3. BÖLÜM

DİJİTAL İKİZ PROJELERİNDE KONSORSİYUM YAPISI VE İNOVASYON VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR DEĞERLENDİRME

Oğuz Emre BALKAR[1]

Giriş

Dijital ikizler, fiziksel varlıkların, süreçlerin ve sistemlerin güncel verilerle beslenen dijital temsillerini oluşturarak izleme, kestirim ve optimizasyon kararlarının aynı çevrim içinde yürütülmesine imkân sağlamaktadır. İlişkili diğer kavramlardan (dijital model ve dijital gölge) farkı, veri akışının yönüne ve otomasyon derecesine göre anlaşılmaktadır (Kritzinger vd., 2018). Bu noktada iki yönlü veri bağlantısı, dijital ikizi statik bir modelden ayıran temel niteliklerden biri olarak görülmektedir (Fuller vd., 2020).

Belirli bir sistemin içerisindeki yaşam döngüsü boyunca varlığın kimliğinin, durumunun, davranışının ve çevresindeki bağlantılarının temsil edilmesi, dijital ikiz kapsamı içerisinde yer almaktadır (Jones vd., 2020). Söz konusu özellikler, gerçekleştirilen dijital ikiz projelerine olan yaklaşımları da etkilemektedir. Nitekim, günümüzde bu projeler yalnızca bir yazılım geliştirme faaliyeti olarak değil, model, donanım ve alan bilgisinin birlikte yönetildiği sosyo-teknik inovasyon sistemleri olarak da ele alınmaktadır.

Özellikle, dijital ikiz uygulamalarının ve projelerinin üretim, enerji, sağlık, ulaştırma ve kent yönetimi gibi alanlara yayılması dikkat çekmektedir. Sektörlere ve kullanım senaryolarına bağlı olarak kavramın farklı biçimlerde değerlendirildiği görülmektedir (Barricelli vd., 2019). Örneğin, siber-fiziksel sistemlerle kurulan bağlantı, fiziksel süreç ile dijital temsil arasında sürekli bir öğrenme döngüsü oluşturmaktadır (Tao vd., 2019). Öte yandan, üretim sistemlerinde izleme, kestirim ve yeniden yapılandırma rollerinin veri bağlantısının kapsamına göre değiştiği anlaşılmaktadır (Negri vd., 2017). Gerçek zamanlı veri ediniminin ise bu sistemlerin uygulama kapasitesini

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Lojistik Programı, ORCID: 0000-0001-5853-0926.

güçlendirdiği belirtilmektedir (Uhlemann vd., 2017). Dolayısıyla, dijital ikizlerin geliştirilmesi için farklı teknik uzmanlıkların aynı proje yapısı içinde bir araya getirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Bu bağlamda dijital ikizlerin, ürün tasarımı, üretim ve hizmet aşamalarını birbirine bağlaması, kuruluş sınırlarının dışına da çıkan bir bilgi üretim düzeni ortaya çıkarmaktadır. Burada kullanılabilecek yöntemlerden biri olan büyük veri analitiği aracılığıyla fiziksel süreçlerden elde edilen heterojen verilerin karar bilgisine dönüştürülebildiği ifade edilmektedir (Qi ve Tao, 2018). Ancak süreçlerin düzgün bir şekilde ilerlemesi için model doğruluğu, hesaplama maliyeti ve belirsizlik arasında bir dengenin kurulması gerekmektedir (Rasheed vd., 2020). İlgili çerçevede, kavramsal mimarilerin endüstriyel uygulamalara aktarılabilmesi için mevcut bilgi sistemleri ve iş süreçleriyle uyumlaştırılması zorunlu olmaktadır (Lattanzi vd., 2021). Bu yüzden, dijital ikiz projelerinde teknik başarının yanı sıra ortak seçimi, görev paylaşımı ve konsorsiyum yönetimi boyutlarına da dikkat edilmesi önem arz etmektedir.

Çünkü doğru bir şekilde oluşturulan konsorsiyumlar, kuruluşların kendi bünyelerinde bulunmayan veri kaynaklarına, laboratuvarlara, pilot alanlara ve tamamlayıcı yeteneklere erişebilmelerine imkân sağlamaktadır. Bu bağlamda erişilen dış bilginin değerinin, kuruluşların bu bilgiyi tanıma, özümseme ve kullanma kapasitesine bağlı olduğu belirtilmektedir (Cohen ve Levinthal, 1990). Ayrıca, mevcut veya planlanan kurumlar arası ağların, öğrenme ve inovasyonun başlıca öncülleri olduğu gösterilmektedir (Powell vd., 1996). Bununla beraber, dış bilgi arayışının belirli bir düzeye kadar kurum veya kuruluşa yarar sağladığı, ancak aşırı açıklığın dikkat dağınıklığı ve özümseme yükü yaratabildiği ifade edilmektedir (Laursen ve Salter, 2006).

Öte yandan, dijital ikiz projeleri bağlamında belirli organizasyonlar öne çıkmaktadır. Bunlardan biri olarak, Avrupa Birliği (AB) çerçeve programları, sınır ötesi araştırma ve inovasyon ağlarının oluşturulmasına yönelik önemli politika araçları arasında yer almaktadır. Bu programlardaki proje ağlarının farklı ülkelerdeki araştırma kuruluşları ile işletmeleri birbirine bağladığı görülmektedir (Barber vd., 2006). Bununla beraber, belirli çekirdek kuruluşların tekrarlanan katılımına bağlı olarak ağların merkezileşebildiği belirtilmektedir (Breschi ve Cusmano, 2004). Dolayısıyla, politika odaklı iş birliği ağlarında ortak seçiminin hem bilimsel uzmanlıklar hem de program öncelikleri doğrultusunda şekillendiği anlaşılmaktadır (Protogerou vd., 2010).

Benzer şekilde, Avrupa araştırma ağlarının yeni katılımcılar ve tekrarlanan bağlar aracılığıyla zaman içerisinde yeniden yapılandığı hususu dikkat çekmektedir (Balland vd., 2019).

Avrupa araştırma ağlarında gözlenen merkezileşme, çeşitlenme ve yeniden yapılanma eğilimleri, dijital ikiz projelerindeki konsorsiyum yapısının bağımsız bir inceleme alanı olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar dijital ikizler konusunda çok sayıda araştırmanın yapıldığı ve bu çalışmalarda çoğunlukla kavramsal tanımlar, sistem mimarileri, etkinleştirici teknolojiler ve uygulama sorunları üzerinde durulduğu görülmektedir. Sistematik incelemelerde veri birlikte işlerliği, model güncelliği ve standartlaşma gibi teknik problemlerin öne çıktığı anlaşılmaktadır (Semeraro vd., 2021). Bununla beraber, dijital ikizlerin inovasyon üzerindeki etkilerinin yeni iş birliği ve değer yaratma biçimleriyle ilişkili olduğu ifade edilmektedir (Holopainen vd., 2024). Dijital inovasyon ittifaklarında, ortak portföyün tamamlayıcı kaynaklara erişim ile yönetsel karmaşıklık arasında denge kuracak şekilde yapılandırılması gerektiği belirtilmektedir (Bockelmann vd., 2024). Bu yüzden dijital ikiz projelerinin başarısının yalnızca teknik yeterliliklere değil, aynı zamanda projeye katılan kuruluşların sayısına, çeşitliliğine ve aralarındaki ilişkilerin niteliğine de bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, erişilen literatür genel olarak değerlendirildiğinde, kamu destekli dijital ikiz projelerindeki konsorsiyum yapısının finansman başına çıktı üretimiyle ilişkisini proje düzeyinde inceleyen araştırmaların sınırlı sayıda olduğu dikkat çekmektedir.

Belirlenen araştırma boşluğundan hareketle gerçekleştirilen bu çalışmada, Horizon 2020 ve Horizon Europe kapsamındaki dijital ikiz projelerinde konsorsiyum yapısı ile inovasyon çıktıları arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Konsorsiyum yapısının farklı boyutlarıyla incelenebilmesi amacıyla konsorsiyum büyüklüğü, ülke çeşitliliği, kuruluş türü çeşitliliği, Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme (KOBİ) payı, önceki iş birliği yoğunluğu, yeni katılımcı payı ve koordinatör deneyimi bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. İnovasyon çıktısı, projeler kapsamında üretilen yayın ve teknik çıktıların toplamı üzerinden ölçülmüştür. İnovasyon verimliliği ise ilgili çıktıların Avrupa Komisyonu katkısına oranlanmasıyla değerlendirilmiştir.

Avrupa Komisyonu Topluluk Araştırma ve Geliştirme Bilgi Servisi (CORDIS) üzerinden elde edilen ikincil veriler, 58,840 projeyi kapsayan tarama süreci sonucunda oluşturulmuştur. Belirlenen örneklem, sayım verilerine uygun negatif binom-2 modelleri, ağ analizi, çeşitlilik etkileşim modeli, alternatif örneklem tanımları ve makine öğrenmesi yaklaşımıyla incelenmiştir. Böylece ortak sayısı ile ortak çeşitliliğinin birbirlerinden ayrılması, bilimsel ve uygulamalı çıktıların farklı biçimde değerlendirilmesi ve geçmiş iş birlikleri ile yeni katılımcıların aynı model içerisinde ele alınması sağlanmıştır. Belirtilen çerçevede analiz işlemleri gerçekleştirilerek, ulaşılan bulguların incelenmesi ve yorumlanması süreçleri yürütülmüştür.

Kuramsal Çerçeve

Dijital ikiz kavramının gelişim süreci incelendiğinde, fiziksel ve dijital sistemler arasındaki sürekli veri bağlantısının kavramın temel belirleyicilerinden biri olduğu görülmektedir. İlgili sistemlerde sensör verileri, mühendislik modelleri ve operasyonel kararlar ortak bir bilgi mimarisi içerisinde bütünleştirilmektedir. Dijital ikizlerin ürün tasarımı, üretim ve hizmet süreçlerini yaşam döngüsü boyunca ilişkilendirdiği ifade edilmektedir (Tao vd., 2018). Fiziksel süreçlerden elde edilen büyük verilerin sanal modellerle bütünleştirilmesi, akıllı üretim uygulamalarının karar kapasitesini geliştirmektedir (Qi ve Tao, 2018). Bununla beraber, model doğruluğu ve belirsizlik yönetimi gibi hususlar dijital ikiz uygulamalarının başarısını doğrudan etkileyebilmektedir (Rasheed vd., 2020). Bu yüzden dijital ikiz projeleri, yalnızca teknik bir model geliştirme faaliyeti olarak değil, farklı bilgi kaynaklarının sürekli biçimde eşleştirildiği bütünleşik bir inovasyon süreci olarak da değerlendirilmektedir.

Söz konusu teknik yapıların endüstriyel süreçlere aktarılması sırasında kavramsal modellerin mevcut iş süreçleri ve bilgi sistemleriyle uyumlaştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Lattanzi vd., 2021). Bu ihtiyaç, farklı uzmanlıkların ve örgütsel kaynakların aynı proje yapısı içerisinde bir araya getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Dijital ikizlerin inovasyon yönetimi üzerindeki sonuçlarının yalnızca teknoloji edinimiyle sınırlı olmadığı, bilgi paylaşımı ve değer yaratma biçimlerini de değiştirdiği belirtilmektedir (Holopainen vd., 2024).

Belirtilen çerçevede, açık inovasyon yaklaşımı, kuruluşların bilgi üretiminde dış kaynaklardan yararlandığını ve bilgi akışlarının farklı yönlerde

gerçekleşebildiğini kabul etmektedir (Dahlander ve Gann, 2010). İşbirliği portföylerinin bileşiminin ürün ve süreç inovasyonlarını farklı kanallar üzerinden etkilediği görülmektedir (Faems vd., 2005). Mevcut bilginin yeniden kullanılması güvenilirliği artırırken, yeni bilgi arayışı alışılmış kombinasyonların dışına çıkılmasını sağlayabilmektedir (Katila ve Ahuja, 2002). Bu bağlamda dijital ikiz konsorsiyumlarındaki inovasyon, farklı ortaklardan edinilen bilgilerin prototip, standart, yayın ve teknik çıktı gibi sonuçlara dönüştürülmesiyle ortaya çıkmaktadır.

Dijital ikiz projelerinde bilgi kaynaklarının kapsamını belirleyen diğer unsurlardan biri de konsorsiyum büyüklüğü olarak görülmektedir. Ortak sayısının artması, sensör teknolojileri, veri bağlantısı, modelleme, yapay zekâ, siber güvenlik ve pilot uygulama gibi tamamlayıcı bileşenlerin aynı proje içerisinde yer almasını kolaylaştırabilmektedir. Büyük ölçekli iş birliği ağlarındaki kümelenmenin ve kısa bağlantıların bilgi dolaşımını destekleyerek inovasyon üretimini artırabildiği gösterilmektedir (Schilling ve Phelps, 2007). Bununla birlikte, ittifak ağının bileşiminin keşifçi inovasyona erişimde, bağ sayısından daha açıklayıcı olabildiği ifade edilmektedir (Phelps, 2010). Bu durum, ortak sayısındaki artışın başlangıçta daha geniş bir bilgi ve kaynak tabanı sağlayabileceğini, ancak konsorsiyum bileşiminin niteliği dikkate alınmadan büyüklüğün tek başına yeterli bir performans göstergesi olarak değerlendirilemeyeceğini göstermektedir.

Öte yandan, konsorsiyum büyüdükçe iletişim kanalları, görev bağımlılıkları ve karar alma süreçleri de çoğalmaktadır. Disiplin ve kuruluş sınırlarını aşan araştırma ekiplerinde koordinasyonun, bilgi paylaşımının yanında görevlerin ve teşviklerin uyumlaştırılmasını da gerektirdiği belirtilmektedir (Cummings ve Kiesler, 2005). Çok kuruluşlu projelerde coğrafi ve kurumsal dağılımın koordinasyon maliyetleri aracılığıyla proje sonuçlarını zayıflatabildiği görülmektedir (Cummings ve Kiesler, 2007). Küçük teknoloji firmalarının iş birliği ağlarında, ortak sayısının bilgi yaratımına katkısının belirli bir düzeyden sonra azalabildiğine dikkat çekilmektedir (Yoon vd., 2015). Dolayısıyla konsorsiyum büyüklüğünün inovasyon çıktısını başlangıçta artırması, belirli bir düzeyden sonra ise koordinasyon yükü nedeniyle bu katkının zayıflaması beklenmektedir.

Konsorsiyumların bilgi tabanını genişleten bir diğer unsur ülke çeşitliliği olarak görülmektedir. Farklı ülkelerden ortakların aynı proje içerisinde yer

alması, düzenleyici ortamların, pazar bilgilerinin, araştırma altyapılarının ve uygulama alanlarının bir araya gelmesini sağlamaktadır. Bölgesel bilgi tabanı ile ağ konumunun, iş birliği ağlarının inovasyon performansına yaptığı katkıyı değiştirdiği ifade edilmektedir (De Noni vd., 2018). Avrupa araştırma ağlarında yeni bilgi bileşimlerinin oluşmasının coğrafi bağlantılarla ilişkili olduğu görülmektedir (Balland vd., 2019). Bununla beraber, çeşitlilik ile ağ bağlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiği ve farklılıkların uygun ilişki yapıları içinde inovasyona dönüştürülebildiği belirtilmektedir (Lungeanu ve Contractor, 2015). Bu nedenle ülke çeşitliliğinin sağladığı bilgi genişliğinin, geliştirilen dijital ikiz çözümlerinin farklı koşullarda sınanmasını kolaylaştırması ve inovasyon çıktıları üzerinde olumlu bir sonuç oluşturması beklenmektedir.

Ülke çeşitliliğiyle ilişkili olmakla birlikte, ondan farklı bir bilgi bileşimi sağlayan kuruluş türü çeşitliliği, üniversitelerin bilimsel bilgi üretimi, firmaların sistem bütünleştirme yeteneği, araştırma merkezlerinin yöntem geliştirme kapasitesi ve kamu kuruluşlarının uygulama bilgisi arasında tamamlayıcılık oluşturabilmektedir. Farklı ortak türlerinden oluşan iş birliği ağlarının ürün inovasyonunun derecesini artırabildiği gösterilmektedir (Nieto ve Santamaría, 2007).

İnovasyon için bilişsel mesafenin, tarafları farklılaştıracak ancak karşılıklı anlaşmayı engellemeyecek bir düzeyde olması gerektiği ifade edilmektedir (Nooteboom vd., 2007). Teknolojik mesafe, ağ merkeziliği ve yoğunluk gibi göstergelerin keşifçi bilgi üretimini birlikte biçimlendirdiği anlaşılmaktadır (Gilsing vd., 2008). Bu doğrultuda kuruluş türü çeşitliliğinin farklı bilgi üretim ve uygulama kapasitelerini birleştirerek dijital ikiz projelerinin inovasyon çıktısını destekleyebileceği düşünülmektedir.

Bununla beraber, kuruluş türü çeşitliliğinin sağladığı tamamlayıcılık, ortaklık portföyünün dengesi ve kuruluşların bilgiyi bütünleştirme kapasiteleri tarafından sınırlandırılabilmektedir. Ortak türü çeşitliliğinin inovasyon performansına katkısının farklı sınır koşullarına göre değiştiği ifade edilmektedir (Hagedoorn vd., 2018). Portföy çeşitliliğinin radikal ve artımsal inovasyon üzerinde aynı sonucu oluşturmadığı belirtilmektedir (Oerlemans vd., 2013). Teknolojik çeşitlilik ile ittifakların örgütlenme biçiminin birlikte yönetilmesinin Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) performansını etkilediği gösterilmektedir (Sampson, 2007). Bu değerlendirmeler, kuruluş türü

çeşitliliğinin tek başına olumlu sonuçlar doğurabilmesine karşın, ülke çeşitliliğiyle aynı anda yükselmesi durumunda coğrafi ve kurumsal farklılıkların çift katmanlı bir koordinasyon yükü oluşturabileceğini göstermektedir.

Kuruluş bileşiminin uygulamaya aktarım boyutunda KOBİ'ler ayrı bir önem taşımaktadır. KOBİ'ler dijital ikiz projelerine niş yazılım, sensör, veri analitiği ve sektör odaklı uygulama bilgisi sağlayabilmektedir. Küçük ölçekli örgütsel yapıların hızlı karar alma, prototip geliştirme ve müşteri ihtiyaçlarına uyum sağlama süreçlerini destekleyebileceği düşünülmektedir. Özellikle, bölgesel Ar-Ge konsorsiyumlarında ortak bileşimin KOBİ verimliliği üzerinde farklı sonuçlar meydana getirdiği gösterilmektedir (Caloffi vd., 2020). Kamu destekli teknoloji konsorsiyumlarına katılımın, firmaların Ar-Ge üretkenliğini dış bilgi ve ortak altyapı aracılığıyla etkileyebildiği belirtilmektedir (Lechevalier vd., 2010). Bu nedenle konsorsiyumdaki KOBİ payının artmasının özellikle prototip geliştirme, teknik çıktı üretme ve elde edilen bilginin uygulamaya aktarılması bakımından inovasyon çıktısını desteklemesi beklenmektedir.

Konsorsiyum bileşiminin yanı sıra ortaklar arasındaki geçmiş ilişkiler de bilgi bütünleştirme kapasitesini biçimlendirmektedir. Önceden birlikte çalışmış ortaklar arasında ortak dil, güven ve koordinasyon rutinleri gelişebilmektedir. Doğrudan bağların bilgiye erişim sağladığı, yapısal boşlukların ise farklı bilgi kümelerinin birleştirilmesine imkân verdiği ifade edilmektedir (Ahuja, 2000). Genel ittifak deneyimi ile belirli bir ortağa özgü deneyimin, ortak Ar-Ge projelerinin performansını farklı mekanizmalarla etkilediği görülmektedir (Hoang ve Rothaermel, 2005). Güçlü ve zayıf bağların birlikte yönetildiği ağ yapılarının inovasyon açısından ayırt edici bir ilişkisel kapasite oluşturabildiği belirtilmektedir (Capaldo, 2007). Bu yaklaşım, önceki iş birliği yoğunluğunun ortakların birbirlerinin çalışma biçimlerini tanımasını sağladığını ve dijital ikiz projelerindeki koordinasyon maliyetlerini azaltabileceğini göstermektedir.

Önceki iş birliklerinin sağladığı güven ve deneyime karşın, tekrarlanan ilişkiler bağlantı ağlarının kapanması ve bilgi tekrarı gibi sorunlara neden olabilmektedir. Güçlü bağların inovasyon açısından değerinin, ağın geri kalanında bulunan bilgi çeşitliliğine bağlı olduğu ifade edilmektedir (Rost, 2011). Tekrarlanan ortaklıkların sosyal yakınlığın ekonomik amaçların önüne

geçmesi durumunda performansı zayıflatabildiği gösterilmektedir (Holloway ve Parmigiani, 2016). Avrupa bölgelerindeki inovasyonerlerin tekrarlanan iş birliklerinin coğrafi ve teknolojik örüntülerle birlikte şekillendiği görülmektedir (Tóth vd., 2021). Buna göre, önceki iş birliği yoğunluğunun inovasyon çıktısıyla ilişkisi, güven ve koordinasyon yararları ile bilgi tekrarı riski arasındaki dengeye bağlı olmaktadır.

Yerleşik bağların karşısında yeni katılımcılar, konsorsiyuma farklı teknik repertuvarlar, pazar bağlantıları ve problem tanımları kazandırabilmektedir. Ortaklardan elde edilen bilginin yeni biçimlerde birleştirilmesinin, Ar-Ge ittifaklarında bilginin kullanılabilirliğini etkilediği belirtilmektedir (Kok vd., 2020). Bununla beraber, yeni katılımcı payının yükselmesi, ortak dilin ve proje rutinlerinin henüz oluşmadığı bir konsorsiyum yapısı meydana getirebilmektedir. Teknik standartların öğretilmesi ve idari süreçlerin kurulması için gereken zaman, dijital ikiz projelerindeki arayüz bağımlılıklarına bağlı olarak artabilmektedir. Dolayısıyla, yeni katılımcılar bilgi çeşitliliği ve yeni kombinasyonlar yoluyla inovasyonu destekleyebilmekte, ancak yüksek entegrasyon maliyetleri bu katkının çıktı üretimine dönüşmesini sınırlandırabilmektedir.

Bilgi çeşitliliğinin inovasyon çıktısına dönüştürülmesinde yönetimi sağlayan koordinatörün deneyimi de belirleyici olabilmektedir. Koordinatör, dijital ikiz projelerinde teknik bütünlük ile idari uyum arasındaki temel bağlantıyı kurmaktadır. Deneyimli bir koordinatörün tamamlayıcı ortakları seçmesi, çalışma paketleri arasındaki bağımlılıkları öngörmesi ve raporlama takvimini teknik risklerle uyumlu hâle getirmesi beklenmektedir. Kamu destekli Ar-Ge konsorsiyumlarında proje liderliği ile kamu gözetiminin performansı etkileyen farklı yönetişim araçları olduğu belirtilmektedir (Nishimura ve Okamuro, 2018). Araştırma konsorsiyumlarının başarısının program tasarımı ile katılımcıların bilgi paylaşma motivasyonuna bağlı olduğu gösterilmektedir (Branstetter ve Sakakibara, 2002). İlişki temelli değerlendirme yaklaşımında performansın üretken iş birliği bağlarının gelişimiyle birlikte incelenmesi önerilmektedir (Pisacane ve Tagliacozzo, 2023). Bu nedenle koordinatörün önceki dijital ikiz proje deneyiminin, ortak seçimler, bilgi paylaşımı ve teknik bağımlılıkların yönetimi üzerinden inovasyon çıktılarıyla olumlu bir ilişkisi olması beklenmektedir.

Kuramsal çerçeve genel olarak değerlendirildiğinde, dijital ikiz projelerindeki konsorsiyum yapısının birbirini tamamlayan ve sınırlandıran çok sayıda boyuttan oluştuğu anlaşılmaktadır. Konsorsiyum büyüklüğü ile ülke ve kuruluş türü çeşitliliği erişilebilen bilgi ve kaynakların kapsamını genişletirken, aynı zamanda koordinasyon yükünü artırabilmektedir. KOBİ katılımı teknik bilginin uygulamaya aktarılmasını desteklerken, önceki iş birlikleri yerleşik koordinasyon rutinleri sağlamaktadır. Yeni katılımcılar farklı bilgi bileşimleri oluşturabilmekte, koordinatör deneyimi ise söz konusu farklılıkların ortak proje hedefleri doğrultusunda yönetilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bu yüzden konsorsiyum yapısının inovasyon çıktısıyla ilişkisinin tek bir gösterge üzerinden değil, büyüklük, çeşitlilik, ağ yerleşikliği, katılımcı bileşimi ve yönetişim kapasitesi birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İlgili değerlendirmeler doğrultusunda araştırma hipotezleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

H1a. Konsorsiyum büyüklüğü dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H1b. Konsorsiyum büyüklüğünün karesi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.

H2. Konsorsiyumdaki ülke çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H3. Konsorsiyumdaki kuruluş türü çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H4. Konsorsiyumdaki KOBİ payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H5. Önceki iş birliği yoğunluğu dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H6. Konsorsiyumdaki yeni katılımcı payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H7. Koordinatörün önceki dijital ikiz proje deneyimi projenin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.

H8. Ülke çeşitliliği ile kuruluş türü çeşitliliğinin etkileşimi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.

Metodoloji

Araştırmada nicel, açıklayıcı ve kesitsel bir tasarım benimsenmiştir. Analizlere, Avrupa Birliği tarafından desteklenen araştırma ve inovasyon projeleri dâhil edilmiştir. Veriler, CORDIS tarafından yayımlanan Horizon 2020 (H2020) ve Horizon Europe (HE) açık veri dağıtımlarından elde edilmiştir. Horizon 2020 proje verilerine, Avrupa Komisyonu tarafından paylaşılan veri tabanı aracılığıyla erişilmiştir (European Commission, 2026a). Benzer şekilde, Horizon Europe proje verilerine de ilgili veri tabanı üzerinden ulaşılmıştır (European Commission, 2026b).

İlk olarak, toplam 58,840 proje dijital ikizle ilişkili ifadeler bakımından taranmıştır. Proje başlığı veya kısaltmalarında "digital twin", "digital twins" veya "digital-twin" ifadesi bulunan kayıtlar A katmanı altında ele alınmıştır. Aynı ifadeler, proje amacı, anahtar kelimeleri veya diğer metin alanlarında yer alıyorsa, B katmanı altında sınıflandırılmıştır. İfadenin yalnızca projeye bağlı yayın ya da teknik çıktı kayıtlarında yer alması ise C katmanı olarak tanımlanmıştır. Dijital ikizlerle ilişkili olan, ancak doğrudan bu ifadeleri içermeyenler ise D katmanında tutulmuş ve ana analize dâhil edilmemiştir.

Yapılan sınıflandırmaların ardından, A ve B katmanlarından oluşan 853 projelik çekirdek örneklem belirlenmiştir. 7 Ağustos 2026 tarihinden sonra başlayan 101 proje ile tek kuruluşlu 80 proje kapsam dışında bırakılmıştır. Böylece ana analitik örneklem, 672 çok ortaklı dijital ikiz projesinden oluşmuştur. Ayrıca, çok ortaklı projelere odaklanılarak, konsorsiyum yapısına ilişkin değişkenlerin karşılaştırılabilir biçimde hesaplanması sağlanmıştır. C katmanının dâhil edildiği genişletilmiş örneklem, farklı proje olgunluğu koşulları kapsamında sağlamlık analizlerinde ele alınmıştır. Bu bağlamda ele alınan projelere ilişkin istatistikler, Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Araştırmada Ele Alınan Projelere İlişkin Genel İstatistikler

Boyut	Proje Sayısı
CORDIS kapsamında taranan projeler	58,840
A, B, C ve D katmanlarındaki tüm aday projeler	1,334
A ve B çekirdek örneklem	853
7 Ağustos 2026 tarihinden sonra başlayan projeler	101
Başlamış çekirdek projeler	752
Tek kuruluşlu projeler	80
Ana analitik örneklem	672
En az iki yıl gözlenen olgun örneklem	414
Tamamlanmış çok ortaklı projeler	216

Tablo 1'de belirtildiği üzere, 58,840 proje içerisinden 1,334 aday kayıt belirlenmiştir. Buna göre A ve B katmanlarında 853 proje yer almıştır. Gelecekte başlayacak ve tek kuruluşlu projelerin çıkarılması sonucunda, 672 gözlemden oluşan ana örnekleme ulaşılmıştır. Bunun yanında, en az iki yıl gözlenen 414 proje ile tamamlanan 216 proje alternatif örneklem olarak değerlendirilmiştir. C katmanını kapsayan genişletilmiş örneklemde proje sayısı 1,088'e kadar yükselmiştir. Böylece, ana sonuçların örneklem tercihine duyarlılığının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın bağımlı değişkeni olan İnovasyon Çıktısı (İÇ), CORDIS kayıtlarındaki yayın ve teknik çıktı sayılarının toplamı üzerinden hesaplanmıştır. Kaliteye duyarlı alternatif sonuç değişkeni, Dijital Nesne Tanımlayıcısı (DOI) içeren yayınlar ile teknik çıktıların bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bilimsel ve uygulamalı çıktı mekanizmalarının birbirinden ayrılması amacıyla, yayın ve teknik çıktılar ayrıca değerlendirilmiştir. İnovasyon Verimliliği (İV) ise toplam inovasyon çıktısının milyon € cinsinden Avrupa Komisyonu Azami Katkısına (AKK) oranlanmasıyla ölçülmüştür. İlgili hesaplama Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$\text{İV}_\text{i} = \frac{(\text{Yayın}_\text{i} + \text{Çıktı}_\text{i})}{(\frac{\text{AKK}_\text{i}}{1{,}000{,}000})} \quad (1)$$

Denklem 1'de İV, bir projedeki yayın ve teknik çıktı toplamının milyon € cinsinden AKK'ye oranını göstermektedir. Bağımsız değişkenlerden Konsorsiyum Büyüklüğü (KB) benzersiz katılımcı sayısıyla ölçülmüş ve çarpık dağılım nedeniyle doğal logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Olası doğrusal olmayan ilişkinin belirlenmesi için merkezlenmiş logaritmik KB'nin

karesi modele eklenmiştir. Ülke Çeşitliliği (ÜÇ) ve Kuruluş Türü Çeşitliliği (KTÇ), kategori paylarına dayalı normalize edilmiş Shannon entropisiyle 0 ile 1 arasında hesaplanmıştır (Shannon, 1948). Değerin yükselmesi, ortakların ülke veya kuruluş türleri bakımından daha dengeli dağıldığını göstermektedir. Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme Payı (KOBİP) ise KOBİ sayısının toplam katılımcı sayısına oranı olarak belirlenmiştir.

Önceki İş Birliği Yoğunluğu (ÖİY), proje başlangıç tarihinden önce birlikte en az bir dijital ikiz projesinde yer alan ortak çiftlerinin konsorsiyumdaki tüm olası ortak çiftlerine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Aynı tarihte başlayan projeler birbirleri açısından geçmiş deneyim olarak kabul edilmemiştir. Yeni Katılımcı Payı (YKP), proje başlangıcına kadar veri setindeki başka bir dijital ikiz projesine katılmamış kuruluşların konsorsiyum içindeki oranını göstermektedir. Koordinatör Deneyimi (KD) ise koordinatör kuruluşun başlangıç tarihinden önce katıldığı dijital ikiz proje sayısıyla ölçülmüş ve ilgili değişkene logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Kontrol değişkenleri kapsamında Gözlem Süresi (GS), program, tamamlanma durumu, seçim katmanı ve fon türü modele dâhil edilmiştir. CORDIS kuruluş türü kodları özel kuruluş (PRC), yükseköğretim kuruluşu (HES), araştırma kuruluşu (REC), kamu kuruluşu (PUB) ve diğer kuruluş (OTH) olarak sınıflandırılmıştır. Analizlerde kullanılan değişkenler ve ölçüm birimleri, Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Araştırmanın Değişkenleri ve Ölçüm Birimleri

Değişken	Kısaltma	Ölçüm
İnovasyon Çıktısı	İÇ	Yayın + teknik çıktı sayısı
İnovasyon Verimliliği	İV	Milyon € AKK başına İÇ
Konsorsiyum Büyüklüğü	KB	Benzersiz katılımcı sayısı, ln
Ülke Çeşitliliği	ÜÇ	Normalize Shannon entropisi, 0-1
Kuruluş Türü Çeşitliliği	KTÇ	PRC, HES, REC, PUB, OTH entropisi
KOBİ Payı	KOBİP	KOBİ sayısı / katılımcı sayısı
Önceki İş Birliği Yoğunluğu	ÖİY	Önceden bağlı çift / tüm olası çift
Yeni Katılımcı Payı	YKP	Deneyimsiz kuruluş / tüm ortaklar
Koordinatör Deneyimi	KD	Önceki dijital ikiz proje sayısı, ln(1+x)
Kontrol değişkenleri	—	GS, program, tamamlanma durumu, seçim katmanı ve fon türü

PRC: özel kuruluş; HES: yükseköğretim kuruluşu; REC: araştırma kuruluşu; PUB: kamu kuruluşu; OTH: diğer kuruluş

Tablo 2'de yer alan değişkenlerden İÇ ve İV ana bağımlı değişkenler olarak belirlenmiştir. KB, ÜÇ, KTÇ, KOBİP, ÖİY, YKP ve KD değişkenleri bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Ayrıca, GS, program, tamamlanma durumu, seçim katmanı ve fon türü, kontrol değişkenleri olarak hesaplamalara katılmıştır.

Analiz sürecinde ilk olarak veri kalitesi kontrolleri yapılmıştır. Proje anahtarları, başlangıç tarihleri, AKK, konsorsiyum göstergeleri ve çıktı değişkenlerinde eksik değer bulunmadığı tespit edilmiştir. Proje ve program anahtarlarında yinelenen kayıt bulunmadığı belirlenmiştir. Ardından değişkenlerin dağılımları tanımlayıcı istatistiklerle, aralarındaki monoton ilişkiler ise Spearman sıra korelasyon katsayısı (ρ) aracılığıyla incelenmiştir (Spearman, 1904). Parametrik ortalama karşılaştırmalarında Welch t testi kullanılmıştır (Welch, 1947). Parametrik olmayan karşılaştırmalarda Mann-Whitney U testi uygulanmıştır (Mann ve Whitney, 1947). Çoklu karşılaştırmalarda Yanlış Keşif Oranı (FDR), Benjamini-Hochberg yöntemiyle kontrol edilmiştir (Benjamini ve Hochberg, 1995).

Yayın ve teknik çıktı sayılarının negatif olmayan tamsayı değerlerden oluştuğu ve varyanslarının ortalamalardan belirgin biçimde yüksek olduğu görülmüştür. Bu yüzden, sayım verilerindeki aşırı saçılmanın dikkate alınabilmesi amacıyla Poisson modeli yerine Negatif Binom-2 (NB2) modeli kullanılmıştır (Cameron ve Trivedi, 1986). AKK'nin doğal logaritması modele ofset olarak eklenmiş ve böylece katsayıların finansman başına beklenen çıktı oranındaki değişimi göstermesi sağlanmıştır. Araştırmada kullanılan temel NB2 modeli Denklem 2'de sunulmuştur.

$$\ln\left(\frac{\mathbb{E}[Y_i \mid X_i]}{F_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 KB_i^c + \beta_2 (KB_i^c)^2 + \sum_{k=1}^{K} \beta_k X_{ki} \qquad (2)$$

Denklem 2'de Y_i, i projesinin yayın ya da teknik çıktı sayısını, F_i AKK'yi, X_{ki} ise açıklayıcı ve kontrol değişkenlerini temsil etmektedir. KB_i^c, doğal logaritması alınarak örneklem ortalaması etrafında merkezlenmiş konsorsiyum büyüklüğünü göstermektedir. β_1 ve β_2 katsayıları KB ile çıktı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi, β_k katsayıları ise diğer değişkenlerle ilişkili tahmin katsayılarını göstermektedir.

Temel modele ek olarak, DOI içeren yayınlar ve teknik çıktılardan oluşan kaliteye duyarlı çıktı, yayın sayısı ve teknik çıktı sayısı ayrı ayrı

modellenmiştir. ÜÇ ile KTÇ'nin birlikte oluşturduğu sonuçların belirlenmesi amacıyla merkezlenmiş değişkenlerin çarpımından bir etkileşim terimi oluşturulmuştur. Finansman başına çıktı oranının ln(1+x) dönüşümü, değişen varyansa dayanıklı HC3 kovaryans matrisi kullanılan en küçük kareler (OLS) modeliyle incelenmiştir (MacKinnon ve White, 1985). Ayrıca, herhangi bir çıktı üretme olasılığı yalnızca HE projelerinde lojit model aracılığıyla değerlendirilmiştir (Hosmer vd., 2013). H2020 gözlemlerinin tamamında en az bir çıktı bulunduğundan dolayı programlar arası lojit modelinde tam ayrışma ortaya çıkmıştır.

Son olarak, sonuçların örneklem tercihine duyarlılığı altı farklı kapsam üzerinden sınanmıştır. Bu kapsamda tek kuruluşluların dâhil edildiği çekirdek örneklem, en az iki yıl gözlenen olgun projeler, tamamlanmış projeler, yüksek özgüllüklü A katmanı, üst yüzde birlik çıktıların çıkarıldığı ana örneklem ve C katmanını içeren genişletilmiş örneklem kullanılmıştır. Ek olarak, modelin örneklem dışı tahmin performansının daha güvenilir biçimde değerlendirilmesi amacıyla beş katlı Çapraz Doğrulama (CV) uygulanmıştır (Stone, 1974). Rastgele Orman (RF) modeliyle İV'nin tahmin edilebilirliği ve değişkenlerin doğrusal olmayan önem sıralaması değerlendirilmiştir (Breiman, 2001).

Bulgular

Araştırma örnekleminin temel özellikleri incelenmiş ve projelerin program, seçim katmanı, fon türü ve tamamlanma durumlarına göre farklılaştığı görülmüştür. Ana örneklemdeki 672 projenin 562'si HE ve 110'u H2020 kapsamında desteklenmiştir. Araştırma ve İnovasyon Eylemi (RIA) ile İnovasyon Eylemi (IA) türlerinin her birinde 281 proje bulunduğu belirlenmiştir. 7 Ağustos 2026 tarihi itibariyle, 216 projenin tamamlandığı tespit edilmiştir. Projelerin %50.74'ü 11-20 ortaklı, %26.19'u ise en az 21 ortaklı konsorsiyumlardan oluşmuştur. Değişkenlere ilişkin ayrıntılı tanımlayıcı istatistikler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Tanımlayıcı İstatistikler

Değişken	Ortalama	Standart Sapma	Medyan	Minimum	Maksimum
KB	17.107	10.876	16.000	2.000	97.000
Ülke sayısı	7.789	3.198	8.000	1.000	20.000
KOBİP	0.260	0.161	0.250	0.000	1.000
ÜÇ	0.896	0.144	0.924	0.000	1.000
KTÇ	0.801	0.198	0.845	0.000	1.000
ÖİY	0.070	0.111	0.037	0.000	1.000
YKP	0.506	0.229	0.500	0.000	1.000
KD	8.409	12.708	4.000	0.000	94.000
İÇ	19.860	26.325	11.000	0.000	197.000
İV	4.112	6.122	2.102	0.000	66.152

Not: KD, koordinatörün önceki dijital ikiz proje sayısını göstermektedir.

Tablo 3'te ifade edildiği üzere, bir projede ortalama 17.107 ortak ile 7.789 ülke bulunduğu görülmüştür. ÜÇ ortalaması 0.896, KTÇ ortalaması 0.801 ve KOBİP ortalaması 0.260 olarak hesaplanmıştır. ÖİY ortalaması 0.070 iken, YKP ortalaması 0.506 düzeyinde bulunmuştur. Proje başına İÇ'nin ortalaması 19.860, medyanı 11.000 ve maksimum değeri 197.000 olarak belirlenmiştir. Projelerin %24.26'sında CORDIS'e kaydedilmiş bir yayın ya da teknik çıktı olmadığı anlaşılmıştır. İV ortalaması 4.112 ve medyan değeri 2.102 olarak tespit edilmiştir.

Modelde yer alan değişkenler arasındaki birlikte hareketin belirlenmesi amacıyla Spearman korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Ham çıktı sayısı ile GS arasında $\rho=0.826$, İV ile GS arasında ise $\rho=0.760$ düzeyinde pozitif ilişki bulunmuştur. KB ile AKK arasındaki ilişkinin $\rho=0.731$ olması, bütçe kontrol edilmediğinde ortak sayısının çıktı üzerindeki etkisinin olduğundan daha yüksek görünebileceğine işaret etmiştir. ÖİY ile YKP arasında $\rho=-0.697$ düzeyinde negatif ilişki tespit edilmiştir. Bununla beraber, Varyans Şişirme Faktörünün (VIF) en yüksek 2.360 olması nedeniyle ciddi bir çoklu doğrusal bağlantı sorunu bulunmadığı anlaşılmıştır (O'Brien, 2007).

Dijital ikiz projelerindeki kuruluşlar arasındaki bağlantıların incelenmesi amacıyla, başlamış 752 çekirdek proje üzerinden bir iş birliği ağı oluşturulmuştur. Ağdaki benzersiz kuruluşlar ve iş birliği bağlantılarının yanı sıra Bağlı Bileşen Sayısı (BBS), Ağ Yoğunluğu (AY), Ortalama Derece (OD), Ortalama Yerel Kümelenme Katsayısı (OYKK) ve Tekrarlanan Bağlantıların Payı (TBP) hesaplanmıştır. Bu göstergeler aracılığıyla ağın bütünleşme

düzeyi ile tekrarlanan ilişkilerin yaygınlığı değerlendirilmiştir. Elde edilen temel ağ göstergeleri Tablo 4'te paylaşılmıştır.

Tablo 4. Dijital İkiz İşbirliği Ağının Temel Göstergeleri

Gösterge	Değer
Başlamış çekirdek projeler	752
Benzersiz kuruluşlar	6,090
İş birliği bağlantıları	125,254
En büyük bileşenin payı	%99.33
BBS	40
AY	0.0068
OD	41.13
OYKK	0.849
TBP	%4.26

Tablo 4'te bir bağlantı, iki kuruluşun en az bir projede birlikte yer almasını göstermektedir. Bu sonuçlara göre iş birliği ağında 6,090 kuruluş ve 125,254 benzersiz bağlantı bulunduğu belirlenmiştir. BBS 40 olmasına rağmen, 6,049 kuruluşun en büyük bileşen içerisinde yer aldığı ve bu bileşenin kuruluşların %99.33'ünü kapsadığı görülmüştür. OD 41.13, AY 0.0068 ve OYKK 0.849 olarak hesaplanmıştır. TBP'nin ise yalnızca %4.26 olduğu tespit edilmiştir. En merkezî kuruluşun 103 projeye katılan ve 1,721 farklı kuruluşla bağlantı kuran Fraunhofer olduğu görülmüştür. Fraunhofer'i 69 projeyle CERTH ve 46 projeyle Delft Teknik Üniversitesi izlemiştir. Ülkeler arasındaki en sık ortaklığın 343 projeyle İspanya-İtalya arasında gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Elde edilen ağ göstergeleri birlikte değerlendirildiğinde, dijital ikiz ekosisteminin proje temelli kapalı gruplar içerisinde yüksek derecede kümelendiği görülmüştür. Buna karşılık düşük AY, tüm kuruluşların birbirleriyle doğrudan bağlantı kurmadığını göstermiştir. En büyük bileşenin yüksek payı ağın Avrupa ölçeğinde büyük ölçüde bütünleştiğine, düşük TBP ise iş birliklerinin çoğunlukla proje özelinde kaldığına işaret etmiştir. Dolayısıyla dijital ikiz iş birliği ağının yerel ölçekte sıkı, genel ağ düzeyinde ise seçici bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır.

Ana modele geçmeden önce, çıktı değişkenlerinin sayım verisi özellikleri ve aşırı saçılma durumu incelenmiştir. Yayın sayısının varyans/ortalama oranı 33.72, teknik çıktı sayısının oranı ise 16.79 olarak hesaplanmıştır. NB2 modelindeki aşırı saçılma parametresinin (α) 0.680 olduğu ve Poisson

modeline karşı gerçekleştirilen Olabilirlik Oranı (LR) testinin anlamlı sonuç verdiği belirlenmiştir (Wilks, 1938). Bu nedenle NB2 modelinin veri yapısına daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Modelin yakınsadığı, log olabilirlik değerinin -2,194.85 ve Akaike Bilgi Ölçütünün (AIC) 4,429.70 olduğu görülmüştür. Model katsayıları Olay Hızı Oranı (IRR) ve yüzde 95 güven aralığı (%95 GA) ile raporlanmıştır. Ana model sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Konsorsiyum Yapısının İnovasyon Çıktısıyla İlişkisi

Değişken	IRR	%95 GA	p
KB	0.835	0.701-0.995	0.044
$(KB^c)^2$	1.018	0.862-1.203	0.835
ÜÇ, +0.10	1.139	1.039-1.248	0.005
KTÇ, +0.10	1.034	0.979-1.092	0.228
KOBİP, +0.10	1.047	0.995-1.102	0.075
ÖİY, +0.10	0.843	0.755-0.941	0.002
YKP, +0.10	0.879	0.828-0.934	<0.001
KD	0.962	0.877-1.055	0.410

Tablo 5'teki sonuçlara göre KB'nin doğrusal terimi negatif ve istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (IRR=0.835, p=0.044). Diğer değişkenler sabitken logaritmik KB'deki bir birimlik artışın, finansman başına beklenen çıktı oranını %16.46 azalttığı görülmüştür. Karesel terimin ise anlamlı olmadığı belirlenmiştir (IRR=1.018, p=0.835). Bu nedenle H1a desteklenmemiş ve H1b kapsamında beklenen ters U biçimli ilişkiye yönelik yeterli kanıt elde edilememiştir. Tahmin edilen yanıt eğrisinde, 14 ortaklı referans konsorsiyuma göre göreli çıktı oranının 20 ortak için 0.940'a, 30 ortak için 0.881'e ve 40 ortak için 0.844'e gerilediği tespit edilmiştir.

ÜÇ'deki 0.10 birimlik artışın finansman başına beklenen çıktı oranını %13.85 yükselttiği belirlenmiştir (IRR=1.139, p=0.005). Böylece H2 desteklenmiştir. KTÇ'nin pozitif olan ana etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır (IRR=1.034, p=0.228). KOBİP'in etkisi %10 düzeyinde pozitif olmakla birlikte, %5 anlamlılık sınırının üzerinde kalmıştır (IRR=1.047, p=0.075). Bu yüzden H3 ve H4 toplam İÇ modeli açısından desteklenmemiştir.

ÖİY'deki 0.10 birimlik artışın beklenen çıktı oranını %15.74 azalttığı görülmüştür (IRR=0.843, p=0.002). Bu bulgu, H5'te öngörülen pozitif ilişkiyi

desteklememiştir. YKP'deki 0.10 birimlik artışın da çıktı oranını %12.06 azalttığı belirlenmiştir (IRR=0.879, p<0.001). Böylece H6 beklenen yönün tersine sonuçlanmıştır. İki değişkene ait bulgular birlikte değerlendirildiğinde, yüksek ağ kapanmasının ve yüksek ortak yenilenmesinin tek başına İV'yi artırmadığı anlaşılmıştır. KD'nin ise anlamlı bir sonuç vermediği tespit edilmiş ve H7 desteklenmemiştir (IRR=0.962, p=0.410).

Kontrol değişkenleri incelendiğinde, GS'nin modeldeki en güçlü belirleyici olduğu görülmüştür. ln(1+yıl) değerindeki bir birimlik artışın beklenen çıktı oranını 43.86 kat artırdığı belirlenmiştir (p<0.001). HE projelerinin koşullu çıktı oranının H2020 projelerinin 2.51 katı olduğu tespit edilmiştir (p<0.001). B katmanı projelerinin oranının A katmanına göre %34.35 daha düşük olduğu görülmüştür (p=0.003). Fon türleri bakımından, RIA projelerine göre IA projelerinde daha düşük, Koordinasyon ve Destek Eylemi (CSA) ile Marie Skłodowska-Curie Eylemleri (MSCA) kapsamında daha yüksek çıktı oranları tahmin edilmiştir. Bu sonuçlar, proje yaşı ve fon türü gibi özelliklerin İÇ'nin değerlendirilmesinde dikkate alınması gerektiğini göstermiştir.

Ana modelde elde edilen sonuçların çıktı türlerine göre farklılaşıp farklılaşmadığını belirlemek amacıyla kaliteye duyarlı çıktı, yayın ve teknik çıktı modelleri ayrı ayrı tahmin edilmiştir. Böylece, konsorsiyum yapısının bilimsel ve uygulamalı üretim üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Çıktı Türlerine Göre Temel Değişkenlerin IRR Değerleri

Değişken	Kaliteye Duyarlı	Yayın	Teknik Çıktı
KB	0.832*	1.080	0.747**
ÜÇ	1.144**	1.290***	1.016
KTÇ	1.026	1.081*	1.006
KOBİP	1.053	1.018	1.073*
ÖİY	0.831**	0.836	0.913
YKP	0.871***	0.878**	0.900**
KD	0.977	0.939	1.037
*: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001			

Tablo 6'daki kaliteye duyarlı çıktı modelinde, ana modelin temel sonuçlarının korunduğu görülmüştür. KB'nin negatif, ÜÇ'nin pozitif, ÖİY ile YKP'nin negatif olduğu belirlenmiştir. İlgili değişkenlerin IRR değerleri

sırasıyla 0.832, 1.144, 0.831 ve 0.871 olarak hesaplanmıştır. KOBİP'in ise %5 anlamlılık sınırına yakın bir pozitif ilişki gösterdiği tespit edilmiştir (IRR=1.053, p=0.053). Böylece ana sonuçların yalnızca DOI içermeyen yayın kayıtlarından kaynaklanmadığı anlaşılmıştır.

Yayın modelinde ÜÇ'nin bilimsel üretim açısından daha güçlü bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (IRR=1.290, p<0.001). KTÇ'deki 0.10 birimlik artışın yayın oranını %8.05 yükselttiği belirlenmiştir (IRR=1.081, p<0.050). Bu sonuç H3'e kısmi destek sağlamıştır. YKP'nin bilimsel yayınlarda da negatif sonuç verdiği tespit edilmiştir (IRR=0.878, p=0.008). ÖİY katsayısı negatif olmakla birlikte, %5 düzeyinde anlamlı bulunmamıştır (IRR=0.836, p=0.060).

Teknik çıktı modelinde KB'nin daha belirgin bir negatif ilişki oluşturduğu görülmüştür (IRR=0.747, p=0.002). KOBİP'teki 0.10 birimlik artışın beklenen teknik çıktı oranını %7.27 yükselttiği tespit edilmiştir (IRR=1.073, p=0.022). Böylece H4 uygulamalı çıktı boyutunda desteklenmiştir. YKP'nin teknik çıktı üretiminde de negatif olduğu belirlenmiştir (IRR=0.900, p=0.001). ÜÇ ve KTÇ'nin teknik çıktılar üzerindeki ana etkileri ise anlamlı bulunmamıştır. Dolayısıyla çeşitlilik boyutlarının bilimsel ve uygulamalı çıktı kanallarında farklı sonuçlar meydana getirdiği anlaşılmıştır.

Alternatif çıktı modelleri genel olarak değerlendirildiğinde, toplam çıktı modelinde görünmeyen bazı ilişkilerin bilimsel ve uygulamalı sonuçlar ayrıştırıldığında belirginleştiği görülmüştür. KTÇ'nin bilimsel yayınlarla, KOBİ katılımının ise teknik çıktılarla daha güçlü biçimde ilişkili olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık YKP'nin her iki çıktı türünde de negatif yönde sonuç verdiği anlaşılmıştır. Bu farklılaşma, dijital ikiz projelerindeki İÇ'nin aynı üretim mekanizmasına sahip olmadığını göstermiştir.

ÜÇ ile KTÇ'nin birlikte oluşturduğu etki ayrıca incelenmiştir. İki merkezlenmiş değişkenin etkileşim katsayısı negatif ve anlamlı bulunmuştur (IRR=0.972, p=0.002). ÜÇ'nin ana etkisinin etkileşim modelinde de pozitif kaldığı belirlenmiştir (IRR=1.124, p=0.012). Bu sonuç H8'i desteklemiş ve bir çeşitlilik boyutunun etkisinin diğer çeşitlilik boyutu yükseldikçe zayıfladığını göstermiştir. Dolayısıyla coğrafi ve kurumsal çeşitliliğin aynı anda artmasının çift katmanlı bir koordinasyon yükü meydana getirebildiği anlaşılmıştır.

İV'ye ilişkin bulguların alternatif bir modelle değerlendirilmesi amacıyla, finansman başına çıktının ln(1+x) dönüşümü üzerinden HC3 sağlam standart hatalı OLS modeli tahmin edilmiştir. Modelin belirlilik katsayısı (R^2) 0.646 olarak hesaplanmıştır. ÖİY'nin İV ile negatif ilişkili olduğu belirlenmiştir (β=-0.068, p=0.038). KB'nin %10 düzeyinde negatif sonuç verdiği görülmüştür (β=-0.076, p=0.090). ÜÇ katsayısı pozitif olmakla birlikte anlamlılık sınırını aşmamıştır (β=0.064, p=0.104). Breusch-Pagan testinin değişen varyansa işaret etmesi nedeniyle HC3 kovaryansının kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmıştır (p<0.001).

Ardından, HE projelerinde herhangi bir çıktı bulunma olasılığı lojit model aracılığıyla incelenmiştir. Modelin örneklem içi Eğri Altında Kalan Alan (AUC) değeri 0.977 ve 0.5 eşik değerindeki doğruluğu 0.931 olarak hesaplanmıştır. Konsorsiyum yapısına ilişkin değişkenlerin hiçbirinin çıktı üretip üretmeme olasılığı üzerinde anlamlı sonuç vermediği tespit edilmiştir. GS pozitif, tamamlanma durumu ile B katmanı göstergeleri ise negatif bulunmuştur. Tamamlanma değişkeninin işareti, diğer süre kontrolleri ve CORDIS raporlama zamanlamasıyla birlikte değerlendirilmiştir. Bu sonuç, konsorsiyum yapısının çıktının varlığından daha çok çıktı yoğunluğuyla ilişkili olabileceğini göstermiştir.

Ana örnekleme ek olarak altı alternatif örneklem tanımı kullanılmış ve böylece sonuçların tutarlılığı toplam yedi model üzerinden değerlendirilmiştir. KB'nin bütün modellerde negatif, ÜÇ'nin ise bütün modellerde pozitif yönde olduğu görülmüştür. ÖİY ile YKP'nin yedi modelin tamamında negatif sonuç verdiği tespit edilmiştir. KTÇ ve KOBİP tüm modellerde pozitif olmasına rağmen, toplam çıktı sağlamlık modellerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Değişkenlerin yön ve anlamlılık bakımından gösterdiği tutarlılık Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Sağlamlık Modellerinde Tutarlılık

Değişken	Yön	Anlamlı Model	Medyan IRR
KB	7/7 negatif	5 negatif	0.835
$(KB^c)^2$	4 pozitif, 3 negatif	0	1.018
ÜÇ	7/7 pozitif	5 pozitif	1.115
KTÇ	7/7 pozitif	0	1.031
KOBİP	7/7 pozitif	0	1.026
ÖİY	7/7 negatif	6 negatif	0.862
YKP	7/7 negatif	6 negatif	0.890
KD	2 pozitif, 5 negatif	0	0.985

Tablo 7'deki yedi model, ana örneklem ile alternatif olgunluk, tamamlanma, özgüllük ve genişletilmiş örneklem tanımlarını kapsamaktadır. Buna göre, KB yedi modelin beşinde anlamlı ve negatif, ÜÇ ise beş modelde anlamlı ve pozitif bulunmuştur. ÖİY ile YKP altı modelde anlamlı ve negatif sonuç vermiştir.

Genişletilmiş 1,088 projelik örneklemde KB için IRR=0.847, ÜÇ için IRR=1.062, ÖİY için IRR=0.926 ve YKP için IRR=0.890 değerleri hesaplanmıştır. Böylece ana bulguların uç değerlerden ya da yalnızca bir örneklem tanımından kaynaklanmadığı anlaşılmıştır.

Ek olarak, beş katlı CV kullanılan RF modelinde R^2=0.665 ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) 0.389 olarak belirlenmiştir. En yüksek permütasyon öneminin GS'ye ait olduğu, konsorsiyum değişkenleri içerisinde ise KD, ÜÇ, KB ve KTÇ'nin öne çıktığı görülmüştür.

Erişilen sonuçlar doğrultusunda, araştırma hipotezlerinin kabul edilme durumları elde edilen ampirik sonuçların genel örüntüsü üzerinden sınıflandırılmıştır. Konsorsiyum büyüklüğüne ilişkin doğrusal ve doğrusal olmayan etkiler, farklı çeşitlilik boyutlarının bağımsız ve birlikte oluşturduğu sonuçlar, konsorsiyumdaki KOBİ varlığının farklı çıktı türleri üzerindeki etkisi, geçmiş iş birliklerinin yoğunluğu, yeni katılımcıların konsorsiyum içerisindeki ağırlığı ve koordinatörün önceki proje deneyimi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Böylece hipotezlerin sonuçlandırılmasında yalnızca tekil katsayıların anlamlılığına değil, değişkenlerin farklı modellerde sergilediği genel davranışa ve sonuçların kuramsal beklentilerle ne ölçüde örtüştüğüne de odaklanılmıştır. Hipotezlerin kabul veya ret durumlarına ilişkin toplu değerlendirme Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Sağlamlık Modellerinde Tutarlılık

Hipotez		Kabul Durumu
H1a	Konsorsiyum büyüklüğü dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H1b	Konsorsiyum büyüklüğünün karesi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.	Reddedildi
H2	Konsorsiyumdaki ülke çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Kabul edildi
H3	Konsorsiyumdaki kuruluş türü çeşitliliği dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Kabul edildi*
H4	Konsorsiyumdaki KOBİ payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Kabul edildi**
H5	Önceki iş birliği yoğunluğu dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H6	Konsorsiyumdaki yeni katılımcı payı dijital ikiz projesinin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H7	Koordinatörün önceki dijital ikiz proje deneyimi projenin inovasyon çıktısıyla pozitif ilişkilidir.	Reddedildi
H8	Ülke çeşitliliği ile kuruluş türü çeşitliliğinin etkileşimi inovasyon çıktısıyla negatif ilişkilidir.	Kabul edildi

*: Sadece yayın çıktıları için kabul edildi.
**: Sadece teknik çıktılar için kabul edildi.

Tablo 8'deki sonuçlar, KB'ye ilişkin H1a ve H1b hipotezlerinin desteklenmediğini göstermiştir. ÜÇ'ye ilişkin H2 ile ÜÇ ve KTÇ arasındaki negatif etkileşime ilişkin H8 desteklenmiştir. KTÇ'yi ele alan H3 yalnızca yayınlarda, KOBİP'e ilişkin H4 ise teknik çıktı modelinde kısmen desteklenmiştir. ÖİY, YKP ve KD'ye ilişkin H5, H6 ve H7 hipotezleri desteklenmemiştir. Genel olarak, dijital ikiz konsorsiyumlarında ortak sayısından daha çok ortakların bileşiminin ve farklı çıktı türlerine yaptığı katkının önemli olduğu anlaşılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada, AB tarafından desteklenen dijital ikiz projelerinde konsorsiyum yapısı ile İV arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. CORDIS açık verileri aracılığıyla 58,840 proje taranmış ve 672 çok ortaklı dijital ikiz projesinden oluşan ana örneklem değerlendirilmiştir. İÇ, yayın ve teknik çıktıların toplamı üzerinden, İV ise milyon € AKK başına düşen İÇ sayısıyla ölçülmüştür. Veriler, NB2 modeli, ağ analizi, alternatif çıktı

modelleri, etkileşim modeli, farklı sağlamlık örneklemleri ve RF yaklaşımıyla incelenmiştir.

Araştırmadan elde edilen temel bulgu, daha büyük konsorsiyumların finansman başına daha yüksek İÇ üretmediğini göstermiştir. KB'nin anlamlı ve negatif olduğu, KB'nin karesel teriminin ise ters U biçimli ilişkiyi desteklemediği belirlenmiştir. Bu sonuç, ortak sayısındaki artışla elde edilen kaynak genişliğinin koordinasyon, veri uyumu ve karar alma maliyetleri tarafından sınırlandırılabildiğine işaret etmiştir. Disiplinlerarası araştırmalarda koordinasyon maliyetlerinin proje sonuçlarını zayıflatabildiği daha önce gösterilmiştir (Cummings ve Kiesler, 2007). Dijital ikiz projelerindeki teknik arayüz bağımlılıklarının, ilgili koordinasyon maliyetlerini daha belirgin hâle getirdiği düşünülmüştür.

ÜÇ'nin toplam çıktı ve yayın oranlarını artıran en tutarlı konsorsiyum özelliği olduğu görülmüştür. Farklı ülkelerden ortakların araştırma altyapılarını, pazar bilgilerini ve pilot alanlarını projeye taşıması, elde edilen bilginin farklı koşullarda kullanılabilmesini desteklemiştir. Avrupa araştırma ağlarındaki coğrafi bağlantıların yeni bilgi bileşimlerinin oluşmasına katkı sağladığı daha önce de belirtilmiştir (Balland vd., 2019). Bununla beraber, ÜÇ ile KTÇ arasındaki etkileşim negatif sonuç vermiştir. Bu bulgu, iki farklı heterojenlik boyutunun aynı anda yükselmesi durumunda tamamlayıcılık yararının koordinasyon yükü nedeniyle azalabildiğini göstermiştir.

KTÇ'nin toplam İÇ'yi anlamlı biçimde değiştirmediği, ancak yayınları desteklediği belirlenmiştir. KOBİP'in ise toplam çıktı modelinde sınırlı kaldığı ve teknik çıktı üretiminde pozitif sonuç verdiği görülmüştür. Farklı ortak türlerinin ürün inovasyonunun derecesine katkıda bulunabildiği, önceki araştırmalarda ifade edilmiştir (Nieto ve Santamaría, 2007). Bu çalışmadaki sonuçlar, ilgili katkının inovasyon çıktısının türüne göre farklılaştığını göstermiştir. Üniversite, araştırma merkezi ve firma çeşitliliğinin bilimsel bilgi üretimiyle, KOBİ katılımının ise teknik çıktı üretimiyle daha güçlü biçimde ilişkili olduğu görülmüştür.

ÖİY ile YKP'nin aynı anda negatif sonuç vermesi, araştırmanın dikkat çeken bulgularından biri olmuştur. Yüksek düzeyde tekrarlanan bağların bilgi tekrarına ve ortak seçimin geçmiş ilişkilere bağlı kalmasına neden olabileceği düşünülmüştür. Tekrarlanan ortaklıkların bazı koşullarda performans üzerinde olumsuz sonuç oluşturabildiği daha önce gösterilmiştir (Holloway ve

Parmigiani, 2016). Buna karşılık YKP'nin yükselmesi, ortak dil ile proje rutinlerinin eksikliğini artırabilmektedir. Dolayısıyla tamamen yerleşik ya da tamamen yeni ortaklardan oluşan bir yapı yerine, deneyimli çekirdek ortaklarla seçilmiş yeni katılımcıların birlikte yer aldığı dengeli konsorsiyumların daha uygun olduğu anlaşılmıştır.

KD'nin anlamlı bir sonuç vermediği belirlenmiştir. Bununla beraber, bu bulgunun koordinatör deneyiminin önemsiz olduğu şeklinde yorumlanması uygun olmamıştır. Aksine, kamu destekli konsorsiyumlarda liderliğin etkisinin izleme ve disiplin mekanizmalarıyla birlikte ortaya çıktığı ifade edilmiştir (Nishimura ve Okamuro, 2018). Bu yüzden, koordinatör merkeziliği, çalışma paketi liderliği, bütçe payı ve teknik çıktıların zamanında tamamlanma oranı gibi ayrıntılı göstergelerin kullanılması gerekmektedir.

Erişilen bulgular, dijital ikiz projelerinde ortak sayısının artırılmasından çok, tamamlayıcılık ve koordinasyon kapasitesinin gözetilmesi gerektiğini göstermektedir. Coğrafi ve kurumsal çeşitlilik birlikte yükseldiğinde, veri standartları, arayüz yönetimi ve karar yetkilerinin açık biçimde tanımlanması önem taşımaktadır. Ayrıca, geçmiş iş birliklerine sahip çekirdek ortaklarla yeni katılımcılar arasında dengeli bir yapının kurulması gerekmektedir.

Dolayısıyla, proje değerlendirmelerinin yalnızca ortak sayısına ve ülke kapsamına dayandırılmaması gerekmektedir. Aksine, tamamlayıcı rollerin, geçmiş bağların, yeni katılımcıların entegrasyonunun ve koordinasyon kapasitesinin de dikkate alınması daha doğru olacaktır. İşbirliği ağlarının niteliğinin proje çıktılarıyla birlikte değerlendirilmesi bu süreci destekleyebilecektir (Pisacane ve Tagliacozzo, 2023).

CORDIS kayıtlarının raporlama davranışlarına bağlı olması, yeni projelerde çıktı gecikmesi bulunması ve karşılaştırılabilir patent verilerinin kullanılamaması, çalışmanın sınırlılıkları arasında yer almaktadır. Gelecek araştırmalarda CORDIS verileri ile Avrupa Patent Ofisi gibi çeşitli veri tabanlarındaki veriler birleştirilebilir. Yıllık çıktılar ile ağ merkeziliği, yapısal boşluklar ve teknolojik uzaklık gibi göstergeler incelenebilir.

Kaynaklar

Ahuja, G. (2000). Collaboration networks, structural holes, and innovation: A longitudinal study. *Administrative Science Quarterly*, *45*(3), 425-455. DOI: 10.2307/2667105.

Balland, P.-A., Boschma, R. ve Ravet, J. (2019). Network dynamics in collaborative research in the EU, 2003-2017. *European Planning Studies*, *27*(9), 1811-1837. DOI: 10.1080/09654313.2019.1641187.

Barber, M. J., Krueger, A., Krueger, T. ve Roediger-Schluga, T. (2006). Network of European Union-funded collaborative research and development projects. *Physical Review E*, *73*(3), 036132. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.036132.

Barricelli, B. R., Casiraghi, E. ve Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, *7*, 167653-167671. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.

Benjamini, Y. ve Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 57*(1), 289-300. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x.

Bockelmann, T., Werder, K., Recker, J., Lehmann, J. ve Bendig, D. (2024). Configuring alliance portfolios for digital innovation. *The Journal of Strategic Information Systems*, *33*(1), 101808. DOI: 10.1016/j.jsis.2023.101808.

Branstetter, L. G. ve Sakakibara, M. (2002). When do research consortia work well and why? Evidence from Japanese panel data. *American Economic Review*, *92*(1), 143-159. DOI: 10.1257/000282802760015649.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

Breschi, S. ve Cusmano, L. (2004). Unveiling the texture of a European Research Area: Emergence of oligarchic networks under EU Framework Programmes. *International Journal of Technology Management*, *27*(8), 747-772. DOI: 10.1504/IJTM.2004.004992.

Caloffi, A., Mariani, M., Mattei, A. ve Mealli, F. (2020). What kinds of R&D consortia enhance SMEs productivity? A hierarchical Bayesian approach for the analysis of a regional innovation policy. *Papers in Regional Science*, *99*(1), 25-54. DOI: 10.1111/pirs.12476.

Cameron, A. C. ve Trivedi, P. K. (1986). Econometric models based on count data: Comparisons and applications of some estimators and tests. *Journal of Applied Econometrics, 1*(1), 29-53. DOI: 10.1002/jae.3950010104.

Capaldo, A. (2007). Network structure and innovation: The leveraging of a dual network as a distinctive relational capability. *Strategic Management Journal*, *28*(6), 585-608. DOI: 10.1002/smj.621.

Cohen, W. M. ve Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, *35*(1), 128-152. DOI: 10.2307/2393553.

Cummings, J. N. ve Kiesler, S. (2005). Collaborative research across disciplinary and organizational boundaries. *Social Studies of Science*, *35*(5), 703-722. DOI: 10.1177/0306312705055535.

Cummings, J. N. ve Kiesler, S. (2007). Coordination costs and project outcomes in multi-university collaborations. *Research Policy*, *36*(10), 1620-1634. DOI: 10.1016/j.respol.2007.09.001.

Dahlander, L. ve Gann, D. M. (2010). How open is innovation? Research Policy, 39(6), 699-709. DOI: 10.1016/j.respol.2010.01.013.

De Noni, I., Orsi, L. ve Belussi, F. (2018). The role of collaborative networks in supporting the innovation performances of lagging-behind European regions. *Research Policy*, *47*(1), 1-13. DOI: 10.1016/j.respol.2017.09.006.

European Commission. (2026a). CORDIS Horizon 2020 projects [Veri Seti]. Publications Office of the European Union. DOI: 10.2906/112117098108/12.

European Commission. (2026b). CORDIS EU research projects under Horizon Europe 2021-2027 [Veri Seti]. Publications Office of the European Union. DOI: 10.2906/112117098108/20.

Faems, D., Van Looy, B. ve Debackere, K. (2005). Interorganizational collaboration and innovation: Toward a portfolio approach. *Journal of Product Innovation Management*, *22*(3), 238-250. DOI: 10.1111/j.0737-6782.2005.00120.x.

Fuller, A., Fan, Z., Day, C. ve Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, *8*, 108952-108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

Gilsing, V., Nooteboom, B., Vanhaverbeke, W., Duysters, G. ve van den Oord, A. (2008). Network embeddedness and the exploration of novel technologies: Technological distance, betweenness centrality and density. *Research Policy*, *37*(10), 1717-1731. DOI: 10.1016/j.respol.2008.08.010.

Hagedoorn, J., Lokshin, B. ve Zobel, A.-K. (2018). Partner type diversity in alliance portfolios: Multiple dimensions, boundary conditions and firm innovation performance. *Journal of Management Studies*, *55*(5), 809-836. DOI: 10.1111/joms.12326.

Hoang, H. ve Rothaermel, F. T. (2005). The effect of general and partner-specific alliance experience on joint R&D project performance. *Academy of Management Journal*, *48*(2), 332-345. DOI: 10.5465/amj.2005.16928417.

Holloway, S. S. ve Parmigiani, A. (2016). Friends and profits don't mix: The performance implications of repeated partnerships. *Academy of Management Journal*, *59*(2), 460-478. DOI: 10.5465/amj.2013.0581.

Holopainen, M., Saunila, M., Rantala, T. ve Ukko, J. (2024). Digital twins' implications for innovation. *Technology Analysis & Strategic Management*, *36*(8), 1779-1791. DOI: 10.1080/09537325.2022.2115881.

Hosmer, D. W., Jr., Lemeshow, S. ve Sturdivant, R. X. (2013). Applied logistic regression (3. Baskı). John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781118548387.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. ve Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *29*, 36-52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

Katila, R. ve Ahuja, G. (2002). Something old, something new: A longitudinal study of search behavior and new product introduction. *Academy of Management Journal*, *45*(6), 1183-1194. DOI: 10.5465/3069433.

Kok, H., Faems, D. ve de Faria, P. (2020). Ties that matter: The impact of alliance partner knowledge recombination novelty on knowledge utilization in R&D alliances. *Research Policy*, *49*(7), 104011. DOI: 10.1016/j.respol.2020.104011.

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

Lattanzi, L., Raffaeli, R., Peruzzini, M. ve Pellicciari, M. (2021). Digital twin for smart manufacturing: A review of concepts towards a practical industrial implementation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *34*(6), 567-597. DOI: 10.1080/0951192X.2021.1911003.

Laursen, K. ve Salter, A. (2006). Open for innovation: The role of openness in explaining innovation performance among U.K. manufacturing firms. *Strategic Management Journal*, *27*(2), 131-150. DOI: 10.1002/smj.507.

Lechevalier, S., Ikeda, Y. ve Nishimura, J. (2010). The effect of participation in government consortia on the R&D productivity of firms: A case study of robot technology in Japan. *Economics of Innovation and New Technology*, *19*(8), 669-692. DOI: 10.1080/10438590902872903.

Lungeanu, A. ve Contractor, N. S. (2015). The effects of diversity and network ties on innovations: The emergence of a new scientific field. *American Behavioral Scientist*, *59*(5), 548-564. DOI: 10.1177/0002764214556804.

MacKinnon, J. G. ve White, H. (1985). Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics, 29*(3), 305-325. DOI: 10.1016/0304-4076(85)90158-7.

Mann, H. B. ve Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics, 18*(1), 50-60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

Negri, E., Fumagalli, L. ve Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, *11*, 939-948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.

Nieto, M. J. ve Santamaría, L. (2007). The importance of diverse collaborative networks for the novelty of product innovation. *Technovation*, *27*(6-7), 367-377. DOI: 10.1016/j.technovation.2006.10.001.

Nishimura, J. ve Okamuro, H. (2018). Internal and external discipline: The effect of project leadership and government monitoring on the performance of publicly funded R&D consortia. *Research Policy*, *47*(5), 840-853. DOI: 10.1016/j.respol.2018.02.007.

Nooteboom, B., Van Haverbeke, W., Duysters, G., Gilsing, V. ve van den Oord, A. (2007). Optimal cognitive distance and absorptive capacity. *Research Policy*, *36*(7), 1016-1034. DOI: 10.1016/j.respol.2007.04.003.

O'Brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity, 41*(5), 673-690. DOI: 10.1007/s11135-006-9018-6.

Oerlemans, L. A. G., Knoben, J. ve Pretorius, M. W. (2013). Alliance portfolio diversity, radical and incremental innovation: The moderating role of technology management. *Technovation*, *33*(6-7), 234-246. DOI: 10.1016/j.technovation.2013.02.004.

Phelps, C. C. (2010). A longitudinal study of the influence of alliance network structure and composition on firm exploratory innovation. *Academy of Management Journal*, *53*(4), 890-913. DOI: 10.5465/amj.2010.52814627.

Pisacane, L. ve Tagliacozzo, S. (2023). A relations-based evaluation framework to support collaborative research and innovation (R&I) networks. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, *36*(4), 800-821. DOI: 10.1080/13511610.2023.2191827.

Powell, W. W., Koput, K. W. ve Smith-Doerr, L. (1996). Interorganizational collaboration and the locus of innovation: Networks of learning in biotechnology. *Administrative Science Quarterly*, *41*(1), 116-145. DOI: 10.2307/2393988.

Protogerou, A., Caloghirou, Y. ve Siokas, E. (2010). Policy-driven collaborative research networks in Europe. *Economics of Innovation and New Technology*, *19*(4), 349-372. DOI: 10.1080/10438590902833665.

Qi, Q. ve Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, *6*, 3585-3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.

Rasheed, A., San, O. ve Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, *8*, 21980-22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.

Rost, K. (2011). The strength of strong ties in the creation of innovation. *Research Policy*, *40*(4), 588-604. DOI: 10.1016/j.respol.2010.12.001.

Sampson, R. C. (2007). R&D alliances and firm performance: The impact of technological diversity and alliance organization on innovation. *Academy of Management Journal*, *50*(2), 364-386. DOI: 10.5465/amj.2007.24634443.

Schilling, M. A. ve Phelps, C. C. (2007). Interfirm collaboration networks: The impact of large-scale network structure on firm innovation. *Management Science*, *53*(7), 1113-1126. DOI: 10.1287/mnsc.1060.0624.

Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. ve Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, *130*, 103469. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103469.

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal, 27*(3), 379-423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology, 15*(1), 72-101. DOI: 10.2307/1412159.

Stone, M. (1974). Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 36*(2), 111-133. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. ve Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *94*(9-12), 3563-3576. DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.

Tao, F., Qi, Q., Wang, L. ve Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, *5*(4), 653-661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.

Tóth, G., Juhász, S., Elekes, Z. ve Lengyel, B. (2021). Repeated collaboration of inventors across European regions. *European Planning Studies*, *29*(12), 2252-2272. DOI: 10.1080/09654313.2021.1914555.

Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C. ve Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, *61*, 335-340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.

Welch, B. L. (1947). The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika, 34*(1-2), 28-35. DOI: 10.1093/biomet/34.1-2.28.

Wilks, S. S. (1938). The large-sample distribution of the likelihood ratio for testing composite hypotheses. *The Annals of Mathematical Statistics, 9*(1), 60-62. DOI: 10.1214/aoms/1177732360.

Yoon, W., Lee, D. Y. ve Song, J. (2015). Alliance network size, partner diversity, and knowledge creation in small biotech firms. *Journal of Management & Organization*, *21*(5), 614-626. DOI: 10.1017/jmo.2015.16.