

İstatistiksel Arbitraj Stratejileri ve Varlık Fiyatlamaya Etkileri

Mehmet Mazak¹

Özet

Bu bölüm, modern finans teorisinin temel taşlarından biri olan arbitraj kavramından yola çıkarak, istatistiksel arbitraj stratejilerini kavramsal temelleriyle ele almakta ve söz konusu stratejilerin varlık fiyatlama dinamikleri açısından ne anlam ifade ettiğini incelemektedir. Fiyatların kısa vadede ortalamaya döndüğü varsayımına dayanan ve büyük ölçüde pazar-nötr portföyler üzerinden kurgulanan bu mekanizma, geleneksel risksiz arbitraj tanımından ayrılarak riski çok sayıda pozisyona dağıtan bir yapıya bürünmektedir.

Çalışma kapsamında başlıca strateji türleri olarak ikili işlem (pairs trading), kesitsel ivme (momentum), temel göstergelere dayalı değer ve aykırı (value/contrarian) yatırımlar, volatilité arbitrajı ve çoklu faktör modellerine dayalı arbitraj stratejileri kapsamlı bir literatür çerçevesinde tartışılmaktadır. Stratejilerin ampirik metodolojileri incelenirken; literatürün tarihsel gelişimini yansıtan mesafe yaklaşımı, varlıklar arasındaki uzun dönemli dengeyi hedefleyen eşbütünleşme testleri ve yayılım (spread) dinamiklerini doğrudan modelleyen stokastik kontrol yaklaşımları ile boyut ve karmaşıklığı ele alan makine öğrenmesi modelleri detaylandırılmaktadır.

Bölüm ayrıca, istatistiksel arbitrajın salt bir getiri arayışının ötesinde, piyasa etkinliği üzerindeki birikimli etkisini varlık fiyatlama perspektifiyle analiz etmektedir. Akademik araştırmalar sonrasında şeffaflaşan anomalilerin, arbitraj sermayesinin devreye girmesiyle birlikte sistematik bir erime sürecine girdiği ve istatistiksel arbitraj faaliyetlerinin fiyat keşif sürecini hızlandırdığı vurgulanmaktadır. Ancak bu süreç, piyasaların kusursuz bir etkinliğe ulaştığı anlamına gelmez. Bu aşamada, arbitrajın sınırları kuramı merkeze alınarak; işlem maliyetleri, fonlama likiditesi kısıtları ve modelleme risklerinin arbitraj mekanizmasını nasıl kısıtladığı tartışılmaktadır.

1 Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Finans ve Bankacılık Bölümü

Elde edilen bulgular, piyasa etkinliğini var eden temel kuvvetlerden biri olan istatistiksel arbitrajın, sömürdüğü anomalileri ortadan kaldırarak kendi getiri marjını daralttığını göstermektedir. Sonuç olarak bölüm, stratejilerin teorik getiri potansiyeli ile gerçek dünyadaki piyasa sürtünmeleri arasındaki yapısal farklılıklara dair araştırmacı ve uygulayıcılar için rasyonel çıkarımlar sunmaktadır.

1. Giriş: İstatistiksel Arbitraj ve Varlık Fiyatlama İlişkisi

Finans alanında arbitraj; eş zamanlı olarak aynı varlığın farklı fiyat seviyelerinden farklı marketlerde alınıp satılması olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda arbitraj işlemi teorik olarak riskten muaftır. Arbitrajcı ilgili varlığı düşük fiyatlayan piyasadan alıp yüksek fiyatlayan piyasada satarak risksiz getiri elde eder. Piyasa verimliliği üzerinden düşünüldüğünde arbitraj kritik bir öneme sahiptir. Çünkü bu durum varlıkların temel değerlerine dönmeye ve bu sayede piyasa etkinliğini sağlamaya yardımcı olur (Shleifer ve Vishny, 1997).

Piyasaların gerçek işleyişine bakıldığında teorik modellerde yer alan etkin piyasaların her durumda geçerli olmadığı görülmektedir. Varlıkların; sadece kendi değerlerinin farklı piyasalarda farklı fiyatlanması değil aynı zamanda varlıkların kendi aralarında da fiyat sapmalarının gözlemlenmesi arbitraj kavramının evrilmesine neden olmuştur. Varlıklar arası bu etkileşim nedeniyle fiyatlarda sapma meydana gelmesi istatistiksel arbitraj kavramına zemin hazırlamıştır. Bu bağlamda istatistiksel arbitraj; fiyatların kısa vadede ortalamaya döndüğü varsayımıyla istatistiksel kurallara ve sistematige dayanarak alım-satım yapılacak varlıklar arasında pazar riskini sıfırlayacak şekilde ticaret kurallarının geliştirilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Avellaneda ve Lee, 2010).

Varlık fiyatlama literatürü açısından istatistiksel arbitraj kritik bir öneme sahiptir. Arbitraj mekanizması yanlış fiyatlanan bu menkul kıymetleri temel değerlerine döndürme açısından fiyat keşif süreçlerine katkıda bulunur. McLean ve Pontiff (2016) tarafından yapılan çalışmaya göre piyasa anomalilerinin akademik yayın sonrası %32 oranında kaybolması arbitraj mekanizmasının çalışarak yanlış fiyatlama sürecine müdahale ettiğini doğrular niteliktedir. Varlık fiyatlama açısından bir başka önemli konu ise arbitrajın sınırları kavramıdır. Bu kavram neticesinde arbitrajcıların takıldıkları sınırları anlamak ve keşfetmek bir menkul varlığın neden ve ne kadar süre ile temel değerlerinden sapabileceğini anlamamıza önemli katkılarda bulunur.

2. İstatistiksel Arbitrajın Kavramsal Temelleri

ABD kökenli yatırım bankası Morgan Stanley analistlerinin geliştirmiş oldukları teknikler ile finansal piyasalarda yer edinen istatistiksel arbitraj

kavramı 80'li yıllardan itibaren hayatımıza girmiştir (Pole, 2007). İstatistiksel arbitraj; en temelde finans piyasalarındaki ikili işlem (pairs trading) stratejisine dayanmaktadır (Avellaneda ve Lee, 2010). Ele alınan iki finansal ürün arasındaki yayılımın (spread) istatistiksel olarak anlamlı salınım davranışlarının araştırılmasına ikili işlem stratejileri denir. İkili işlem stratejileri; menkul kıymetler arasındaki marjın (spread) açıldığı/genişlediği durumlarda pahalı olan menkul kıymetin açığa satılıp ucuz kalan menkul kıymette uzun pozisyon alınması; marjın daraldığı durumda ise bu işlemin tam tersinin yapılarak kazanç elde edilmeye çalışılması olarak adlandırılır (Derman, 2004).

İstatistiksel arbitraj yaklaşımları: temel seviyede vanilya opsiyonlarındaki ikili işlem stratejilerinden; dinamik, doğrusal olmayan, fraktallar, dalgacıklar ve sinir ağları gibi karmaşık tekniklerin kullanıldığı modellere kadar uzanmaktadır. Modellerde varlıklar arasındaki örüntüyü yakalayabilmek amacıyla parçacık fiziği, akışkanlar mekaniği, olasılık teorisi, istatistik bilimi ve mühendislik bakış açısının teorik ve deneysel altyapıları kullanılmış ve test edilmiştir. Yaşanan bilimsel gelişmeler, ikili işlem stratejileri teriminin zamanla yerini istatistiksel arbitraj terimine bırakmasına yol açmıştır (Pole, 2007). İstatistiksel arbitraj yaklaşımları; çeşitli stratejileri ve yatırım programlarını kapsamaktadır. İstatistiksel arbitraj stratejilerinin ortak özelliklerine aşağıda verilmiştir (Avellaneda ve Lee, 2010):

- Alım-satım sinyalleri; temel prensipler tarafından türetilmekten ziyade, sistematik ve kurallara dayalıdır.
- Alım-satım işlemleri; sıfır beta portföylerden oluşup pazar nötr stratejilerdir.
- İşlemlerde; benchmark üstü getiri elde etmenin mekanizması istatistiksel yöntemlerdir.

İstatistiksel arbitraj stratejilerinde amaç; benchmark üstü getiri sağlaması planlanan birçok pozisyon açmak, böylece portföylerde çeşitlendirme yapmış olmak ve pazar ile sıfır korelasyona ve düşük oynaklık seviyesine sahip yatırım stratejisi üretmektir. İşlem süreleri birkaç saniyeden oluşabileceği gibi daha uzun süreli açık pozisyonlar da olabilmektedir (Avellaneda ve Lee, 2010).

İstatistiksel arbitrajın teorik zeminini anlamak için ortalamaya dönüş (mean reversion) kavramı ve Ornstein-Uhlenbeck süreci merkezi bir role sahiptir. İkili işlem stratejilerindeki temel mantık ortalamaya dönüş prensibine dayanmaktadır. Varlık fiyatlama sürecinin ortalamaya dönüş prensibine göre modellenmesi sonucu aşağıdaki denkleme ulaşılır (Lehoczky ve Schervish, 2018):

$$dS_t = \alpha(S^- - S_t) dt + \sigma(S_t) dW_t$$

Modelde S terimi uzun vadeli ortalama varlık fiyatıdır. $\sigma(S_t)$ terimi ise; varlığın oynaklık seviyesini göstermektedir. α terimi ise; ortalama seviyeye dönme hızı olarak tanımlanır. $\alpha > 0$ ve W_t standart Brownian harekettir. Bu model ortalamaya dönen Ornstein-Uhlenbeck sürecini temsil etmektedir. Modele göre; süreç er ya da geç ortalama seviyesine geri dönecektir (Önalan, 2009).

Her zaman varlık fiyatlarının bu şekilde ortalamaya dönüş prensibine göre davranması ya da durağan olması beklenemez. Fakat ikili işlem stratejilerine göre işlem yapan bir tüccar (trader), varlıklar arasındaki fiyat farkı veya ağırlıklandırılmış doğrusal kombinasyonu hesaba katarak; işlem açabilmek için ortalamaya geri dönme sürecini izleyen bir çift varlık arayışına girer. İkili işlem stratejileri; kârlılığı piyasanın yönüne bağlı olmayan, pazar nötr stratejisinin bir örneği olarak gösterilir (Lehoczky ve Schervish, 2018).

3. Başlıca İstatistiksel Arbitraj Stratejileri

Bu kısımda başlıca istatistiksel arbitraj stratejilerinden bahsedilmiştir. İkili işlem stratejileri, momentum, değer ve karşıt yatırım stratejileri, volatilité alım-satımı, mevsimsel alım-satım ve yüksek frekanslı işlemler başlıca yatırım stratejileri arasında sayılabilir (Lehoczky ve Schervish, 2018; Chan, 2021).

3.1. İkili İşlem Stratejileri (Pairs Trading)

İki finansal varlıktan oluşturulan bir portföyde, varlıkların beta katsayılarından yola çıkarak hesaplanan bir oran ile bir varlıkta uzun bir varlıkta kısa pozisyon alınmasına ikili işlem stratejileri denir (Vidyamurthy, 2004; Elliott vd., 2005). İkili işlem stratejilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için pazar-nötr stratejilerine odaklanmak gerekir. Pazar-nötr stratejiler; piyasa getirisine karşı duyarlı olmayan, stratejiden elde edilecek getirinin piyasa getirisiyle ilişkisinin olmadığı stratejilerdir. Finansal varlıkları fiyatlama modeli (CAPM) temelinde; pazar-nötr stratejiler betası sıfır olan portföyler olarak tanımlanabilmektedir (Vidyamurthy, 2004). İkili işlem stratejileri de en temelde pazar-nötr stratejiler olarak tanımlanmaktadır. Pazar-nötr stratejilerden oluşturulan bir portföy aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Vidyamurthy, 2004):

$$r^A = \beta^A r_m + \theta^A$$

$$r^B = \beta^B r_m + \theta^B$$

Pozitif beta değerlerine sahip A ve B portföylerinin getirileri yukarıdaki gibi gösterilebilmektedir. r^A ve r^B portföy getirilerini, β^A ve β^B portföylerin beta katsayısını, r_m endeks getirisini ve θ^A ve θ^B portföylerin hata terimlerini göstermektedir. Oluşturulan AB portföyünün betası ($-\beta^A + \beta^B$) olarak

hesaplanır. Bu betayı sıfıra eşitleyecek r değeri ise $\beta B/\beta A$ 'dır. Seçilecek bu r değeri ile pazar-nötr bir strateji oluşturulmuş olur. CAPM teorisi çerçevesinde hata terimlerinin getiri ortalamasının sıfıra yakınsaması beklenir. Bu noktada hata terimi zaman serisi davranışlarının ortalamaya dönmesini beklemek makul bir davranıştır (Vidyamurthy, 2004). Bu işlemlerin başarısını belirleyen temel unsur, iki menkul kıymet arasındaki denge noktasının ve pozisyon almak için denge noktasından uzaklaşılan doğru zamanın belirlenmesidir (Blazquez vd., 2018).

Strateji, belirli oranlarda kısa ve uzun pozisyon olarak oluşturulan 2 varlıklı bir portföyün yayılımla ilişkilendirilmesine dayanır. Varlıklar arasındaki yayılım; varlıkların kote edilmiş fiyatları kullanılarak hesaplanır ve bir zaman serisi oluşturur. İkili işlem stratejileri, yayılımın ortalama değerinden önemli ölçüde uzak olduğu durumlarda yayılımın ortalamaya geri döneceği beklentisiyle pozisyon açmayı içerir. Yayılımın ortalamaya yakınsaması üzerine pozisyonlar tersine çevrilerek kapatılır ve işlem sonlanır (Vidyamurthy, 2004).

Yaygın görüş, ikili işlem stratejilerinin istatistiksel arbitraj stratejilerinin atası olduğu yönündedir (Avellaneda ve Lee, 2010). İlerleyen süreçte istatistiksel arbitraj stratejileri; ortalamaya dönen, ivme gösteren, rejim değiştiren, mevsimsel özellikler gösteren veya yüksek frekanslı seyreden işlemler başta olmak üzere birçok farklı stratejiyi kapsar hale gelmiştir (Chan, 2021). Fakat istatistiksel arbitraj stratejileri içerisinde; ikili işlem stratejilerine dayanan istatistiksel arbitraj stratejileri, en temel yaklaşımlardan biri olarak kabul görmüştür (Tokat ve Hayrullahoğlu, 2022).

3.2. İvme Gösteren Stratejiler (Momentum Strategies)

Akademik çalışmalar, hisse senedi fiyat hareketlerinin ortalamada rassal yürüyüşe uygun olduğunu göstermiştir. Fakat bu durum belirli özel koşullar altında varlıkların; bir dereceye kadar ortalamaya dönüş prensibini veya ivme davranışını sergilemeyeceği anlamına gelmemektedir. Ayrıca tüccarın ilgilendiği zaman aralığına bağlı olarak hisse senedi fiyatları hem ortalamaya dönen hem de ivme gösteren davranışları sergileyebilmektedir. Bir ticaret stratejisi oluşturmak temelde; belirli koşullar altında ve zaman aralığında hisse senedi fiyatların ortalamaya dönüş mü yoksa ivme mi göstereceğinin belirlenmesi ve herhangi bir zaman anında ilk referans fiyatının ne olabileceğinin tahmin edilmesi süreçlerinden oluşmaktadır (Chan, 2021).

Finans piyasalarında 'düşükten al, yüksekten sat' terimi oldukça yaygındır. İvme gösteren stratejiler ise 'yüksekten al, daha yüksekten sat' sürecini takip etmektedir. Bir şirketin hisse senedi fiyatını aniden yükselmesini sağlayacak, şirket için olumlu haber akışı gibi bir dışsal şok yaşanabilir. Momentum gösteren

stratejiler bu gibi durumlarda hisse senedi fiyat sürecinin ivme sergileyeceği ve daha da yükseleceği fikrine dayanmaktadır (Jacobs ve Levy, 2005).

Araştırmacılar; zaman zaman varlık fiyatlarındaki ivme hareketlerini, zaman serilerinde ve yatay kesitlerde ivme hareketleri olarak 2 grup altında sınıflandırabilmektedir. Zaman serilerinde ivme hareketi, oldukça sezgisel ve basittir. Bir fiyat serisinin geçmişteki getirileri, gelecekteki getirilerle pozitif korelasyon içindedir. Yatay kesitlerde ivme ise, bir fiyat serisinin diğer fiyat serilerine göre göreceli performansını ifade eder. Geçmişte diğer fiyat serilerinden daha iyi getiri sağlayan bir fiyat serisi, muhtemelen gelecekte de aynı performansı göstermeye devam edecektir veya bunun tersi de geçerlidir (Chan, 2013).

İvme gösteren stratejiler; geçmişte iyi performans gösteren varlıkların gelecekte daha iyi performans göstereceği fikrini temel almaktadır (Zhang vd., 2022). Jegadeesh ve Titman (1993) yapmış oldukları çalışmada; geçmişte iyi performans gösteren hisse senetlerini satın alan ve geçmişte kötü performans gösteren hisse senetlerini satan stratejilerin, 3 ila 12 aylık elde tutma süreleri boyunca önemli pozitif getiriler sağladığını belgelemektedir. Bu çalışmaya ek olarak; Moskowitz ve Grinblatt (1999), Jegadeesh ve Titman (2001), George ve Hwang (2004) yapmış oldukları araştırmalarda hisse senedi piyasalarındaki ivme (momentum) hareketini destekleyici sonuçlara ulaşmışlardır.

3.3. Değer ve Aykırı Stratejiler (Value and Contrarian Strategies)

Değer ve aykırı stratejiler temel analiz yöntemine dayanmaktadır. Bir hissenin içsel değeri, fiyat/kazanç oranı veya piyasa değeri / defter değeri gibi piyasa değerini gösteren indikatörler ile karşılaştırılır. Piyasaya göre; piyasa değeri / defter değeri oranı düşük olan hisselerin değeri, düşük değerlendirilmiş olarak kabul edilir ve satın alınmaya adaylardır. Piyasaya göre; piyasa değeri / defter değeri oranı yüksek olan hisselerin değeri ise aşırı değerli olarak nitelendirilir ve değer odaklı stratejiye göre açığa satış için uygun senetlerdir. Bu stratejinin aykırı strateji olarak da adlandırılmasının nedeni; hisse değeri göreceli olarak düşük değerlendirilen hisselerde uzun pozisyon açmayı önerirken; gözde (favori) olan görece yüksek değerlendirilerek prim yapmış hisse senetlerinde açığa satış önermesidir (Jacobs ve Levy, 2005).

Lakonishok vd. (1994) yapmış oldukları çalışmada; değer ve aykırı stratejiler, ampirik olarak test edilmiştir. Araştırmacılar, geçmişte yüksek getiri performansı sunan hisse senetlerini gösteriş grubu, geçmiş dönemde yüksek getiri performansı sunamayan hisse senetlerini ise değer grubu olmak üzere iki ana sınıfa ayırmışlardır. Bu ayırım yapılırken temel analiz yönteminin sayısal metriklerinden yararlanılmış ve finansal performans rasyoları kullanılmıştır.

Araştırmada değer grubu hisselerinde uzun pozisyon, gösteriş grubu hisselerinde ise kısa pozisyon açılmış ve bu stratejinin; piyasa getirilerinin üzerinde getirilere yol açtığı gösterilmiştir. Fama ve French'in (1992) değer grubu hisselerinin; temel göstergeler (finansal rasyolar) açısından daha riskli bulunduğu ve beklenen getirinin bu yüzden arttığı önermesine karşılık Lakonishok vd. (1994) çalışmalarında değer grubu hisselerini temel alan stratejinin fazladan getiriye sahip olmasının; gösteriş grubu hisselerinden daha riskli olması ile ilişkili olduğu bir sonuca ulaşamamışlardır.

3.4. Volatiliteye Dayalı Arbitraj Stratejileri

Volatiliteye dayalı arbitraj stratejileri, geniş anlamda ilgili varlıklar arasındaki volatilitelere farkına dayalı ticaret stratejileri olarak tanımlanabilmektedir. Aynı dayanak varlığa sahip iki farklı opsiyonun zımni volatilitelere farkı bu duruma örnek gösterilebilir. Bununla birlikte, terim en yaygın olarak bir varlığın gelecekteki tahmin edilen oynaklığı ile o varlığa dayalı opsiyonların zımni oynaklığı arasındaki farktan yararlanan stratejileri tanımlamak için kullanılır. Bu strateji genellikle bir opsiyon ve onun dayanak varlığından oluşan delta-nötr bir portföy aracılığıyla uygulanır. Böyle bir portföyün getirisi, dayanak varlığın gelecekteki getirilerine değil, gelecekteki fiyat hareketlerinin değişkenliğine bağlı olacaktır. Bir opsiyonun satın alınması fakat dayanak varlığın satılması, volatilitelere uzun pozisyon almaktır. Bir opsiyonun satılması fakat dayanak varlığın satın alınması ise volatilitelere kısa pozisyon almaktır. Uzun volatilitelere pozisyonu; dayanak varlığın gerçekleşen volatilitelerinin tam işlem anında opsiyonun zımni volatilitelerinden daha yüksek olduğu sürece karlıdır (Loggie, 2008).

Finans literatüründe türev piyasalardaki arbitraj ilişkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Ackert ve Tian, 1998; Ammann ve Herriger, 2002; Mayordomo vd., 2014). Fakat türev piyasalarda istatistiksel arbitraj uygulamalarının piyasa etkinliğine etkisini araştıran ilk çalışma Ammann ve Herriger (2002) tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada; iki endeksin yüksek seviyede birbirleriyle korelasyonun bulunması, bu endekslerin volatilitelere seviyeleri arasındaki ilişkinin hesaplanabilir kılındığı düşüncesi temel alınmaktadır. Eğer zımni oynaklıklar arasındaki ilişki, iki endeksin gerçekleşen oynaklığı arasında gözlemlenen ilişkiden önemli ölçüde farklıysa, opsiyon fiyatları yanlış değerlendirilmiştir ve etkin piyasalarda bu durum oluşmamalıdır. Böyle bir durumda, göreceli zımni oynaklık sapmasından yararlanmak için istatistiksel arbitraj stratejisi uygulanabilmektedir (Ammann ve Herriger, 2002).

3.5. Faktör Modellerine Dayalı Arbitraj Stratejileri

Faktör modellerindeki temel amaç, hisse senedi getirilerini etkileyen bir veya birden fazla piyasa faktörünü parçalara ayırabilmektir. Bu şekilde

hissenin getirisi; piyasadaki diğer hisselerle ortak olan temel faktörler ve hisseye özgü getiri şeklinde parçalara ayrılarak açıklanmış olur (Pole, 2007). Bu alanda, literatürdeki en önemli çalışmalardan biri Fama ve French (1993) tarafından yapılmıştır. Bu makalede, hisse senedi ve tahvil getirilerindeki beş ortak risk faktörü tanımlanmıştır. Finansal varlık fiyatlama modeline ek olarak piyasa değeri faktörü ve defter değeri/piyasa değeri faktörü hisse senedi piyasalarındaki getirileri açıklamak için kullanılmıştır. Tahvil piyasalarındaki getirileri açıklamak içinse vade ve temerrüt risklerine ilişkin iki faktör çalışmada incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda Fama ve French 3 faktörlü modelin, hisse senedi piyasasındaki ortalama getirileri açıklamada güçlü olduğu görülmüştür.

Faktör analizi; çok değişkenli bir veri seti üzerinde uygulandığında, verilerin m sayıda faktör tarafından regresyonla açıklandığı istatistiksel modellerdir (Pole, 2007). İstatistiksel arbitraj stratejilerinde, hisse senedi evreninde stratejinin uygulanacağı uygun hisse senetlerini bulmak başlıca araştırma konularından biridir. Faktör modellerine dayalı arbitraj stratejileri; tanımlanan faktörlerden herhangi birinde ortaya çıkan yanlış fiyatlamaların tespit edilmesini ve bu yanlış fiyatlamadan sistematik biçimde yararlanılmasını amaçlar. Bu bağlamda söz konusu stratejiler, istatistiksel arbitraj literatürü ile varlık fiyatlama teorisi arasında kritik bir köprü işlevi görmektedir.

4. Literatür Taraması: Yaklaşımlar ve Bulgular

İstatistiksel arbitraj stratejilerine ilişkin finans literatürü 1990'lı yıllardan sonra derinlik kazanmaya başlamıştır. Krauss (2017) tarafından yapılan alan derlemesi, istatistiksel arbitraj literatürüne ilişkin en etkili çalışmalardan biri olmuştur. Yapılan bu çalışmada; mesafe yaklaşımı, eş bütünleşme yaklaşımı, zaman serisi yaklaşımı, stokastik kontrol yaklaşımı ve makine öğrenmesi algoritmalarının da yer aldığı diğer yaklaşımlar olmak üzere beş ana grup oluşturulmuştur. İstatistiksel arbitraj stratejilerinde model oluşturulurken uygulanan yaklaşımlara göre ilgili finans literatürü, bu beş ana grup altında derlenmiştir. Yürütülen bu çalışmada literatür taraması; Krauss'un (2017) yapmış olduğu metodolojiye göre sınıflandırılmıştır.

4.1. Mesafe Yaklaşımı

İstatistiksel arbitraj stratejilerinde; varlıklar arasındaki ilişkinin modellenmesi için formasyon (hazırlık) dönemi bulunmaktadır. Mesafe yaklaşımı, formasyon döneminde mesafe ölçümlerinden yararlanarak uygun çiftleri tespit etmeyi amaçlar. Alım-satım döneminde ise; ticaret sinyallerini yakalamak amacıyla temel parametrik eşik değerleri kullanır. Bu strateji ampirik teste oldukça uygundur. Mesafe yaklaşımı kullanılarak oluşturulan ikili işlem stratejilerinin

farklı piyasalar ve varlık sınıflarında karlı sonuçlar verdiği birçok çalışmada tespit edilmiştir (Krauss, 2017).

Gatev vd. (2006) yapmış oldukları çalışmayla finans literatürüne mesafe yaklaşımını kazandırmışlardır. Çalışma 1962'den 2002'ye kadar tüm likit ABD CRSP hisse senetlerinin günlük verileriyle gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 12 aylık bir formasyon dönemi belirlenmiş ve tüm hisselerin kümülatif getiri endeksi oluşturulup, fiyatlar ilk güne göre normalize edilmiştir. İkinci olarak, formasyon döneminde elde edilen normalize fiyat serilerinin birbirleriyle olan karesel sapmaların toplamına bakılmış ve en düşük karesel sapma toplamına sahip fiyat serileri birbirlerine eşlenerek çifteler belirlenmiştir. Alım-satım döneminde ise, çifteler arasındaki yayılım ikiden fazla tarihsel standart sapmayı aşarsa işlem açılır ve ortalamaya dönüş üzerine kapatılır. Araştırmanın sonucunda ise yıllık ortalama %11'e varan getiri oranlarına ulaşılmıştır.

Do ve Faff (2010) çalışmalarında, Gatev vd. (2006) kullanmış oldukları aynı metodolojiyi aynı hisse senedi evreni içerisinde fakat daha uzun zaman aralığı kullanarak incelemişlerdir. Çalışmanın amacı ise ikili işlem stratejilerinden doğan göreceli değer arbitraj fırsatlarının halen devam edip etmediğinin tespit edilmesidir. Bu nedenle 1962 ve 2009 yılları arasına genişletilen veri seti küresel krizin etkilerini de kapsayacak duruma getirilmiştir. Çalışmanın sonucunda stratejinin yıllık ortalama %7'e varan getiri sunmaya devam ettiği görülmüştür. Literatür azalan arbitraj fırsatlarının nedenlerinden biri olarak da serbest fonların rekabete girmelerini göstermesine rağmen çalışmada; azalan getiri oranlarının istatistiksel arbitraj stratejilerinin riskleri ile ilgili olduğu savunulmaktadır. Do ve Faff (2012) yapmış oldukları yeni çalışmalarında; işlem komisyonları, piyasa etkisi ve açığa satış ücretleri kontrol edildikten sonra ikili işlem stratejilerinin çok daha mütevazı seviyelerde de olsa karlı olmaya devam ettiğini gözlemlemişlerdir.

Bu alanda yapılan bir diğer çalışma ise Chen vd. (2017) tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar tıpkı Do ve Faff (2010; 2012)'nin yaptığı gibi Gatev vd. (2006)'da yapılan çalışmanın veri setini kullanmışlardır. Çiftelerin eşleşmesinde ise; tarihsel getiri serisinin korelasyonu yöntemi kullanılmıştır. Araştırmanın sonucunda yıllık yüzde %9'a varan portföy getirilerinin; geleneksel faktör modelleri ile açıklanamayacağı ve ikili işlem stratejilerinin alfa yaratmada başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Literatürde mesafe yaklaşımı metodolojisi dikkate alındığında; Gatev vd. (2006) yapmış oldukları çalışmanın alanda en fazla atıf alan çalışma olduğu görülmektedir (Krauss, 2017). Geliştirmiş oldukları çifte bulma ve ticaret sinyalleri için kullanılan parametrik eşik değerler yöntemi alandaki birçok çalışmanın temelini de oluşturmuştur (Bowen vd., 2010; Broussard ve Vaihekoski, 2012; Jacobs ve Weber, 2016).

Mesafe yaklaşımı, hem kavramsal basitliği hem de geniş hisse senedi evrenlerine kolayca uygulanabilirliği sayesinde istatistiksel arbitraj literatürünün temel referans noktasını oluşturmuştur. Nitekim Gatev vd. (2006)'dan Do ve Faff (2012)'ye uzanan çizgide stratejinin uzun dönem karlılığı teyit edilmiş; ancak bu karlılığın sistematik biçimde eridiği de gözlemlenmiştir. Mesafe yaklaşımının temel kısıtı, iki hisse senedi arasındaki ilişkiyi yalnızca kümülatif getiri uzayındaki geometrik yakınlık olarak ele alması ve bu ilişkinin ekonometrik bir denge mekanizmasına mı yoksa tesadüfi bir korelasyona mı dayandığını ayırt etmemesidir. Başka bir deyişle, mesafe yaklaşımı “yakın olan şeylerin birbirine döneceğini” varsaymakta; ancak bu dönüşün neden ve ne zaman gerçekleşeceğine dair teorik bir zemin sunmamaktadır. İşte bu boşluk; yayılım dinamiğini uzun dönemli bir denge ilişkisi çerçevesinde ele alan ve istatistiksel olarak sınanabilir bir çifte seçim kriterini beraberinde getiren eşbütünleşme yaklaşımını doğurmuştur.

4.2. Eşbütünleşme Yaklaşımı

Eşbütünleşme yaklaşımı, hisse senedi evrenine uygulanacak formasyon döneminde çiftlerin tespiti için eşbütünleşme testleri uygulamayı önermektedir (Krauss, 2017). Alım-satım döneminde ise; birçok araştırmacı birbirlerinden farklı yöntemler uygulamıştır. Eşbütünleşmeye dayalı ikili işlem stratejilerinin temel faydası, belirlenen çiftlerin ekonometrik olarak daha güvenilir denge ilişkisidir (Krauss, 2017). Vidyamurthy (2004); literatüre eşbütünleşmeye dayalı ikili işlem stratejileri için en çok alıntı yapılan çalışmayı sunmaktadır. Araştırmacının çalışması üç adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, çiftlerin oluşturulacağı hisse senedi kümesi istatistiksel ya da temel benzerlik ölçümlerine dayalı olarak önceden seçilmiştir. İkinci olarak; Engle-Granger eşbütünleşme testinin uyarlanmış bir modeli uygulanarak eşleşen çiftlerdeki alım-satım fırsatları değerlendirilmiştir. Son adımda ise ticaret sinyallerinin eşik değerleri non-parametrik modellerle tasarlanmıştır.

Miao (2014) yapmış olduğu çalışmada, Mayıs 2012'den Temmuz 2013'e kadar zaman aralığına sahip yüksek frekanslı veri ile NYSE ve NASDAQ borsalarında işlem gören tüm enerji sektörü hisselerini incelemiştir. Çalışmada; çifte bulma sürecinde, iki aşamalı korelasyon ve eşbütünleşme yaklaşımından yararlanılmıştır. Oluşturulan ticaret stratejisi, hisse senedi çiftlerinden oluşan portföyler için %56,58'e varan kümülatif getiri sağlamakta, 12 aylık işlem dönemi boyunca S&P 500 endeks performansını %34,35 oranında aşmaktadır. Ayrıca önerilen ticaret stratejisi aylık 2,67 Sharpe oranına ve yıllık 9,25 Sharpe oranına ulaşmıştır.

Blazquez vd. (2018) çalışmalarında serbest fonlar tarafından sıklıkla kullanılan istatistiksel arbitraj yaklaşımlarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, 2008-2013 tarihleri arasındaki S&P500 bankacılık sektörü hisselerini ampirik çalışmalarına dahil etmişlerdir. Çalışma sonucunda; eşbütünleşme yaklaşımı ile belirlenen çifte seçimlerinin ve çiftelere ait hata terimi zaman serilerinin diğer yaklaşımlara göre daha başarılı olduğu bulgusuna varılmış ve eşbütünleşmenin ikili işlem stratejilerini yapılandırmada en etkili yöntem olduğu savunulmuştur.

Tokat ve Hayrullahoğlu (2022) yapmış oldukları çalışmada uygun çifteleri tespit edebilmek için bir dizi ön koşula sahip eşbütünleşme analizi kullanmışlar ve bu yaklaşımı farklı varlık sınıfları için uygulamışlardır. Ticaret sinyalleri oluşturulurken yararlanılan eşik değerler Z skoru yöntemine göre belirlenmiştir. Ocak 2007 ile Ocak 2021 arası kapsayan veri setinde hisse senedi evreni S&P 500'den seçilmiştir. 45 çifteden oluşan portföyün işlem maliyetleri de dikkate alındığında yıllık ortalama %15 getiri ürettiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca stratejinin ayı piyasası dönemlerinde daha iyi performans gösterdiği bulgusuna ulaşılmıştır. Eşbütünleşme yaklaşımına ilişkin çalışmalar yalnızca hisse senedi piyasalarında gerçekleşmemiştir. Leung ve Nguyen (2019) araştırmalarını kripto piyasaları üzerine gerçekleştirmişlerdir. Yapılan istatistiksel analizler sonucu, Bitcoin, Ethereum, Bitcoin Cash ve Litecoin'den oluşan eşbütünleşik portföyler oluşturulmuş ve kar maksimizasyonu açısından zarar durdurma (stop-loss) stratejilerinin kullanılmadığı ticaret sistemlerinin tercih edilmesinin uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Eşbütünleşme yaklaşımı, mesafe yaklaşımının getirdiği matematiksel perspektifi ekonometrik bir denge zeminine taşıyarak istatistiksel arbitraj literatürüne teorik bir derinlik kazandırmıştır. Ancak bu teorik yaklaşımın ampirik üstünlüğe dönüşüp dönüşmediği literatürde oldukça tartışmalıdır. Örneğin, Rad, Low ve Faff (2016) tüm ABD hisse senedi piyasasını kapsayan geniş örneklemelerde mesafe yaklaşımının eşbütünleşmeye kıyasla daha iyi performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Öte yandan Huck ve Afawubo (2015) yalnızca yüksek likiditeye sahip S&P 500 endeksi bileşenleri üzerinde yürüttükleri çalışmada tam zıttı bir bulguya ulaşmıştır. Huck ve Afawubo'ya göre, işlem maliyetleri ve risk faktörleri kontrol edildiğinde mesafe yaklaşımının aşırı getirisi istatistiksel anlamlılığını yitirmekte, eşbütünleşme yaklaşımı ise istatistiksel anlamlı bir getiri sunmaya devam etmektedir. Varlık fiyatlama teorisi perspektifinden bakıldığında; bu durum piyasa mikro yapısı ve arbitrajın sınırları ile doğrudan ilişkilidir. S&P 500 gibi bilgi asimetrisinin düşük ve arbitraj sermayesinin yoğun olduğu evrenlerde, basit geometrik fiyat sapmalarına dayalı anomaliler yüksek frekanslı işlemlerle hızla sömürülürken; alfa ancak varlıklar arasındaki derin yapısal dengesizlikleri tespit edebilen

eşbütünleşme gibi modellerle yakalanabilmektedir. Likit piyasalardaki bu ampirik gücüne rağmen, eşbütünleşme yaklaşımı da farklı bir yapısal kısıta sahiptir. Geleneksel eşbütünleşme testleri, iki varlık arasındaki uzun dönemli ilişkinin doğrusal ve parametrelerinin zaman içinde sabit olduğunu varsayar. Oysa makroekonomik şoklar ve likidite döngüleri, arbitraj spreadlerinin şiddetli rejim değişimlerine uğramasına neden olur. Varlık fiyatlama dinamiklerinin sürekli evrilen yapısı, eşbütünleşmenin sabit parametrelili ve doğrusal varsayımlarını pratikte yetersiz kılmıştır. Piyasaların dayattığı bu esneklik ihtiyacı; varlıklar arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri ve değişken ortalamaya dönüş hızlarını başarıyla modelleyebilen copula ve durum-uzayı gibi stokastik yaklaşımlara geçişi zorunlu kılmıştır.

4.3. Stokastik ve Matematiksel Model Tabanlı Yaklaşımlar

Mesafe ve eşbütünleşme yaklaşımlarının parametrik kısıtlarını aşmak amacıyla istatistiksel arbitraj literatüründe stokastik süreçlere, copula fonksiyonlarına ve Kalman filtresine dayanan bir dizi model geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar Krauss (2017) tarafından ele alınan çalışmada da yer bulmuştur. İstatistiksel arbitraj literatüründe yayılım (spread) dinamiklerini doğrudan stokastik bir süreç olarak modelleyen çalışmaların öncü isimlerinden biri Elliott vd. (2005) olmuştur. Bu alanda en yaygın kullanılan stokastik çerçevelerden biri ise Ornstein-Uhlenbeck (OU) sürecine dayalı yaklaşımdır.

Elliott vd. (2005), iki hisse senedi arasındaki yayılımı bir OU süreci olarak modelleyerek hem yayılımın ne zaman uzun dönemli ortalamadan anlamlı biçimde saptığını hem de bu sapmanın olasılıksal sınırlarını analitik olarak türetmiştir. Bu yaklaşım spread serisinin ortalamaya dönüş hızını ve uzun dönemli denge değerinden sapmayı analiz etmeye yaramaktadır. Benzer bir çerçevede; Do, Faff ve Hamza (2006) istatistiksel arbitraj için durum-uzay modeline dayalı genel bir yaklaşım önermiş ve bu çiftlerdeki ortalamaya dönüş davranışını ampirik olarak doğrulamışlardır. OU sürecinin analitik zemini; işlem giriş ve çıkış zamanlamasının ayrıca giriş ve çıkış eşiklerinin belirlenmesi konusunda oldukça önemlidir.

Copula fonksiyonlarına dayanan yaklaşım ise iki varlık arasındaki bağımlılık yapısının kenar dağılımlarından bağımsız biçimde modellenmesine olanak tanınması bakımından güçlü bir metodolojik alternatif sunmaktadır. Geleneksel korelasyon ve eşbütünleşme yöntemleri, bağımlılığın doğrusal olduğunu ve Gaussian gürlüğü varsayımı altında çalıştığını öngörmektedir; oysa finansal varlık getirileri çoğunlukla kalın kuyruklu dağılımlar sergilemekte ve birlikte aşırı uç olayları (tail dependence) yaşama eğiliminde bulunmaktadır. Liew ve Wu (2013), çeşitli copula fonksiyonlarını üç ABD hisse senedi çiftine

uygulayarak mesafe ve eşbütünleşme yaklaşımlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışmada Gumbel copulasının bağımlılık yapısını en iyi modelleyen fonksiyon olduğu belirlenmiş; copula tabanlı stratejinin geleneksel yöntemlere kıyasla daha fazla işlem fırsatı ve daha yüksek getiri ürettiği ampirik olarak gösterilmiştir.

Kalman filtresi ve durum uzayı modelleri ise istatistiksel arbitrajda dinamik hedge rasyosunun zaman içinde güncellenmesi sorununun çözümüne yönelik olarak geliştirilmiştir. Eşbütünleşme yaklaşımının temel zayıflığı, formasyon döneminde sabit olarak tahmin edilen hedge rasyosunun alım-satım döneminde değişmesine rağmen sabit tutulmasıdır. Kalman filtresi çerçevesinde ise durum uzayı temsili; yayılımın gözlemlenemeyen durumunu her yeni gözlemlerle birlikte güncelleme imkânı tanımaktadır.

Stokastik ve matematiksel model tabanlı yaklaşımların istatistiksel arbitraj literatüründeki konumu değerlendirildiğinde, bu yöntemlerin mesafe ve eşbütünleşme yaklaşımlarından metodolojik olarak daha sofistike olduğu görülmektedir. OU süreci teorik açıdan optimal giriş-çıkış kurallarını türetmeye imkân tanırken, copula yöntemi doğrusal olmayan bağımlılık yapılarını ve aşırı uç olayları işleyebilmekte; Kalman filtresi ise hedge rasyosunun dinamik adaptasyonunu sağlamaktadır. Bununla birlikte bu yaklaşımların ortak bir kısıtı da mevcuttur. Tüm bu yaklaşımlar, varlıklar arasındaki ilişkinin belirli bir parametrik biçime uyduğunu önceden varsaymaktadır. Piyasalar karmaşılaştıkça ve varlıklar arasındaki etkileşimler çok boyutlu hale geldikçe bu parametrik kısıt giderek daha belirleyici bir dezavantaja dönüşmektedir. Yüksek boyutlu özellik uzaylarında veri yoğun sinyal üretimi söz konusu olduğunda ise parametrik kısıtlardan bağımsız, doğrudan veriden öğrenen makine öğrenmesi yaklaşımları doğal bir metodolojik çözüm olarak öne çıkmaktadır.

4.4. Makine Öğrenmesi Tabanlı Yaklaşımlar

İstatistiksel arbitraj literatürü, çifte kombinasyonlarından en uygun olanları bulmak ve başarılı bir şekilde ticaret sinyalleri üretme konusunda çoğunlukla zaman serisi ve stokastik kontrol gibi geleneksel matematiksel yöntemleri kullanmaktadır. Fakat makine öğrenmesi algoritmalarının verilerden bilgiyi daha etkili bir şekilde çıkarabilmesi beklenmektedir (Zhang vd., 2022). Bu alanda yapılan ilk başlıca çalışmalar Huck (2009; 2010) tarafından yapılmıştır. Huck (2009) yapmış olduğu çalışmada metodolojiyi 3 adımdan oluşturmuştur. Bunlar; tahminleme, sıralama ve alım-satım adımlarıdır. Tahminleme aşamasında; Elman sinir ağı yöntemi kullanılmış ve 1 haftalık sürelerde hisse senedi getirileri üzerine tahminleme yapılmıştır. Sıralama adımında; çok kriterli karar verme tekniklerinden ELECTRE III yaklaşımı benimsenmiştir.

Alım-satım adımında ise; sıralama sonucu en üstte yer alan 5 hisse senedinde uzun pozisyon, en altta yer alan 5 hisse senedinde kısa pozisyon açılmıştır.

Avellaneda ve Lee (2010), Arbitraj Fiyatlama Teorisi'nin (APT) temel prensiplerini doğrudan algoritmik bir çerçeveye taşıyarak istatistiksel arbitraj literatüründe metodolojik bir kırılma yaratmıştır. Çalışmanın temel stratejisi; varlık getirilerini çoklu faktör modelleri aracılığıyla sistematik piyasa risklerinden arındırmak ve geriye kalan, salt hisseye özgü (idiyosenkratik) geçici yanlış fiyatlamaları ortalamaya dönüş (mean-reversion) dinamikleriyle sömürmektir. Stratejinin formasyon döneminde hisse senedi getirilerini sistematik ve kendine özgü bileşenlere (idiosyncratic) ayırtmak için iki yaklaşım kullanmıştır. Temel bileşenler analizi (PCA) ve sektör ETF'leri yaklaşımları bu çalışmanın metodolojik adımlarını oluşturur. PCA ile oluşturulan portföyler; 1997-2007 yılları arasındaki veri setinde yıllık 1,44 Sharpe oranına sahiptir. PCA yaklaşımı literatürde birçok çalışmada stratejinin formasyon döneminde çifte bulma aşamasında da kullanılmaktadır (Guijarro-Ordóñez vd., 2021; Gatta vd., 2023).

Sutherland vd. (2018) Güney Kore temsili borsa endeksi olan KOSPI 200 üzerinde ticaret stratejilerini birçok makine öğrenmesi algoritması aracılığıyla test etmişlerdir. 2000-2017 yılları arasını kapsayan veri seti üzerinde sınıflandırma ve tahminleme olmak üzere 2 ana grupta sınıflandırılan algoritmaların performansı ölçülmüştür. Çalışmada test edilen tüm modeller, aynı dönemde KOSPI 200 endeksinin 2,4 ila 7,5 katı arasında yıllık getiri elde etmiştir. Toplamda test edilen 10 algoritmadan sınıflandırma sınıfının az bir farkla daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Fischer vd. (2019) makine öğrenmesi yaklaşımlarına dayalı istatistiksel arbitraj stratejilerini dakikalık yüksek frekanslı veri seti üzerinden kripto piyasalarında test etmişlerdir. Haziran 2018 – Eylül 2018 dönemini kapsayan veri setinde; ticaret döneminin sonunda, rastgele orman algoritması %6 kâr biriktirirken, Bitcoin ve genel piyasa sırasıyla %5 ve %25 zarar elde etmiştir. Huck (2019) yapmış olduğu çalışmada geniş bir veri seti kullanarak makine öğrenmesi algoritmalarının istatistiksel arbitraj stratejilerindeki başarısını test etmiştir. 1993-2015 yılları arasını kapsayan çalışma en büyük 300 ABD hissesi üzerinde gerçekleşmiş ve stratejinin 1993-2008 yılları arasındaki dönemde karlı bir şekilde devam ettiği gözlemlenmiştir. Fakat işlem maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda bu getiriler önemli ölçüde azalmıştır.

Carta vd. (2020)'deki çalışmalarında istatistiksel arbitraj stratejilerini; bir dizi regresyon algoritması ve dinamik varlık seçimine dayalı genel bir yaklaşım modeli ile 2007–2016 yılları arasındaki S&P hisselerinden oluşan veri setinde test etmişlerdir. Stratejinin sonucunda yıllık %36,6'ya varan oranlarda getiri

yakalanmıştır. Zhang vd. (2022) Çin hisse senedi piyasalarında yapmış oldukları çalışmada rastgele orman algoritmasının derin sinir ağı (DNN), XGBoost, destek vektör makinesi (SVM) ve LSTM'den daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Zhan vd. (2022) ise Çin hisse senedi piyasasında makine öğrenimi stratejisinin eşbütünleşme stratejisine göre daha düşük riske ve daha yüksek getiriye sahip olduğunu bulgusuna ulaşmıştır.

Yukarıda bahsi geçen dört metodolojik yaklaşım istatistiksel arbitraj mekanizmasında yaşanan gelişmeleri özetlemektedir. Mesafe yaklaşımı ile varlıklar arasındaki istatistiksel sapmaların arbitrajcular tarafından değerlendirilmesinin önu açılmıştır. Daha sonra bu kavramsal zemin ekonometrik bulgularla desteklenerek eşbütünleşme yaklaşımının kapısı aralanmıştır. Sabit parametre sorununu çözebilmek adına stokastik modeller geliştirilmiş ve arbitraj mekanizmasının dinamik bir boyut kazanılmasına zemin hazırlanmıştır. Varlıklar arası istatistiksel ilişkinin boyut ve karmaşıklık kazanması neticesinde makine öğrenmesi modelleri arbitraj mekanizmasına dahil olmuştur. Tüm bu gelişmelere rağmen arbitraj mekanizmasının aşırı öğrenme, işlem maliyetleri, kapasite sınırları gibi kısıtlar neticesinde teorik getiri ile pratik getiri arasında anlamlı farklılıklar bulunmaktadır.

5. Varlık Fiyatlamaya Etkileri

İstatistiksel arbitraj yalnızca bir strateji türü değil aynı zamanda varlık fiyatlama sürecinde piyasa etkinliği, fiyat keşfi, arbitrajın sınırları ve alfa trendleri açısından önemli bir konuma sahiptir. Bu bölümde istatistiksel arbitraj ve varlık fiyatlama ilişkisi incelenecektir.

5.1. Piyasa Etkinliği Üzerindeki Etki

Piyasa etkinliği hipotezi (Fama, 1991), akademik literatürde sıklıkla incelenen ve gündemde olan bir tartışma konusudur. Güçlü biçimde etkin bir piyasada, herhangi bir bilgi setine dayalı ticaret stratejisi anormal getiri sağlayamaz. Bununla birlikte, onlarca yıldır finans literatüründe tespit edilen yüzlerce getiri anomalisi bu hipoteze meydan okumaktadır. Cochrane (2011), bu anomali çoğalmasına dikkat çekmiş; Harvey, Liu ve Zhu (2016) ise söz konusu bu anomalilerin çoğunun veri madenciliğinin bir ürünü olabileceğini ileri sürmüştür. Nitekim Hou, Xue ve Zhang (2020), 452 anomaliyi yeniden test etmiş; bunların büyük çoğunluğunun standart eşik değerler altında istatistiksel anlamlılığını yitirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, literatürdeki anomalilerin önemli bir kısmının gerçek bir yanlış fiyatlamayı değil, replikasyon sorunlarını veya işlem maliyeti nedeniyle uygulanamayan kâğıt üstü fırsatları yansıttığına işaret etmektedir.

İstatistiksel arbitrajın varlık fiyatlamaya en doğrudan etkisi, gerçek yanlış fiyatlamaları yansıtan anomalilerin sistematik biçimde sömürülerek zamanla ortadan kaldırılması kanalıyla gerçekleşir. McLean ve Pontiff (2016), 1926-2012 yılları arasında yayımlanan 97 getiri anomalisini inceleyerek; akademik yayınların ardından arbitraj sermayesinin harekete geçmesiyle ortalama anomali büyüklüğünün yaklaşık yüzde 32 oranında eridiğini belgelemiştir.

Ancak bu erime süreci, piyasanın tam bir etkinliğe ulaştığı anlamına gelmez. Stambaugh ve Yuan (2017), yanlış fiyatlama faktörlerine dayalı bir Stokastik İskonto Faktörü (SDF) yapısı kurarak, anomalilerin önemli bir bölümünün ortak bir yanlış fiyatlama bileşeni etrafında kümelenmediğini göstermiştir. Bu perspektiften bakıldığında, istatistiksel arbitraj faaliyetleri fiyatların temel değerine daha hızlı yakınsamasını sağlasa da, yanlış fiyatlamadan doğan ekstra getiri (prim) tamamen sıfırlanamamakta ve piyasadaki kalıcılığını korumaktadır. Bu kalıcılığın temel nedeni ise arbitrajın sınırlarıdır (limits of arbitrage). Nitekim Novy-Marx ve Velikov (2022), işlem maliyetleri, likidite daralmaları ve kapasite kısıtları göz önünde bulundurulduğunda, teorikte kârlı görünen birçok anomali stratejisinin fiilen uygulanabilirliğini yitirdiğini kanıtlamıştır. Dolayısıyla istatistiksel arbitraj, piyasayı kusursuz bir etkinliğe ulaştıran teorik bir güç değil; ancak işlem maliyetlerinin izin verdiği marjda çalışan ve yanlış fiyatlama primini işlem maliyetleri marjına kadar daraltan bir fiyatlama mekanizmasıdır.

5.2. Fiyat Keşif Sürecinin Hızlanması

İstatistiksel arbitrajın piyasa işlevselliğine en olumlu katkılarından biri, fiyat keşif sürecini hızlandırmasıdır. Yanlış fiyatlanmış menkul kıymetleri hedef alan arbitrajcılar, bu menkul kıymetlerin fiyatlarını temel değerlerine daha hızlı yaklaştırarak hem bilgi içerikli fiyatların oluşmasına hem de kaynakların daha verimli tahsisine katkıda bulunur.

Bu mekanizma ampirik düzeyde de belgelenmiştir. Israeli, Lee ve Sridharan (2017), borsa yatırım fonlarının (ETF) hisse senedi piyasalarındaki fiyat keşfine etkisini incelemiş; yüksek ETF sahipliğinin menkul kıymet başına bilgi üretimini azalttığını ve bireysel hisse senedi fiyatlarının temel değerden sapma sürelerini uzattığını ortaya koymuştur. Bunun temel nedeni, ETF arbitrajının hisseleri tekil şirket dinamiklerine göre değil, sepet mantığıyla topluca alıp satmasıdır. Bu durum şirkete özgü bilginin fiyatlara yansımaları yavaşlatır ve arbitrajın piyasayı etkinleştirebilmesi için hangi yapısal araç üzerinden (makro sepetlere karşı tekil hisseler) yürütüldüğünün kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın Bowen vd. (2010), yüksek frekanslı ikili işlem stratejilerinin piyasa likiditesini artırmak suretiyle fiyat keşfine katkı sunduğunu

belgelemiştir. Bu iki bulgunun bir arada değerlendirilmesi arbitrajın fiyat keşif etkisinin tek biçimli olmadığını kanıtlar niteliktedir. Arbitraj mekanizmasının fiyat keşif sürecine katkısı işlem hızına, türüne ve hangi araçların kullanıldığına göre farklılaşmaktadır.

Fiyat keşif sürecini hızlandıran en güçlü kuvvetlerden biri, son yirmi yılda yapısal bir değişim geçiren yüksek frekanslı ticaret (High Frequency Trading, HFT) alanıdır. HFT firmaları; mikrosaniye düzeyinde tepki süreleri, co-location altyapısı (sunucuların borsa sistemlerine fiziksel yakınlığı) ve doğrudan piyasa erişimi aracılığıyla fiyat eşitsizliklerini herhangi bir kurumsal yatırımcıdan önce tespit edip kapatmaktadır. Budish, Cramton ve Shim (2015), bu sürecin piyasa yapısı açısından köklü sonuçlar doğurduğunu göstermiştir. HFT firmaları arasındaki gecikme (latency) yarışı fiyat keşfini hızlandırmakla birlikte, bu yarışın kendisi piyasaya yapısal bir değer katmayan ve ekonomik israfa yol açan maliyetli bir rekabete dönüşmektedir. Araştırmacılar, sürekli çift müzayede sisteminden dönemsel toplu müzayede sistemine geçilmesinin hem verimliliği artıracığını hem de bu hızın yarattığı haksız rekabeti önleyebileceğini savunmuştur.

Söz konusu gecikme arbitrajının piyasa mikro yapısı ve likidite üzerindeki net etkisi ise literatürde güncel bir tartışma konusudur. Bu strateji; farklı borsalar veya işlem platformları arasındaki anlık fiyat farklılıklarını milisaniyeler içinde tespit edip kapatmayı amaçlamaktadır. Menkveld (2013), büyük bir HFT piyasa yapıcısının faaliyetlerini analiz ederek bu tür yüksek frekanslı arbitrajın bid-ask spreadlerini daralttığını, dolayısıyla küçük yatırımcılar için işlem maliyetlerini düşürdüğünü göstermiştir. Bununla birlikte Kirilenko vd. (2017), 2010 yılında ABD hisse senedi piyasasında yaşanan anlık çöküşü (Flash Crash) inceleyen çalışmalarında HFT firmalarının bu olayda oynadığı rolü belgelemiştir. Bulgulara göre; piyasa stresinin ani biçimde arttığı anlarda HFT algoritmaları envanter riski ve ters seçim (adverse selection) baskısıyla karşılaşarak piyasadan çekilmiş, likidite tam ihtiyaç duyulan anda sağlanamamış ve fiyat düşüşü kendini besleyen bir döngüye girmiştir. Bu bulgular, HFT'nin fiyat keşfine katkısının koşullu olduğunu ortaya koymaktadır. Normal piyasa koşullarında fiyat keşfini ve likiditeyi artıran bu yapı, stres dönemlerinde fiyat istikrarsızlığını derinleştiren bir kırılma kaynağına dönüşebilmektedir.

5.3. Arbitrajın Sınırları: Risk ve Likidite Kısıtları

Piyasaların tam anlamıyla etkin olmamasının ardındaki en güçlü teorik açıklama, Shleifer ve Vishny'nin (1997) öncü çalışmasında kavramsallaştırılan 'arbitrajın sınırları' kuramıdır. Bu kuram, Keynes'in "Piyasalar, sizin ödeme gücünüzü koruyabileceğinizden çok daha uzun süre irrasyonel kalabilir"

şeklindeki tarihi sezgisini ekonometrik bir zemine taşır. Shleifer ve Vishny'ye göre; gerçek dünyadaki arbitrajcılar kendi paralarını değil, dışarıdan fon sağlayan yatırımcıların sermayesini yöneten temsilcilerdir. Yanlış fiyatlama süreci; başlangıçta düzeltilmek yerine daha da kötüleştiğinde, yatırımcılar panikleyerek fonlarını çeker. Bu sermaye çıkışı, arbitrajcıyı pozisyonunu zararına kapatmaya zorlar ve teorik olarak risksiz görünen bir fırsatı, pratikte fonlama riski nedeniyle ciddi sermaye kayıplarına yol açabilir.

Gromb ve Vayanos (2010), arbitrajın sınırları kuramını zengin bir teorik çerçeveye oturtarak finansal kırılma, teminat kanalı ve bulaşma mekanizmaları üzerindeki etkilerini sistematik biçimde incelemiştir. Bu çalışma; arbitrajcılarının likidite kısıtlarıyla karşılaştığı dönemlerde farklı piyasalar arasındaki fiyat sapmaları arasında beklenmedik korelasyonlar ortaya çıkabileceğini teorik olarak göstermiştir. Bu fenomen, 2008 finansal krizinde ve 2020 COVID-19 çalkantısında çarpıcı biçimde gözlemlenmiştir.

Frazzini ve Pedersen (2014), kaldıraç kısıtına maruz kalan yatırımcıların düşük beta varlıkları gereğinden yüksek, yüksek beta varlıkları ise gereğinden düşük fiyatladığını belgelemiştir. Bu yapısal yanlış fiyatlama, 'beta'ya karşı bahis' stratejisinin teorik temelini oluşturmaktadır. Stratejinin işleyişi doğrudan fonlama likiditesi kısıtına dayanmaktadır. Kaldıraç sınırlarıyla karşılaşan arbitrajcılar, düşük beta varlıklarda yeterli pozisyon alamadığından bu varlıklardaki yanlış fiyatlama kalıcı bir karakter kazanmaktadır. Nagel (2012) ise likiditenin beklenmedik biçimde düştüğü dönemlerde ortalamaya dönüş stratejilerinin getirisinin belirgin biçimde yükseldiğini göstermiştir. Bu bulgu; istatistiksel arbitraj stratejilerinin kısmen likidite riskine maruz olduğunu ve bir tür sigorta primi sunmak suretiyle getiri ürettiğini düşündürmektedir.

5.4. Ampirik Kanıtlar: Azalan Alfa Trendi

İstatistiksel arbitraj stratejilerinin uzun dönemli getiri trendine ilişkin ampirik kanıtlar, sistematik biçimde azalan bir alfa örüntüsüne işaret etmektedir. Bu durumun başlıca nedenleri arasında arbitraj fonlarının sayısındaki artış, HFT firmalarının hız rekabeti ve maliyet düşüşleri ve aynı zamanda anomalilerin akademik yayınlarla halka açık hale gelmesi sıralanabilir.

Do ve Faff (2010), mesafe yaklaşımına dayalı ikili işlem stratejilerinin yıllık ortalama getirisinin 1962-2002 dönemindeki %11 seviyesinden 2002-2009 döneminde %7'ye gerilediğini belgelemiştir. Bu gerileme, kümülatif arbitraj baskısının somut bir yansıması olarak yorumlanmaktadır. Huck (2019), makine öğrenmesi tabanlı istatistiksel arbitraj stratejilerinin dahi 1993-2008 döneminde karlı iken 2008 sonrasında işlem maliyetleri dahil edildiğinde marjinal bir konuma gerilediğini göstermiştir. Krauss (2017),

literatür derlemesinde ikili işlem stratejilerindeki ortalama yıllık fazla getirinin 1990'lardan 2010'lara doğru belirgin biçimde azaldığını kaydetmiştir.

Bu azalan alfa trendini yalnızca rekabet baskısına bağlamak yeterli değildir. Düzenleyici altyapının gelişmesi, veri şeffaflığının artması ve piyasa likiditesinin yapısal olarak derinleşmesi de bağımsız katkıda bulunan etkenlerdir. Guijarro-Ordóñez, Pelger ve Zanotti (2021), yapmış oldukları çalışmada doğrusal modellere dayalı klasik arbitraj stratejileri yerine kullanmış oldukları derin öğrenme modelleri ile anlamlı alfa yakalamayı başarmışlardır. Derin öğrenme algoritmaları bu yeni düzende etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Eggebrecht ve Lütkebohmert (2023), hibrit CNN-LSTM modelinin geleneksel eşbütünleşme yaklaşımına göre daha dayanıklı bir performans sergilediğini göstermiş; bu bulgu, metodolojik yeniliğin alfa erimesini geciktirebileceğine işaret etmektedir.

Tüm bu kanıtlar bir arada değerlendirildiğinde, istatistiksel arbitrajın varlık fiyatlamada dinamikleri üzerindeki işlevi Grossman ve Stiglitz'in (1980) bilgi paradoksunun somut bir yansımasıdır. Arbitrajcular yanlış fiyatlamaları sömürerek piyasayı giderek daha etkin hale getirirken, piyasa etkinliğe yaklaştıkça bu stratejileri besleyen kâr marjları daralır. İstatistiksel arbitraj, piyasa etkinliğini var eden temel kuvvet olmakla birlikte sürekli olarak kendi varoluş koşullarını tüketen dinamik bir mekanizmadır.

6. Sonuç ve Değerlendirme

İstatistiksel arbitraj, piyasa verimsizliklerini sistematik biçimde gidermeye çalışan bir strateji olarak onlarca yıldır hem akademisyenlerin hem de uygulayıcıların gündeminde yer tutmaktadır. Morgan Stanley'nin 1980'lerde geliştirdiği ikili işlem tekniklerinden bugünün yüksek frekanslı algoritmalarına uzanan bu dönüşüm, yalnızca teknolojik bir ilerlemeyi değil, aynı zamanda piyasa dinamiklerine dair kavrayışımızın derinleşmesini de yansıtmaktadır. Literatürde ortaya konan anomalilerin, yayımlanmanın ardından zaman içinde zayıfladığı belgelenmiş bir bulgudur. McLean ve Pontiff (2016) ile Hou vd. (2020), bu erimenin organize arbitraj faaliyetleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Yine bu süreç, piyasaların tam etkinliğe kavuştuğu anlamına gelmemektedir. Shleifer ve Vishny'nin (1997) işaret ettiği finansman riskleri, likidite krizleri ve işlem maliyetleri, pratikte arbitrajın önüne geçen ciddi kısıtlardır. İşte tam bu noktada arbitrajın sınırları kuramı açıklayıcı bir çerçeve sunarak teorik getiri ile gerçek uygulama arasındaki farklılığı ve de piyasaların neden tam olarak temizlenemediğini anlamamızı sağlamaktadır. Gelecekteki araştırmalar açısından ise en verimli alanlardan biri, anomali ömrü ile piyasa mikroyapısı arasındaki ilişki olarak öne çıkmaktadır. Özellikle bireysel

yatırımcı ağırlığının yüksek olduğu ve açığa satış kısıtlarının sıkı biçimde uygulandığı gelişmekte olan piyasalarda, arbitraj mekanizmasının nasıl işlediği hâlâ yeterince incelenmemiş bir alandır. Farklı varlık sınıflarında ve yüksek frekanslı veri setlerinde yapılacak ampirik testler de bu boşluğu doldurmaya katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak istatistiksel arbitraj, varlık fiyatlarını temel değerlerine yaklaştıran önemli bir piyasa gücü olmayı sürdürmektedir. Ancak bu strateji kendi başarısının da kurbanıdır çünkü sömürdüğü fiyat sapmalarını giderdikçe, kendi getiri marjını da daraltır. Bu yapısal çelişki, istatistiksel arbitrajı hem piyasa etkinliği tartışmalarının merkezine hem de uygulamacılar için bir adaptasyon problemine dönüştürmektedir.

Kaynakça

- Ackert, L.E., Tian, Y.S. (1998). The introduction of Toronto index participation units and arbitrage opportunities in the Toronto 35 index option market. *Journal of Derivatives*, 5(4), 44-53.
- Ammann, M., Herriger, S. (2002). Relative implied-volatility arbitrage with index options. *Financial Analysts Journal*, 58, 42-54.
- Avellaneda, M., Lee, J.H. (2010). Statistical arbitrage in the US equities market. *Quantitative Finance*, 10(7), 761-782.
- Blazquez, M.C., De La Cruz, C.D.L.O. ve Roman, C.P. (2018). Pairs trading techniques: An empirical contrast. *European Research on Management and Business Economics*, 24(3), 160-167.
- Bowen, D.A., Hutchinson, M.C. ve O'Sullivan, N. (2010). High frequency equity pairs trading: transaction costs, speed of execution and patterns in returns. *The Journal of Trading*, 5(3), 31-38.
- Broussard, J.P., Vaihekoski, M. (2012). Profitability of pairs trading strategy in an illiquid market with multiple share classes. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 22(5), 1188-1201.
- Budish, E., Cramton, P. ve Shim, J. (2015). The high-frequency trading arms race: Frequent batch auctions as a market design response. *Quarterly Journal of Economics*, 130(4), 1547-1621.
- Carta, S., Recupero, D.R., Saia, R. ve Stanciu, M.M. (2020). A general approach for risk controlled trading based on machine learning and statistical arbitrage. Nicosia, G. vd. (Ed.), *Machine Learning, Optimization, and Data Science, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12565. Springer, Cham.
- Chan, E. (2013). *Algorithmic Trading*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Chan, E. (2021). *Quantitative Trading (2. Baskı)*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Chen, H., Chen, S.J. ve Li, F. (2017). Empirical investigation of an equity pairs trading strategy. *Management Science*, 65(1), 370-389.
- Cochrane, J.H. (2011). Presidential address: Discount rates. *Journal of Finance*, 66(4), 1047-1108.
- Derman, E. (2004). *My Life as a Quant: Reflections on Physics and Finance*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Do, B., Faff, R. (2010). Does simple pairs trading still work? *Financial Analysts Journal*, 66(4), 83-95.
- Do, B., Faff, R. (2012). Are pairs trading profits robust to trading costs? *Journal of Financial Research*, 35(2), 261-287.
- Do, B., Faff, R. ve Hamza, K. (2006). A new approach to modeling and estimation for pairs trading. *Proceedings of 2006 Financial Management Association European Conference*.

- Eggebrecht, P., Lütkebohmert, E. (2023). A hybrid convolutional neural network with long short-term memory for statistical arbitrage. *Quantitative Finance*, 23(4), 595-613.
- Elliott, R., van der Hoek, J. ve Malcolm, W. (2005). Pairs trading. *Quantitative Finance*, 5, 271-276.
- Fama, E.F. (1991). Efficient capital markets: II. *Journal of Finance*, 46(5), 1575-1617.
- Fama, E.F., French, K.R. (1992). The cross-section of expected stock returns. *Journal of Finance*, 47(2), 427-465.
- Fama, E.F., French, K.R. (1993). Common risk factors in the returns on stocks and bonds. *Journal of Financial Economics*, 33(1), 3-56.
- Fischer, T.G., Krauss, C. ve Deinert, A. (2019). Statistical arbitrage in cryptocurrency markets. *Journal of Risk and Financial Management*, 12(1), 31.
- Frazzini, A., Pedersen, L.H. (2014). Betting against beta. *Journal of Financial Economics*, 111(1), 1-23.
- Gatev, E., Goetzmann, W.N. ve Rouwenhorst, K.G. (2006). Pairs trading: performance of a relative-value arbitrage rule. *Review of Financial Studies*, 19(3), 797-827.
- Gatta, E., Iorio, C., Chiaro, D., Giampaolo, F. ve Cuomo, S. (2023). Statistical arbitrage in the stock markets by the means of multiple time horizons clustering. *Neural Computing and Applications*, 35, 11713-11731.
- George, T.J., Hwang, C.Y. (2004). The 52-week high and momentum investing. *Journal of Finance*, 59(5), 2145-2176.
- Gromb, D., Vayanos, D. (2010). Limits of arbitrage: The state of the theory. *Annual Review of Financial Economics*, 2, 251-275.
- Grossman, S.J., Stiglitz, J.E. (1980). On the impossibility of informationally efficient markets. *American Economic Review*, 70(3), 393-408.
- Guijarro-Ordóñez, J., Pelger, M. ve Zanotti, G. (2021). Deep learning statistical arbitrage. arXiv:2106.04028.
- Harvey, C.R., Liu, Y. ve Zhu, H. (2016). ... and the cross-section of expected returns. *Review of Financial Studies*, 29(1), 5-68.
- Hou, K., Xue, C. ve Zhang, L. (2020). Replicating anomalies. *Review of Financial Studies*, 33(5), 2019-2133.
- Huck, N. (2009). Pairs selection and outranking: an application to the S&P 100 index. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 819-825.
- Huck, N. (2010). Pairs trading and outranking: the multi-step-ahead forecasting case. *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1702-1716.
- Huck, N. (2019). Large data sets and machine learning: Applications to statistical arbitrage. *European Journal of Operational Research*, 278(1), 330-342.

- Huck, N., Afawubo, K. (2015). Pairs trading and selection methods: is cointegration superior? *Applied Economics*, 47(6), 599-613.
- Israeli, D., Lee, C.M.C. ve Sridharan, S.A. (2017). Is there a dark side to exchange traded funds? An information perspective. *Review of Accounting Studies*, 22(3), 1048-1083.
- Jacobs, B.I., Levy, K.N. (2005). *Market Neutral Strategies*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Jacobs, H., Weber, M. (2016). Losing sight of the trees for the forest? Attention shifts and pairs trading. *Quantitative Finance*, 16(11), 1679-1693.
- Jegadeesh, N., Titman, S. (1993). Returns to buying winners and selling losers: Implications for stock market efficiency. *Journal of Finance*, 48, 65-91.
- Jegadeesh, N., Titman, S. (2001). Profitability of momentum strategies: An evaluation of alternative explanations. *Journal of Finance*, 56(2), 699-720.
- Kirilenko, A., Kyle, A.S., Samadi, M. ve Tuzun, T. (2017). The flash crash: High-frequency trading in an electronic market. *Journal of Finance*, 72(3), 967-998.
- Krauss, C. (2017). Statistical arbitrage pairs trading strategies: Review and outlook. *Journal of Economic Surveys*, 31(2), 513-545.
- Lakonishok, J., Shleifer, A. ve Vishny, R.W. (1994). Contrarian investment, extrapolation, and risk. *Journal of Finance*, 49(5), 1541-1578.
- Lehoczky, J., Schervish, M. (2018). *Statistical arbitrage*. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online.
- Leung, T., Nguyen, H. (2019). Constructing cointegrated cryptocurrency portfolios for statistical arbitrage. *Studies in Economics and Finance*, 36(3), 581-599.
- Liew, R.Q., Wu, Y. (2013). Pairs trading: A copula approach. *Journal of Derivatives & Hedge Funds*, 19(1), 12-30.
- Loggie, K. (2008). Volatility arbitrage indices- a primer. SSRN Working Paper. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1321707>
- Mayordomo, S., Pena, J.I. ve Romo, J. (2014). Testing for statistical arbitrage in credit derivatives markets. *Journal of Empirical Finance*, 26, 59-75.
- McLean, R.D., Pontiff, J. (2016). Does publishing research destroy stock return predictability? *Journal of Finance*, 71(1), 5-32.
- Menkveld, A.J. (2013). High frequency trading and the new market makers. *Journal of Financial Markets*, 16(4), 712-740.
- Miao, G.J. (2014). High frequency and dynamic pairs trading based on statistical arbitrage using a two-stage correlation and cointegration approach. *International Journal of Economics and Finance*, 6(3), 96-110.
- Moskowitz, T., Grinblatt, M. (1999). Do industries explain momentum? *Journal of Finance*, 54(4), 1249-1290.

- Nagel, S. (2012). Evaporating liquidity. *Review of Financial Studies*, 25(7), 2005-2039.
- Novy-Marx, R., Velikov, M. (2022). Assaying anomalies. NBER Working Paper No. 28099.
- Önalın, Ö. (2009). Vasicek ve CIR modelleri kullanılarak oynaklık ve faiz oranlarının modellenmesi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 27.
- Pole, A. (2007). *Statistical Arbitrage: Algorithmic Trading Insights and Techniques*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Rad, H., Low, R.K.Y., Faff, R. (2016). The profitability of pairs trading strategies: Distance, cointegration and copula methods. *Quantitative Finance*, 16(10), 1541-1558.
- Shleifer, A., Vishny, R.W. (1997). The limits of arbitrage. *Journal of Finance*, 52(1), 35-55.
- Stambaugh, R.F., Yuan, Y. (2017). Mispricing factors. *Review of Financial Studies*, 30(4), 1270-1315.
- Sutherland, I., Jung, Y. ve Lee, G. (2018). Statistical arbitrage on the KOSPI 200: An exploratory analysis of classification and prediction machine learning algorithms for day trading. *Journal of Economics and International Business Management*, 6(1), 10-19.
- Tokat, E., Hayrullođlu, A.C. (2022). Pairs trading: is it applicable to exchange-traded funds? *Borsa İstanbul Review*, 22(4), 743-751.
- Vidyamurthy, G. (2004). *Pairs Trading: Quantitative Methods and Analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Zhan, B., Zhang, S., Du, H.S. vd. (2022). Exploring statistical arbitrage opportunities using machine learning strategy. *Computational Economics*, 60, 861-882.
- Zhang, M., Tang, X., Zhao, S., Wang, W. ve Zhao, Y. (2022). Statistical arbitrage with momentum using machine learning. *Procedia Computer Science*, 202, 194-202.