellikler modele dâhil edilirken, sonuç üzerinde anlamlı etkisi bulunmayan ayrıntıların gereksiz biçimde temsil edilmesinden kaçınılması uygun olacaktır. Simülasyonun oluşturulmasında temel alınan parametre değerleri ile model varsayımları, geçerli sayıldıkları saha ve çalışma şartlarıyla birlikte belgelenmelidir. Zira tutulan bu kayıtlar, daha sonra gerçekleştirilecek testlerden elde edilecek çıktıların hangi sınırlar dâhilinde yorumlanabileceğini belirlemek açısından kritik önem taşır.

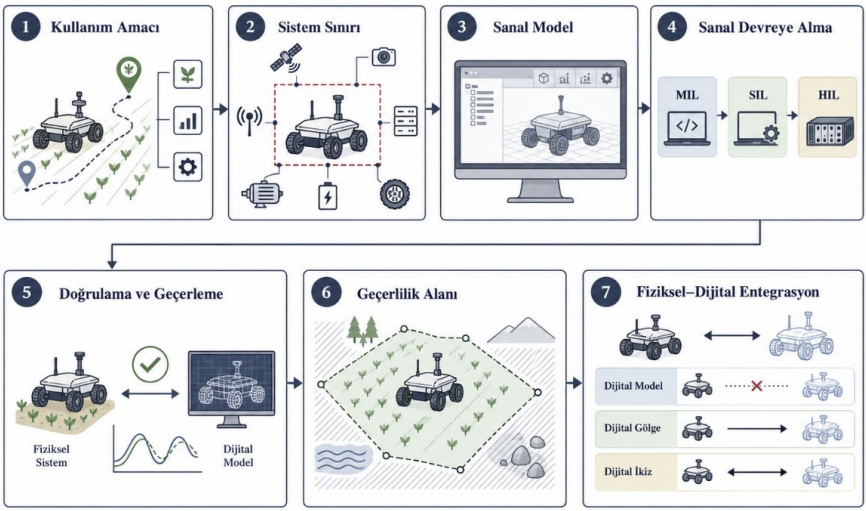
Sanal modelin inşası tamamlandıktan sonra, fiziki robota geçilmeden önce kontrol kodlarının ve sistem bileşenlerinin hangi test evresinden geçirileceği kararlaştırılmalıdır. Bu süreçte MIL, SIL veya HIL tekniklerinden hangisinin tercih edileceği; denenecek işlevsel özelliklere ve gerçek kontrol donanımının test döngüsüne katılması gereksinimine göre belirlenir. Bütün projelerde sabit bir test sırasını izleme zorunluluğu yoktur; tercih edilecek test kademesi, sınanacak sistem davranışı ve muhtemel riskler göz önüne alınarak kurgulanmalıdır (Ni et al., 2025).

Testlere başlamadan önce incelenecek değişkenler, beklenen davranışlar ve kabul sınırları belirlenmelidir. Modelin fiziksel sistemle yeterli uyum göstermesi, bütün çalışma koşullarında geçerli olduğu anlamına gelmez. Bu nedenle geçerliliğin hangi koşullarda sağlandığı açıkça belirtilmelidir. Çevrim içi uygulamalarda ise fiziksel sistem ile sanal model arasındaki sapmalar izlenmeli, modelin geçerliliğini etkileyen değişiklikler ortaya çıktığında yeniden değerlendirme yapılmalıdır (Lugaresi et al., 2023).

Sürecin son aşamasında fiziksel ve dijital sistem arasındaki entegrasyon düzeyi değerlendirilmelidir. Daha önce tanımlanan veri akışı ve otomasyon ölçütleri esas alınarak yapı dijital model, dijital gölge veya dijital ikiz olarak sınıflandırılabilir (Kritzinger et al., 2018).

Tarımsal mobil robotlar için önerilen geliştirme ve doğrulama akışı Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5 Tarımsal robotlar için dijital ikiz geliştirme ve doğrulama çerçevesi



Sınırlılıklar ve Gelecek Araştırma Yönleri

Tarımsal robotlardan dijital modele aktarılan verilerin sahada kesintisiz ve zamanında iletilmesi her koşulda mümkün olmayabilir. Haberleşme gecikmeleri, paket kayıpları ve sensör kesintileri, modelin temsil ettiği durum ile fiziksel robotun güncel durumu arasında farklılık oluşturabilir. Sensör donanımlarının değişken örnekleme frekanslarında veri üretmesi ise ölçümlerin zaman ekseninde senkronize edilmesini zorlaştırır. Dolayısıyla veri akışının takibinde zaman damgaları (timestamp), veri bütünlüğü ve tazelik kriterleri öncelikli olarak göz önüne alınmalıdır. Tarımsal alandaki dijital ikiz literatürü incelendiğinde, veri entegrasyonu ile haberleşme altyapısının getirdiği bu tip kısıtlamaların geniş ölçüde ele alındığı görülmektedir (Tagarakis et al., 2024).

Tarımsal bir robotun üzerindeki sensörler, alt kontrol birimleri ve simülasyon yazılımları sıklıkla birbiriyle örtüşmeyen veri yapıları ve iletişim protokolleri kullanır. Belirli bir platforma özel kurgulanan bağlantı mimarisini farklı bir robota adapte etmek, donanım ve yazılım katmanında ilave düzenlemeler gerektirebilir. Bu aşamada açık mimarili arayüz standartlarından, tanımlı veri formatlarından ve modüler yazılım kütüphanelerinden yararlanmak, heterojen bileşenlerin aynı dijital ikiz altyapısında bütünleştirilmesini belirgin biçimde kolaylaştırır.

Çevrim içi çalışan dijital modellerde hesaplama karmaşıklığı, fiziki sistemin anlık durum güncelleme süreleriyle uyum içinde kalmalıdır. Aksi halde aşırı ayrıntılı robot ve çevre modelleri işlemci üzerine ek yük bindirerek zamanlama hatalarına ve gecikmelere sebep olur. Bu nedenle modelin detay seviyesi kararlaştırılırken donanımın işlem kapasitesi, haberleşme gecikmeleri ve veri yenilenme sıklığı bir bütün halinde değerlendirilmelidir.

Özel bir robotik platform ve belirli bir arazi koşulu için tasarlanan dijital ikiz mimarisinin, farklı bir sistemde aynı başarıyı doğrudan yakalaması beklenemez. Robotun mekanik konfigürasyonu, dikim/ürün sıra düzeni veya saha işletme şartları farklılaştığında modelin yeniden uyarlanması veya kalibre edilmesi gerekebilir. Dolayısıyla gelecekteki çalışmalarda tek bir senaryodaki başarıyı sunmak yetersiz kalacak; geliştirilen yapının hangi sınırlar dahilinde tekrar kullanılabildiği ve ne tür değişimlerin yeniden uyarlama gerektirdiği de detaylandırılmalıdır.

Sonuç

Tarımsal mobil robotlarda dijital ikiz yaklaşımı, fiziksel sistemin yalnızca sanal bir temsilinin oluşturulmasıyla sınırlı bir yapı değildir. Mühendislik açısından kullanılabilir bir dijital ikiz için sistemin hangi amaçla temsil edildiğinin tanımlanması, uygun model kapsamının belirlenmesi ve geliştirilen modelin sistematik biçimde

sınanması gerekmektedir. Bu açıdan dijital ikiz geliştirme süreci; modelleme, sanal devreye alma, doğrulama ve fiziksel–dijital entegrasyon aşamalarının birlikte ele alındığı bütünleşik bir yapı oluşturmaktadır.

MIL, SIL ve HIL yaklaşımları, kontrol ve yazılım bileşenlerinin farklı geliştirme düzeylerinde değerlendirilmesine imkân vermektedir. Doğrulama ve geçerleme süreçleri ise modelin hangi değişkenler ve çalışma koşulları için yeterli güvenilirliğe sahip olduğunun belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Simülasyon tabanlı testlerin fiziksel deneylerin yerine geçen bir yöntem olarak değil, sınır ve hata durumlarının önceden incelenmesini ve fiziksel testlerin daha planlı yürütülmesini destekleyen bir aşama olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Doğrulanmış bir sanal modelin bulunması tek başına dijital ikiz düzeyine ulaşıldığını göstermemekte; bu nitelik fiziksel ve dijital sistem arasındaki otomatik entegrasyon düzeyiyle belirlenmektedir.

Tarımsal robotlarda dijital ikizlerin daha yaygın ve güvenilir biçimde uygulanabilmesi; veri sürekliliği, birlikte çalışabilirlik, gerçek zamanlı hesaplama ve farklı çalışma koşullarına uyarlanabilirlik gibi sorunların birlikte ele alınmasına bağlıdır. Bu gereksinimlerin karşılanması, dijital ikiz yaklaşımının tarımsal robotların tasarımından sanal devreye alınmasına, test edilmesinden fiziksel sistemle bütünleştirilmesine kadar uzanan süreçte daha işlevsel bir mühendislik aracı olarak kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

Antonelli, D., Aliev, K., Soriano, M., Samir, K., Monetti, F. M., & Maffei, A. (2024). Exploring the limitations and potential of digital twins for mobile manipulators in industry. *Procedia Computer Science, 232*, 1121–1130. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.110

Bitencourt, J., Wooley, A., & Harris, G. (2025). Verification and validation of digital twins: A systematic literature review for manufacturing applications. *International Journal of Production Research, 63*(1), 342–370. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2357741

Dudek, W., Miguel, N., & Winiarski, T. (2025). A SysML-based language for evaluating the integrity of simulation and physical embodiments of cyber–physical systems. *Robotics and Autonomous Systems, 185*, 104884. https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104884

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine, 51*(11), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

Kusper, G., Barócsi, Z., Csóka, P., Vajda, K., & Sütő, J. (2026). Digital-twin-oriented virtual training environment for agricultural robot navigation: A vineyard rover case study. *Sensors, 26*(12), 3766. https://doi.org/10.3390/s26123766

Lugaresi, G., Gangemi, S., Gazzoni, G., & Matta, A. (2023). Online validation of digital twins for manufacturing systems. *Computers in Industry, 150*, 103942. https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103942

Mirbod, O., Choi, D., & Schueller, J. K. (2025). From simulation to field validation: A digital twin-driven sim2real transfer approach for strawberry fruit detection and sizing. *AgriEngineering, 7*(3), 81. https://doi.org/10.3390/agriengineering7030081

Ni, H., Hu, T., Deng, J., Chen, B., Luo, S., & Ji, S. (2025). Digital twin-driven virtual commissioning for robotic machining enhanced by machine learning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 93*, 102908. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102908

Noga, M., Juhás, M., & Gulan, M. (2022). Hybrid virtual commissioning of a robotic manipulator with machine vision using a single controller. *Sensors, 22*(4), 1621. https://doi.org/10.3390/s22041621

Ortega, A., Parra, S., Schneider, S., & Hochgeschwender, N. (2024). Composable and executable scenarios for simulation-based testing of mobile robots. *Frontiers in Robotics and AI, 11*, 1363281. https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1363281

Qin, Q., Liu, Z., Zhong, R., Wang, X. V., Wang, L., Wiktorsson, M., & Wang, W. (2026). Robot digital twin systems in manufacturing: Technologies, applications, trends and challenges. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 97*, 103103. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103103

Rodríguez-Nieto, D., Navas, E., & Fernández, R. (2026). Digital twin of a dual-arm autonomous seeding robot for hydroponic greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture, 251*, 111967. https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111967

Sajadieh, S. M. M., & Noh, S. D. (2025). From simulation to autonomy: Reviews of the integration of artificial intelligence and digital twins. *International Journal of Precision Engineering and*

Manufacturing-Green Technology, 12, 1597–1628. https://doi.org/10.1007/s40684-025-00750-z

Sibona, F., Harrison, N., Wallace, N., Stevens, C., Sukkarieh, S., Raubenheimer, D., Simpson, S. J., & González, L. A. (2025). A framework to enable eco-cyber-physical systems for robotics-focused digital twins in smart farming. *Journal of Field Robotics, 42*(6), 3016–3037. https://doi.org/10.1002/rob.22562

Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2024). Digital twins in agriculture and forestry: A review. *Sensors, 24*(10), 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117

Yao, K., Chi, H., Chen, D., & Zhang, J. (2026). Quasi-real-time digital twin for robotic assembly: A physics-based multi-fidelity framework. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10845-026-02879-3


BİDGE