

Sporda Genetik, Performans ve Yaralanma: Moleküler Temellerden Uygulamaya Bütüncül Yaklaşım

Editörler: Doç. Dr. Murat Tutar
Doç. Dr. Akan Bayraktar



Sporda Genetik,
Performans ve Yaralanma:
Moleküler Temellerden
Uygulamaya Bütüncül
Yaklaşım

Editörler:

Doç. Dr. Murat Tutar

Doç. Dr. Akan Bayrakdar



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

Sporda Genetik, Performans ve Yaralanma: Moleküler Temellerden Uygulamaya Bütüncül Yaklaşım

Editörler: Doç. Dr. Murat Tutar • Doç. Dr. Akan Bayrakdar

Language: Turkish

Publication Date: 2026

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8998-76-4

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1300>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Tutar, M. (ed), Bayrakdar, A. (ed) (2026). *Sporda Genetik, Performans ve Yaralanma: Moleküler Temellerden Uygulamaya Bütüncül Yaklaşım*. Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1300>. License: CC-BY-NC 4.01

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>



Önsöz

Bu kitap, spor bilimlerinde genetik temeller ile performans ve yaralanma süreçleri arasındaki çok katmanlı ilişkileri bütüncül bir bakış açısıyla ele almaktadır. Moleküler biyoloji, ekstraselüler matriks yapıları ve genetik düzenleyicilerin rolü, güncel bilimsel veriler ışığında incelenirken; antrenman bilimi kapsamında mikro dozlama gibi yenilikçi yaklaşımlar da uygulama boyutuyla tartışılmaktadır. Performansın belirlenmesinde genetik yatkınlıkların sınırları ve çevresel etkileşimler değerlendirilmekte, özellikle yumuşak doku yaralanmalarının oluşumunda genetik faktörlerin etkisi derinlemesine analiz edilmektedir. Bu eser, araştırmacılar ve uygulayıcılar için disiplinler arası bir referans sunmayı amaçlamaktadır.

İçindekiler

Önsöz iii

Bölüm 1

Sporda Genetik ve Darbeye Bağlı Olmayan Yumuşak Doku Yaralanmaları
İlişkisi Üzerine 2026 Güncellemesi: *GDF5* Gen Polimorfizm İncelemesi 1
Sedat Kahya

Bölüm 2

Sezon İçi Milli Takım Aralarında Mikro Dozlama Temelli Dayanıklılık
Antrenmanlarının Performans Üzerine Etkileri 25
Murat Tutar

Bölüm 3

Sporda Genetik Testler Performans İçin Belirleyici Midir? 43
Sedat Kahya
Akan Bayraktar

Bölüm 4

Ekstraselüler Matriks ve Genetik Düzenleyicilerin Spor Yaralanmalarına
Etkisi 61
Cihad Onur Kurhan
Recep Aydemir

Sporda Genetik ve Darbeye Bağlı Olmayan Yumuşak Doku Yaralanmaları İlişkisi Üzerine 2026 Güncellemesi: *GDF5* Gen Polimorfizm İncelemesi

Sedat Kahya¹

Özet

Günümüzde sporun artan popülaritesi ve sağlığa ilişkin birtakım endişeler, spor yaralanmalarının sayısında artışa sebep olmuştur. Spor yaralanmaları üzerinde etkili olabilecek içsel ve dışsal birçok bulunmasına rağmen genetik, darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları için önemli bir biyolojik bir markır olabilir. Literatürde, bu yaralanmaların kalıtsal mekanizması bazı spesifik gen varyantları ile açıklanmış olup, daha farklı genlere ait özellikler yeteri kadar incelenmemiştir. Mevcut çalışma, sporda genetik ve darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları ilişkisine yönelik literatür kapsamında yapılan güncel araştırmaları *GDF5* gen özelinde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada, NCBI veri tabanında bulunan PubMed ve PubMed-Central arama motorları detaylı bir şekilde incelenmiştir. İlgili arama motorlarına “spor ve genetik ilişkisi”, “sporda darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları” ve “*GDF5* geni ve spor yaralanmaları” anahtar kelimeleri yazılarak elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Mevcut çalışmada, sportif performans üzerinde genetiğin etki gücüne sahip olabileceği tespit edilmiştir. Bu sebeple, darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmalarında bazı genler önemli regülatörler olabilir. Ayrıca *GDF5* rs143383 polimorfizmi yumuşak dokuların yapısal bütünlüğünü etkileyerek hem sporcuları hem de sedanter bireyleri doku hassasiyetine karşı duyarlı hale getirebilir. Sonuç olarak, spor performansı üzerinde genetik faktörler henüz gelişimsel bir aşamadır. Bu alana yönelik daha fazla çalışmanın yapılması gerekmektedir.

1 Dr., Millî Eğitim Bakanlığı, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1169-2642>
sedatkayha58@gmail.com

Giriş

Sporcular, spor yaşamlarının bazı bölümlerinde, mücadele ettikleri alanlarda bazı istenmeyen durumlarla karşı karşıya gelebilmektedir. Bu doğrultuda, bir sporcu performansla dair elde ettiği beceriyi spor yaşamı boyunca maksimal seviyede ve herhangi bir aksaklığa uğramadan sürdürmesi olası bir durum değildir. Bu bakımdan, spor yaralanmaları performansın sınırlarını belirlemede ve sporcunun spora devam etmesinde kritik bir role sahiptir. Spor yaralanmaları, kompleks bir karakteristiğe sahip olmasına rağmen genel anlamda antrenmanlarda ve müsabakalarda ilgili spor branşındaki teknik becerilerin yetersizliği, ekipman desteğinde yaşanan olumsuzluklar ve vücudun aşırı zorlanması gibi durumlarda meydana gelmektedir (Elmagd, 2016). Günümüzde, sporun artan trendi ve sporculardan beklenen yüksek performans spor yaralanmalarının meydana gelmesinde önemli bir sebep olarak gösterilmekte ve çoğunlukla da bu durum ortopedik olarak değerlendirilmektedir (Guo ve ark., 2021; Aksović ve ark., 2024).

Spor yaralanmaları, sporcuları fiziksel ve ruhsal açılardan farklı seviyelerde etkileyerek onların spora dönüş süreleri üzerinde anahtar bir role sahip olabilir. Ancak spor yaralanmaları, sporcuları yalnız fiziksel ve ruhsal olarak etkileyen olumsuz bir durum değil o aynı zamanda mevcut iş gücü potansiyeline ayrılan zamanın kaybolmasına ve birtakım finansal sorunların ortaya çıkmasına da sebep olan bir olgu olabilir (Mechelen, 1997).

Spor yaralanmaları üzerinde içsel ve dışsal birçok faktör, etki düzeyine bağlı olarak, sporcu/sporcuları farklı şekillerde etkileyebilmektedir. Özellikle literatür kapsamında spor yaralanmalarına etki eden faktörler incelendiğinde, bazı faktörlerin yetersiz kanıt/kanıtlar teşkil ettiği bazılarının da konuyu tek boyutlu bir değerlendirmeye tabi tuttuğu görölmektedir. Bu bulgular haricinde, diğer birçok çalışmanın ise yaralanma sonrası tedavi üzerine yoğunlaştığı raporlanmıştır (Alorfi, 2026; Sharma ve ark., 2026; Zhang ve ark., 2026). Ayrıca bu çalışmalarda, özellikle dış faktörler üzerinde fazlaca araştırılan bir husus olmuştur (Bayraktar ve Kurtoğlu, 2009). Ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda, genetik faktörlerin spor yaralanmaları üzerinde önemli bir sebep olabileceği düşünölmeye başlanmıştır (Mikkelsen ve 2006; Maestro ve ark., 2022; Varillas-Delgado ve ark., 2023; Liu ve ark., 2025). Bu çalışmalarda, yaralanmalara karşı yumuşak dokuların oluşturduğu hassasiyet, genetik olarak incelenmiş ve yumuşak dokuların kolajen formasyonlarına etki eden gen polimorfizmleri alel ve genotip olarak ortaya çıkarılmıştır (Williams ve ark., 2016; Wang ve ark., 2017; Miyamoto-Mikami ve ark., 2019; Gutiérrez-Hellín ve ark., 2021).

Bu bilgiler ışığında mevcut çalışma, sporda genetik ve darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları ilişkisine yönelik literatür kapsamında yapılan güncel araştırmaları *GDF5* gen özelinde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın spor bilimlerine önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Yöntem

Mevcut çalışma geleneksel derleme tarzında dizayn edilmiştir. Bu amaçla, NCBI (National Center for Biotechnology Information) veri tabanında bulunan PubMed ve PubMed-Central arama motorları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca genlerin dokulardaki ifade düzeyini belirlemede, GeneCards, GTEX (The Genotype-Tissue Expression), Illumina, BioGPS ve SAGE (Serial Analysis of Gene Expression) veri tabanlarından yararlanılmıştır. PubMed ve PubMed-Central arama motorlarına/veri tabanlarına “spor ve genetik ilişkisi”, “sporda darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları” ve “*GDF5* geni ve spor yaralanmaları” anahtar kelimeleri yazılarak elde edilen veriler çalışma kapsamında kullanılmıştır. Çalışmada, PubMed verileri indekslemek için NIH (National Library of Medicine) veri tabanında bulunan MeSH (Medical Subject Headings)’den yararlanılmıştır. MeSH, PubMed veri tabanında yer alan makalelerin indekslenmesinde kullanılan NLM kontrollü eş anlamlılar sözlüğüdür. Çalışma kapsamında yalnız NCBI veri tabanından faydalanılmıştır. Bu durum üzerinde, NCBI’nin biyomedikal ve genomik bilgilere geniş çaplı erişim sağlayan büyük bir veri platformu olması önemli bir sebeptir.

Verilerinin Seçimi

Çalışmada, epidemiyolojik araştırma türlerinden; gözlemsel çalışmalar, vaka-olgu çalışmaları, kesitsel (Cross-Sectional Studies) ve kohort türünde yapılmış çalışmalar ile geleneksel ve sistematik-meta analiz verileri değerlendirilmiştir. Gözlemsel çalışmalardan elde edilen verilerin kullanılmasında genlerin popülasyon içerisindeki dağılımları dikkate alınmıştır. Bu amaçla, HWE (Hardy-Weinberg Equilibrium) eşitliğine uygun makaleler mevcut çalışma kapsamında kullanılmıştır. HWE, göç ve seçim etkileri olmaksızın büyük ve rastgele eşleşen bir popülasyonda mutasyon oranının ve genotip sıklığının nesiller boyunca sabit kaldığını varsayan bir yasadır (Edwards, 2008). Çalışma verilerine ait detaylar aşağıda Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışma Kapsamında Elde Edilen Verilerin Betimleyici Özellikleri

Veri Tabanı	Anahtar Kelimelere ilişkin çalışmaların sayısı		
NCBI	Relationship between sports and genetics	Non-impact soft tissue injuries in sports	GDF5 gene and sports injuries
PubMed	3.119	46	6
PubMed-Central	86.101	14.089	245
Toplam	89.300	14.135	251

Sportif Performansı üzerinde Etkili Faktörler ve Spor Yaralanmalarının Etiyolojisi

Sportif performans birçok faktörden etkilenme potansiyeline sahip çok boyutlu ve kompleks bir fenomendir. Bu sebeple, spor performansını tek bir boyuttan değerlendirmek mümkün değildir. Spor performansını etkileyen faktörler, sporcunun performansı üzerinde farklı seviyelerde etki gücüne sahip olabilir. Bu durumu bir örnekle açıklamak gerekirse, sporcuların tükettikleri besin maddelerini enerjiye dönüştürme sürecinde onların sahip olduğu biyolojik özellikler metabolizmada bireysel farklılıklara göre etkinlik gösterebilir. Ayrıca sporcuların aynı beceri düzeyinde, benzer antrenman yüklerine maruz kalmalarında bile sporcular arasında önemli performans farklılıkları meydana gelebilmektedir. Ancak sporcuların sahip olduğu hangi özelliklerin (psikolojik, fizisel, fizyolojik, vb.), daha baskın olduğu konusunda net bir sınır halen çizilememiştir. Bu doğrultuda, son yıllarda birçok araştırmacı sportif performans üzerinde fiziksel becerilerin mi ? yoksa psikolojik özelliklerin mi ? daha baskın sorusuna yanıt aramaya başlamışlardır (Humińska-Lisowska, 2024).

Performans üzerinde etkili faktörler dikkatli bir şekilde analiz edildiğinde, sportif başarının önünde içsel-dışsal kaynaklı birçok engelin olduğu görülmektedir. Bu engellerden birisi olan spor yaralanmaları, hem sporcuların ilgili olduğu spor müsabakalarından uzak kalmalarına hem de onların tekrar yaralanma riskiyle karşı karşıya kalmalarına sebep olabilmektedir (Koshy ve ark., 2025). Ayrıca bu yaralanmalar, sporcuların kariyerlerinin başlamadan bitmesi adına da büyük bir engeldir (Guo ve ark., 2022). Spor yaralanmaları üzerinde etki gücüne sahip birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler intrinsek (iç) ve ekstrinsek (dış) olarak kategorize edildiğinde, intrinsek faktörler; yaş, cinsiyet, yaralanma geçmişi, vücut boyutu, lokal anatomi ve biyomekanik, aerobik fitness, kas kuvveti, dengesi ve sıklığı, ligamentlerin hareketliliği, merkezi motor kontrolü, psikolojik faktörler, psiko-sosyal faktörler, genel

zihinsel beceri; ekstresek faktörler ise antrenmanın türü, sıklığı, miktarı, antrenör, spor yapılan alan, spor malzemesi, koruyucu ekipman, hava durumu, sezon zamanı, takım arkadaşları, hakem, taraftar, vb. sıralanabilir (Taimela ve ark., 1990; Parkkari ve ark., 2001; Kerssemakers ve ark., 2009). Spor yaralanmalarını etkileyebilecek faktörler karşılaştırıldığında, dışsal faktörlerin içsel faktörlere göre nispeten daha kontrol edilebilir bir özelliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, spor yaralanmalarının önlenmesi ve oluşabilecek maddi ve manevi kayıpların azaltılması bakımından büyük önem arz etmektedir. Spor yaralanmalarında, özellikle dışsal faktörlerin düzenlenebilir bir yapıda olması zamanla bilim insanlarının ilgisini içsel faktörler üzerine yoğunlaştırmıştır. Bu amaçla, ilginin dikkat çekici bir seviyede olduğu genetik spor yaralanmalarının kalıtsal mekanizmasının araştırıldığı alanlardan biri haline gelmiştir. Yapılan çalışmalar, genetiğin spor performansı ve yaralanmaları üzerinde düzenleyici bir özelliğe sahip olduğunu göstermiştir (Ebert ve ark., 2023; Marrouh ve ark., 2025).

Sporda Genetik Etki

İnsan DNA'sını araştırmaya yönelik faaliyetlerin sayısında yaşanan artışlar, zamanla bu alana yönelik ilginin artmasına sebep olmuştur. Bu doğrultuda, 1990 yılında başlayan ve 2003 yılında tamamlanan İGP (İnsan Genom Projesi), insanlık tarihi için bir dönüm noktası olmuştur. İGP, başta hastalıklar olmak üzere diğer birçok biyolojik özelliği haritalamayı amaçlayan uluslararası bir projedir (Tekpınar ve Erdem, 2019). Projede; İnsan Genomu'nun 3.164.700.000 nükleotitten meydana geldiği, gen sayısının ortalama 29.000 ile 36.000 arasında olduğu, insanlarda DNA diziliminin % 99.9 benzer olduğu ve yaklaşık olarak da 1.500.000 tek nükleotit polimorfizmleri (SNPs)'nin olduğu ortaya çıkarılmıştır (Başaran ve ark., 2010).

İGP'den elde edilen veriler, zamanla daha geniş alanlarda faaliyet göstermeye başlamıştır. Bu kapsamda, sportif performans üzerinde sıklıkla çalışılan alanlardan bir haline gelmiştir. Sportif performansla ilgili yapılan çalışmalar, üst düzey sporcu performansının binlerce saatlik antrenmanların sonucunda olacağını iddia etse de performans üzerinde sporcunun sahip olduğu kalıtsal özelliklerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulanmıştır (İlgün ve ark., 2020). Bu amaçla, yapılan çalışmalar genetiğin spor performansı üzerinde % 66'lık bir etkiye sahip olduğu göstermiştir (De Moor ve ark., 2007). Bu çalışmalarda, 140'dan fazla gen ile 250 genomik varyantın spor performansı ile doğrudan ilgili olduğu ortaya çıkarılmıştır (Psatha ve ark., 2024). Ayrıca bu çalışmalar, genetiğin dayanıklılıkla % 44-% 68 ve güçle de % 48-% 56 oranlarında ilgili olabileceğini raporlamıştır (Zempo ve ark., 2017; Miyamoto-Mikami ve ark., 2018). Ancak bu çalışmalar, her ne kadar da sporda genetiğin

büyük oranda etkili olduğunu iddia etsede, literatür kapsamında, bu alanda yapılan bazı çalışmalarda kanıtların yetersiz olduğu da vurgulanmaktadır (Kaynak ve ark., 2017). Bu çalışmalara rağmen, sporda genetiğin sporcu performansını kişiselleştirmesi, yaralanmalardan korunmaya öngörülse destek, sağlık risklerinin tespiti ve performans gelişimi gibi birçok faydalı etkiye sahip olduğu düşünülmektedir (Bıçakçı ve ark., 2024).

Sporda genetiğin etkisi üzerine yapılan çalışmaların, hem sayısının hem de niteliğinin artması bu alanın hızlı bir şekilde gelişmesine olanak sağlamıştır. Bu doğrultuda, sportif performansın biyolojik yapısını belirlemeye yönelik yapılan çalışmalar sonucunda bazı gen polimorfizmleri tespit edilmiştir. Bu genlere ait özellikler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur (Eynon ve ark., 2011; Pimenta ve ark., 2013; Baltazar-Martins ve ark., 2020; Tanisawa ve ark., 2020; Pranckeviciene ve ark., 2021; Ahmetov ve ark., 2022; Varillas-Delgado ve ark., 2022).

Table 2. Dayanıklılık ile İlişkili Genetik Varyantlar

Gen	Açıklama	Polimorfizm	Baskın Alel
<i>ACE</i>	Angiotensin-Converting Enzyme	a1u	I
<i>ACTN3</i>	Alpha Actinin 3	rs1815739	X
<i>AMPD1</i>	Adenosine Monophosphate Deaminase 1	rs176602729	T
<i>BDKRB2</i>	Bradikinin Reseptor Beta 2	+9/-9	-9
<i>CDKN1A</i>	Cyclin Dependent Kinase Inhibitor 1A	rs236448	A
<i>CK-MM</i>	Creatine Kinase, M-Type	rs8111989	A
<i>CYP2D6</i>	Cytochrome P450 Family 2 Subfamily D Member 6	rs3892097	G
<i>HFE</i>	Homeostatic Iron Regulator	rs1799945	G
<i>HIF1A</i>	Hypoxia Inducible Factor 1 Subunit Alpha 1	rs11549465	C
<i>MCT1</i>	Monocarboxylate Transporter 1	rs1049434	T
<i>MYBPC3</i>	Myosin Binding Protein C3	rs1052373	G
<i>NFIA-AS2</i>	NFIA Antisense RNA 2	rs1572312	C
<i>NOS3</i>	Nitric Oksit Sentaz 3	rs2070744	T
<i>PPARA</i>	Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Alpha	rs4253778	G
<i>PPARGC1A</i>	PPARG Coactivator 1 Alpha	rs8192678	G
<i>VEGFA</i>	Vascular Endothelial Growth Factor A	rs2010963	C

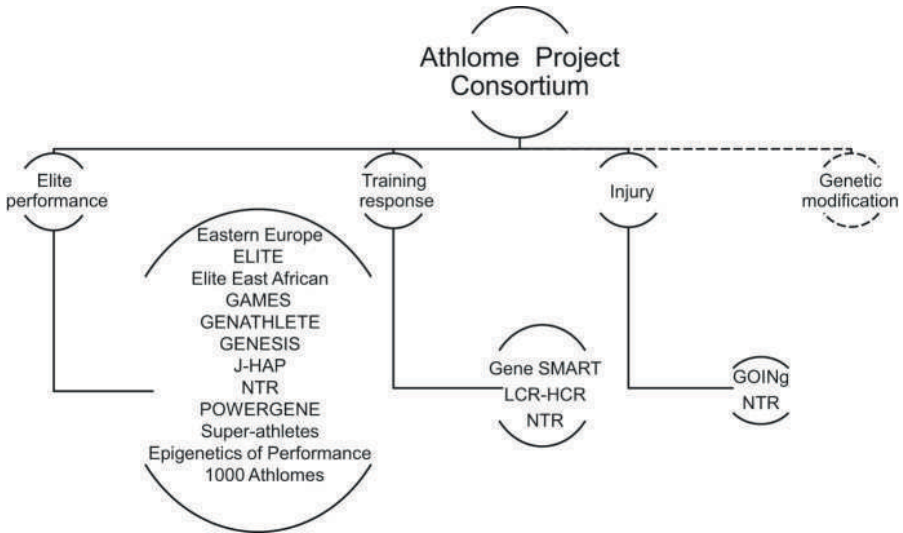
Sporun kalıtsal mekanizması ve spor becerisinin sporcuya sunduğu birtakım avantajlar dikkatli bir şekilde değerlendirildiğinde, bireyin doğuştan getirdiği özelliklerin ilgili spor branşı için önemli bir kriter olabileceği sonucu düşünülebilir. Ancak bu durum, sporcunun sadece sahip olduğu biyolojik alt yapısına göre değerlendirilebileceği anlamına da gelmemektedir. Çünkü sporda; dengeli ve düzenli beslenme, antrenman adaptasyonu, planlı ve düzenli antrenman uygulamaları, yüklenme ve hızlı toparlanma, motivasyon gibi spora özgü etmenlerin kritik bir öneme sahip olduğu bilinmektedir. Sportif başarıda, sporcunun antrenmanlara karşı geliştirdiği optimal psikolojik yapı, fizyolojik ve fiziksel dayanıklılık önemli olmasına rağmen spora özgü özelliklerin biyolojik temelleri dikkat çekicidir. Bu durum, özellikle sporda güç ve kuvvet becerilerinin baskın olduğu sporlarda daha belirgin bir hal almaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, sporda güç ve kuvvet becerisine yönelik bazı gen polimorfizmlerinin olduğu raporlanmıştır (Semenova ve ark., 2023; El Haddouchi ve ark., 2025).

Tablo 3. Güç ve Kuvvet ile İlişkili Genetik Varyantlar

Gen	Açıklama	Polimorfizm	Baskın Alel
<i>ACTN3</i>	Alpha Actinin 3	rs1815739	C
<i>AR</i>	Adrogen Receptor	≥21	CAG tekrarları
<i>AMPD1</i>	Adenosine Monophosphate Deaminase 1	rs17602729	C
<i>CDKN1A</i>	Cyclin Dependent Kinase Inhibitor 1A	rs236448	C
<i>CPNE5</i>	Copine 5	rs3213537	G
<i>GALNTL6</i>	PolypeptideN Acetylgalactosaminyltransferase Like 6	rs558129	T
<i>IGF2</i>	Insulin Like Growth Factor 2	rs680	G
<i>IGSF3</i>	Immunoglobulin Superfamily Member 3	rs699785	A
<i>LRPPRC</i>	Leucine Rich Pentatricopeptide Repeat Containing	rs10186876	A
<i>MDM4</i>	MDM4 Regulator Of P53	rs35493922	D
<i>MMS22L</i>	MMS22 Like, DNA Repair Protein	rs9320823	T
<i>NOS3</i>	Nitric Oxide Synthase 3	rs2070744	T
<i>PHACTR1</i>	Phosphatase And Actin Regulator 1	rs6905419	C
<i>PPARA</i>	Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Alpha	rs4253778	C
<i>PPARG</i>	Peroxisome Proliferator Activated Receptor Gamma	rs1801282	G
<i>TRHR</i>	Thyrotropin Releasing Hormone Receptor	rs7832552	T

Tablo 2 ve Tablo 3’de görüldüğü üzere, sportif performansın karakteristiği üzerinde bazı genler anahtar bir role sahip olabilmektedir.

Teknolojide yaşanan hızlı ilerlemelere paralel gelişen DNA dizileme yöntemleri, spora özgü spesifik gen varyantlarının kısa sürede ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Bu anlamda, yapılan çalışmalar spor performansını tek bir boyuttan değil birçok boyuttan değerlendirerek atletik performansın gelişimine ciddi katkılar sunmuştur. Başlarda birkaç gen dizileme yöntemiyle başlayan süreç, ilerleyen zamanlarda tüm genom dizilmesine kadar çeşitlilik göstermiştir. Özellikle GWAS (Genom-Wide Association Studies) çalışmaları sayesinde sportif performansla ilişkili genetik faktörler, ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır (Wang ve ark., 2024). Ayrıca uygulamasına 2015 yılında başlanan Athlome Project Consortium (APC)’da, GWAS gibi, spora özgü elit atletik performans ve yaralanma hassasiyeti gibi gen varyantlarını belirlemede önemli uygulamalardan biri olmuştur (Terekhov ve ark., 2025).



Şekil 1. Athlome Project Consortium

Athlome Project Consortium kapsamında; genomik, epigenomik, transkriptomik, proteomik ve metabolomik çalışmalar yürütülmektedir. Athlome Project Consortium, katılımcı merkezler tarafından 3 ana araştırma alanındaki soruları ele almak amacıyla yapılmaktadır. Bunlar; elit performans, antrenman tepkisi ve yaralanma üzerinedir. Ayrıca gelecekte planlanan araştırmalar için genetik modifikasyon çalışmaları da bu kapsamda yer almaktadır (Pitsiladis ve ark., 2015).

Spor genetiği araştırmalarına yönelik ilginin giderek artması bu alan ile ilgili yapılacak çalışmaların sayısında ciddi atışlar olacağını göstermektedir. Ancak spor genetiğine yönelik çalışmaların sayısında öngörülen artışa rağmen, bu çalışmaların spor performansını net bir Şekilde belirleyebilmesi Őimdilik çok da muhtemel değildir. Bu durum üzerinde, spor performansını etkileyen faktörlerin sayısı ve sahip olduğu kompleks yapı önemli bir sebep olabilir.

Spor da Yumuşak Doku Yaralanmaları

Sporun artan popülaritesi ve sağlıklı yaşam adına fiziksel aktiviteye karşı artan ilgi, zamanla birtakım endişeleri ortaya çıkartmıştır. Bu endişelerden biri olan yaralanmalar; yaralanma bölgesi ve doku yapısına göre farklı Şekillerde meydana gelmekte ve farklı Şekillerde de kategorize edilmektedir. Bunlardan biri olan yumuşak doku yaralanmaları; kas, tendon, fasya, ligament, bursa, kemik, kıkırdak, sinir ve damar gibi vücut dokularının hasar görmesi sonucu meydana gelen bir yaralanma türüdür (Xiong ve ark., 2025). Yaşadığımız dünyada yüksek bir prevalansa sahip yumuşak doku yaralanmaları, insanların sıklıkla sağlık hizmeti aldıkları alanlardan biridir. Bu amaçla, Wenzinger ve ark. (2019)'nın Amerika Birleşik Devletlerinde acil servise başvuran hastalar üzerinde yaptıkları çalışmada, hastaların çoğunluğunun yumuşak doku yaralanmaları Őikayeti ile acil servise başvurduklarını raporlamışlardır.

Yumuşak doku yaralanmaları, bireyleri hem fiziksel hem de psikolojik olarak farklı düzeylerde etkilemektedir. Ancak bu yaralanmalar, her ne kadar da birey/ bireyleri fiziksel ve psikolojik olarak farklı Şekillerde etkilese de sebep olduğu maddi sorunlar ciddiye alınması gereken önemli bir husustur. Bu doğrultuda, Gorasso ve ark. (2023)'nın Belçika'da yaptıkları çalışmada 2018 yılında 2.5 milyon Belçikalı'nın en az bir kez yumuşak doku yaralanmalarına maruz kaldıklarını ve bu yaralanmaların doğrudan yıllık ortalama 3 milyar € luk, dolaylı olarak da 2 milyar € luk tıbbi masrafa sebep olduğunu tespit etmişlerdir. nemli ekonomik etkilere sahip yumuşak doku yaralanmaları, fiziksel olarak aktif bireylerde sık bir Şekilde görülmesine rağmen özellikle sporcu/sporcularda yüksek bir insidansa sahiptir (Dou, 2025; Meena ve ark., 2025; Tarnowski ve ark., 2022). Torrejn ve ark. (2024)'nın 2018-2019 sezonunda İşpanya La Liga'da 20 futbol kulübü ile yaptığı çalışmada, yumuşak doku yaralanmaları için her kulübün her ay ortalama 365.811 € luk bir maddi yükle yüzleşmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu yaralanmalar sonucunda, sporcu/sporcular fiziksel hareketsizliğe bağlı olarak birtakım sıkıntılara da maruz kalmaktadır. Özellikle bu durum, sporcu/sporculara tedavi süreleri boyunca yapılan tıbbi bakım hizmetleri bakımından önemli maddi sonuçlar doğurmaktadır. Bu amaçla, Ding ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada fiziksel inaktivitenin % 0.3 ile % 4.6 arasında değişen sağlık bakım hizmeti maliyetlerine sebep olduğunu

raporlamışlardır. Bu veriler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, sporda yumuşak doku yaralanmalarının önemli bir sağlık sorunu olduğu görülmektedir.

Farklı oluşum mekanizmalarına sahip yumuşak doku yaralanmalarının; genel itibarıyla, düşme, çarpma, aşırı kullanım ve zorlama gibi nedenlerle meydana geldiği bilinmektedir. Yumuşak doku yaralanmaları, “darbeye bağlı olmayan” ve “darbeye bağlı” şeklinde farklılaşan bir karakteristiğe sahiptir. Literatürde, darbeye bağlı oluşan yumuşak doku yaralanmaları ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, yumuşak doku yaralanmalarına sebep olan faktörler etiyolojik olarak çeşitli düzeylerde ve kanıtlara ilişkin verilerle açık bir şekilde gösterilmektedir. Ancak darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmalarının altında yatan gizli kalmış bazı mekanizmalar halen araştırma konusudur (Pruna ve ark., 2013).

Sporda Yumuşak Doku Yaralanmaları ve Genetik İlişkisi

Son yıllarda yapılan çalışmalar, kalıtsal faktörlerin yumuşak doku yaralanmalarında kritik bir öneme sahip olduğunu raporlamıştır. Bu anlamda, genetik faktörler yumuşak dokuların fonksiyonunu etkileyerek bireysel farklılıklara bağlı mekanik yükleri önemli ölçüde etkileyebilir (Leońska-Duniec, 2025). Ayrıca genetik, tendon ve ligament gibi yumuşak dokuların yaralanma riskini artırıp, aynı oranda azaltabilen bir potansiyele sahip olabilir (Ribbans ve ark., 2022; Sun ve ark., 2025) Bu alan kapsamındaki araştırmalar neticesinde, yumuşak doku yaralanmalar ile ilgili yaklaşık olarak 124 tek nükleotid polimorfizmi (SNPs) tespit edilmiştir (Goodlin ve ark., 2015). Yumuşak dokular üzerinde, etkili olduğunu düşünülen bazı genler aşağıda gösterilmektedir (Gibbon ve ark., 2017; Clos ve ark., 2019; John ve ark., 2020; Hall ve ark., 2022).

Tablo 4. Yumuşak Doku Yaralanmaları ile İlişkili Genetik Varyantlar

Gen	Tanımlama	Polimorfizm	Baskın Genotip
<i>ACTN3</i>	Alpha Actinin 3	rs181539	RR
<i>COL1A1</i>	Collagen Type I Alpha 1 Chain	rs1800012	GG
<i>COL5A1</i>	Collagen Type 5 Alpha 1 Chain	rs12722	CC
<i>VEGFA</i>	Vascular Endothelial Growth Factor A	rs2010963	CC
<i>IL6</i>	Interleukin 6	rs1800795	CC
<i>EMILIN1</i>	Elastin Microfibril Interfacer 1	rs2289360	CC
<i>MCT1</i>	Monocarboxylate Transporter 1	rs1049434	AA
<i>MMP3</i>	Matrix Metallopeptidase 3	rs3025058	6A/6A

Tablo 4'te görüldüğü üzere genetik faktörler, yumuşak doku yaralanmalarında belirleyici bir misyona sahip olabilir. Bu durum, yumuşak dokuların yapısal bütünlüğünde, özellikle ekstraselüler matrikste, birtakım etkileri uyararak birey/bireyleri yaralanmalara karşı daha duyarlı hale getirebilir. *COL5A1* rs12722 polimorfizmi ile ilgili yapılan çalışmalarda, C>T transisyonunun bireyleri yumuşak dokuları yaralanmamaları karşısında daha duyarlı hale getirdiği raporlanmıştır. Bu doğrultuda, gen polimorfizmleri yumuşak doku yaralanmaları üzerinde düzenleyici bir etkiye sahip olabilir (Ebert ve ark., 2023). Sporda darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları ve genetik ilişkisine yönelik literatürde yapılan bazı çalışmalarda, Sun ve ark. (2025) spor yaralanmalarının genetik faktörlerden etkilenen multifaktöriyel bir özellik olduğunu belirtmişlerdir. Manchón-Davó ve ark. (2025) yaptıkları çalışmada, genetik faktörlerin darbeye bağlı olmayan spor yaralanmalarında kritik bir role sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Brazier ve ark. (2025), bazı gen varyantlarının yumuşak dokular üzerinde hassasiyet oluşturarak darbeye bağlı olmayan doku yaralanmalara sebep olabileceğini raporlamışlardır. Jacob ve ark. (2022)'nin futbolcularda yaptıkları çalışmada, gen polimorfizmlerinin darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmalarında önemli regülatörler olabileceğini tespit etmişlerdir. Hall ve ark. (2022), darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmalarının genetik faktörlerden etkilenen bir özelliğe sahip olduğunu bildirmişlerdir. Rzeszutko-Belzowska ve Leońska-Duniec (2026)'nın çalışmalarında, kas-iskelet yumuşak doku yaralanmaları üzerinde gen varyantlarının kritik rol oynayabileceğini raporlamışlardır. Bir diğer çalışmada ise Varillas-Delgado ve ark. (2022), gen polimorfizmlerinin darbeye bağlı olmayan kas yaralanmalarında dikkate alınması gereken önemli bir husus olduğunu belirtmişlerdir. Literatür taraması sırasında, bu çalışma sonuçlarının aksine genetiğin darbeye bağlı olmayan spor yaralanmaları üzerindeki etkisinin deneysel bir aşamada olduğunu belirten çalışma sonuçlarına da rastlanmıştır. Bu amaçla, Borzemska ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada genetiğin darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmalarını tahmin edebilmede erken bir gelişim dönemi içerisinde olduğunu bildirmişlerdir.

GDF5 (Growth Differentiation Factor 5) Geni

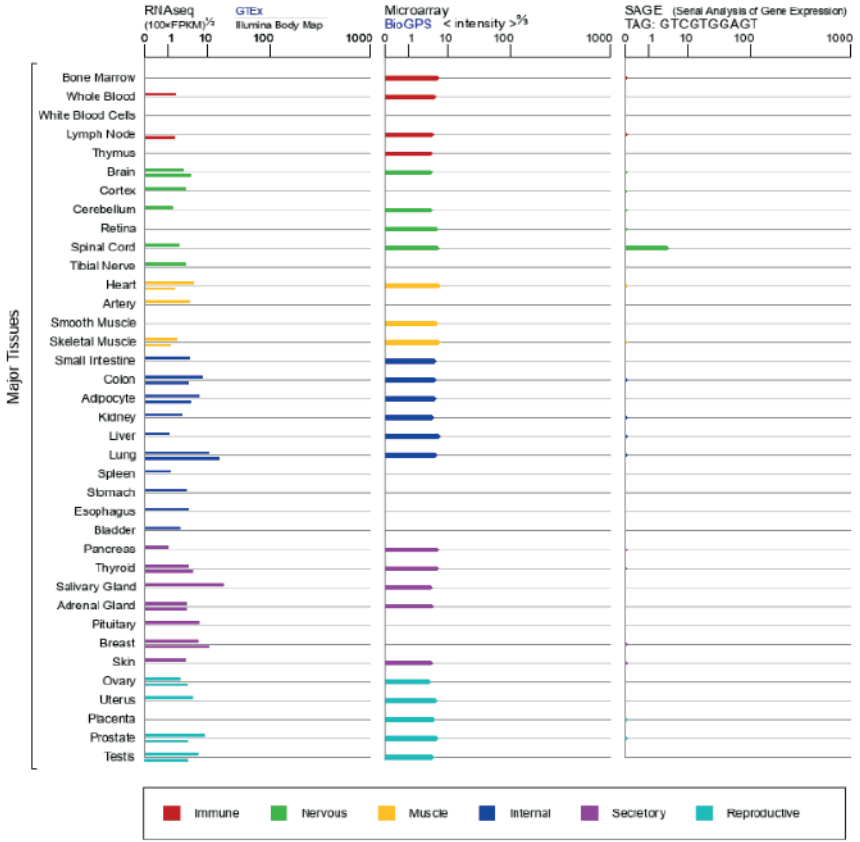
TGF- β (Transforming Growth Factor β) süper ailesine bağlı GDF5 proteini, *GDF5* geni tarafından kodlanmaktadır (Flore ve ark., 2023). *GDF5* geni, 20 nolu kromozomun q11.22 uzun kolunda lokalizedir. *GDF5* genine ilişkin farklı veri tabanlarında yer alan sitogenetik bantlar aşağıda sunulmuştur. (GeneCards, 2026).

Tablo 5. GDF5 Genine Ait Farklı Veri Tabanlarında Kayıtlı Sitogenetik Bantlar

HGNC	NCBI Gene	Ensembl
20q11.22	20q11.22	20q11.22

Kısaltmalar: HGNC: HUGO Gene Nomenclature Committee, NCBI: National Center for Biotechnology Information.

GDF5, embriyonik süreçte, iskelet gelişime paralel eklemler arası boşluklarda ifade edilen bir proteindir (Storm ve ark., 1994). GDF5 proteini, kıkırdak dokudan türetilmiş morfogenezik protein 1 (CDMP-1) ve kemikten türetilmiş morfogenezik protein 14 (BMP-14)'den meydana gelmektedir (de Aro ve ark., 2018). Bu protein, organizmanın gelişimine bağlı olarak, tendon ve ligament gibi yumuşak dokular üzerinde düzenleyici bir etkiye sahiptir (Zhang ve ark., 2024). Bu durum, tendonların ve ligamentlerin formasyonunda GDF5 proteininin bir sinyal molekülü olarak işlev göstermesiyle açıklanmaktadır (Wolfman ve ark., 1997). Ayrıca GDF5, yalnız tendon ve ligamentlerde değil aynı zamanda menüsküslerin gelişimi ve sağlığı için de önemli bir proteindir (Mazy ve ark., 2025). Çok boyutlu yapısal bir protein olan GDF5, organizmada farklı şekillerde ifade edilmektedir. Aşağıda Şekil 2 'de GDF5 proteinin, ilgili dokularda bulunma oranları gösterilmektedir (GeneCards, 2026).



Şekil 2. *GDF5* Genin Vücutta İfade Edilme Düzeyleri

Şekil 2 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, bu proteinin birçok dokuda temsil edildiği görülmektedir. Bu durum üzerinde, *GDF5* proteininin embriyonik gelişim sırasında oluşturduğu mezenkimal yoğunlaşma etkili faktörlerden biridir (Ciardulli ve ark., 2020).

GDF5 Geni ve Yumuşak Doku İlişkisi

Genler, sentezlediği proteinler sayesinde, yumuşak dokuların gelişimini ve yapısal oluşumlarını etkileme potansiyeline sahip biyolojik yapılardır. Yumuşak dokular üzerinde etki potansiyeline sahip birçok gen polimorfizmi bulunmaktadır (Willard ve ark., 2020). Yumuşak dokular ile ilgili olarak sıklıkla araştırılan *COL1A1* geni ile ilgili yapılan çalışmalarda, *COL1A1* rs1800012 polimorfizmin birinci introndaki kritik lokasyonun gen ifadesini artırdığı ve bu sayede tendon ve ligamentlerin yaralanma hassasiyetini etkilediği tespit edilmiştir (Wang ve ark., 2017; Naomi ve ark., 2021). Yumuşak doku

formasyonu üzerinde etkili olduğu düşünülen bir diğer gen ise *GDF5*'dir. *GDF5* geni, hem embriyonik dönem itibariyle hücre gelişiminde hem de olgun dokularda sıklıkla ifade edilmektedir.

Literatür incelemesi sırasında, *GDF5* geni ve yumuşak doku ilişkisine yönelik bazı çalışmalara rastlanmıştır. Bu doğrultuda, Syddall ve ark. (2013)'nın çalışmalarında, *GDF5* rs143383 T alelinin kas-iskelet yaralanmaları ile ilişkili olduğunu raporlamışlardır. Bir diğer çalışmada ise Kubo ve ark. (2013), tendon yapısının mekanik özellikleri üzerinde *GDF5* rs143383 polimorfizmin diz ekstansörleri ve plantar fleksörlerde anlamlı farklılıklar oluşturduğunu bildirmişlerdir.

GDF5, yalnız dokularda ifade edilen bir protein değil o aynı zamanda eklemlerde de düzenli fonksiyon gösteren bir proteindir. Bu amaçla, Egli ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada *GDF5* rs143383 polimorfizmin alel ifadesi bakımından tüm dokularda farklılığa sebep olduğu ve düzenlenmiş fonksiyonel etkinin daha çok eklemlerde bulunduğunu tespit etmişlerdir.

Literatür taraması sırasında, *GDF5* geni ve yumuşak doku hastalıkları ile ilişkili olabilecek bazı çalışmalara rastlanmıştır. Bu doğrultuda, Huang ve ark. (2018)'nin yaptıkları çalışmada *GDF5* rs143383 polimorfizmin kas-iskelet dejeneratif hastalıkları ile ilişkili olduğunu raporlamışlardır. Harsanyi ve ark. (2021)'nin çalışmalarında, *GDF5* rs143383 polimorfizmi T aleli ile gelişimsel kalça displazisi arasında ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Wang ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada, *GDF5* rs143383 polimorfizmi ile osteoarthritis arasında yakın bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Styrkarsdottir ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, *GDF5* rs143383 polimorfizminin osteoarthritis ile ilişkili olduğuna dair kanıtlar bulmuşlardır. Bir diğer çalışmada ise Yan ve ark. (2021), *GDF5* genin cerrahi sonrası kronik ağrıyı artıran potansiyel bir risk faktörü olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmalardan elde edilen bu sonuçlar üzerinde, *GDF5* genin kodladığı protein anahtar bir role sahip olabilir (Takahata ve ark., 2022).

***GDF5* Geni ve Sporda Yumuşak Doku Yaralanmaları İlişkisi**

Omiks teknolojilerde yaşanan gelişmeler ve insan genomunun dizilemesine yönelik artan talepler, atletik performansın altında yatan moleküler mekanizmaların belirlenmesine yeni fikirler vermiştir (Malsagova ve ark., 2021). Bu alanda yapılan çalışmalar neticesinde, sportif performansın altında yatan gizli özellikler yavaş yavaş ortaya çıkartılmaya başlamıştır. Bu doğrultuda, darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmalarına ilişkin birçok gen varyantı belirlenmesine rağmen bazı genlerle ilgili çalışmaların hala eksikliğini sürdürdüğü görülmektedir. Bunlardan birisi olan *GDF5* geni, sporda darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmalarında kritik bir öneme sahip olabilir.

Literatür kapsamında yapılan değerlendirme sonucunda, *GDF5* geni ve darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları ile ilişkili olabilecek bazı çalışmalara ulaşılmıştır. Bu doğrultuda, McCabe ve Collins (2018)'in futbolcularda yaptıkları çalışmada, *GDF5* rs143383 TT genotipi ile ayak bileği ve diz yaralanmaları arasında ilişki olduğunu raporlamışlardır. Raleigh ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada, *GDF5* rs143383 polimorfizmin darbeye bağlı olmayan ön çapraz bağ kopukları ile ilişkili olabileceğini tespit etmişlerdir. Chen ve ark. (2015)'nin çalışmalarında, *GDF5* +104 T/C polimorfizmin darbeye bağlı olmayan ön çapraz bağ yaralanmaları ile ilişkili olabileceğini bildirmişlerdir. Bir diğer çalışmada, Abboud ve ark. (2026) *GDF5* rs143383 polimorfizmi ile stres kırıkları arasında anlamlı düzeyde ilişkili olduğunu raporlamışlardır.

Sonuç

Mevcut çalışma, sporda genetik ve darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları ilişkisi literatür kapsamında yapılan güncel araştırmalar aracılığıyla incelenmiş ve bu yaralanmaların biyolojik mekanizması üzerinde *GDF5* genin etkisi spesifik olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, spor ve genetik ilişkiye yönelik birçok gen varyantı dikkatli bir şekilde incelenmiş ve spor performansının karakteristiğine uygun olarak bazı gen varyantlarının sporcular için avantajlı durumlar oluşturabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanmaları üzerinde intrinsek ve ekstrinsek birçok faktörün etkisine rağmen, kalıtsal faktörler hem sporcu hem de sedanter bireyler için önemli belirteçler olabilir. Çalışmada, kolajen yapıların homeostazisini düzenleyerek sporcuların darbeye bağlı olmayan yumuşak doku yaralanma hassasiyet düzeylerini etkileyebilecek birçok gen varyantının olduğu raporlanmıştır. Bunlardan biri olan *GDF5* geni, yumuşak dokular üzerinde önemli bir regülatör olabilir. Ancak mevcut çalışmada, *GDF5* geni ve sporda darbeye bağlı olmayan yaralanmalar ilişkisine yönelik literatürde çok fazla çalışmanın bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, ilgili veri tabanlarında sıklıkla *GDF5* rs143383 polimorfizmi ile yumuşak dokularda meydana gelen hastalıklara (kas-iskelet dejeneratif hastalıkları, gelişimsel kalça displazisi ve osteoarthritis) yönelik çalışmaların olduğu raporlanmıştır. Çalışmadan elde edilen veriler dikkatli bir şekilde analiz edildiğinde, spor performansı üzerinde genetik faktörlerin henüz gelişimsel bir aşamada olduğu sonucuna ulaşılabilir. Bu alana yönelik daha fazla çalışmanın yapılması tavsiye edilmektedir.

Kaynaklar

- Abboud, S., Akam, E., Hunter, D. J., & Mastana, S. (2026). The Role of COL1A1, COL5A1, ACTN3, MMP3, and GDF5 Gene variants in common sports injuries: systematic review of ACL rupture, achilles tendinopathy, and stress fractures. *Genes* 17(2), 2-18. doi.org/10.3390/genes17020212.
- Ahmetov II, Hall EC, Semenova EA, Pranckevičienė E, Ginevičienė V (2022) Advances in sports genomics. *Adv Clin Chem* 107:215-263. doi:10.1016/bs.acc.2021.07.00440.
- Aksović, N., Bubanj, S., Bjelica, B., Kocić, M., Lilić, L., Zelenović, M., . . . Milić, V. (2024). Sports injuries in basketball players: A systematic review. *Life (Basel)*. 14(7), 2-17. doi: 10.3390/life14070898.
- Alorfi, N. M. (2026). Pharmacological interventions in the management of sports injuries: a review of clinical use, dosage forms, and anti-doping considerations. *Drug Design, Development and Therapy* 20, 1-9.
- Baltazar-Martins G, Gutiérrez-Hellín J, Aguilar-Navarro M, Ruiz-Moreno CR, Moreno-Pérez V, López-Samanes Á, et al (2020) Effect of ACTN3 genotype on sports performance, exercise-in-duced muscle damage, and injury epidemiology. *Sport* 8:2-12. doi:10.3390/sports807009942.
- Başaran, E., Aras, S., & Duman, D. (2010). Genomik, proteomik, metabolomik kavramlarına genel bakış ve uygulama alanları. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi* 6(2), 85-96.
- Bayraktar, B., & Kurtoğlu, M. (2009). Sporda performans, etkili faktörler, değerlendirilmesi ve artırılması. *Klinik Gelişim* 22(1), 16-24.
- Bıçakçı, B., Cięższyk, P., & Humińska-Lisowska, K. (2024). Genetic determinants of endurance: a narrative review on elite athlete status and performance. *Int J Mol Sci*. 25(23), 2-40. doi: 10.3390/ijms252313041.
- Borzemska, B., Cięższyk, P., & Żekanowski, C. (2024). The genetic basis of non-contact soft tissue injuries-are there practical applications of genetic knowledge? *Cells* 13(22), 2-37. doi: 10.3390/cells13221828.
- Brazier, J., Antrobus, M. R., Callus, P. C., Herbert, A. J., Stebbings, G. K., Martin, D., . . . Kilduff, L. P. (2025). Variants within the MMP3 and COL5A1 genes associate with soft tissue injury history in elite male rugby athletes. *J Sci Med Sport*. 28(9), 720-726. doi: 10.1016/j.jsams.2025.05.007.
- Chen, B., Li, B., Qi, Y.-J., Tie, K., & Chen, L.-B. (2015). Association study between growth differentiation factor 5 polymorphism and non-contact anterior cruciate ligament rupture in Chinese Han population. *Int J Clin Exp Med*. 8(12), 22484-22490.
- Ciardulli, M. C., Marino, L., Lamparelli, E. P., Guida, M., Forsyth, N. R., Selli, C., . . . Maffulli, N. (2020). Dose-response tendon-specific markers induction by growth differentiation factor-5 in human bone marrow and

- umbilical cord mesenchymal stem cells. *Int J Mol Sci.* 21(16), 2-19. doi: 10.3390/ijms21165905.
- Clos, E., Pruna, R., Lundblad, M., Artells, R., & Causa, J. E. (2019). ACTN3 single nucleotide polymorphism is associated with non-contact musculoskeletal soft-tissue injury incidence in elite professional football players. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 27(12), 4055-4061. doi: 10.1007/s00167-019-05381-x.
- de Aro, A. A., Carneiro, G. D., Teodoro, L. E., da Veiga, F. C., Ferrucci, D. L., Simões, G. F., . . . Alvares, L. E. (2018). Injured achilles tendons treated with adipose-derived stem cells transplantation and GDF-5. *Cells* 7(9), 2-22. doi: 10.3390/cells7090127.
- De Moor, M. H., Spector, T. D., Cherkas, L. F., Falchi, M., Hottenga, J. J., Boomsma, D. I., & De Geus, E. J. (2007). Genome-wide linkage scan for athlete status in 700 British female DZ twin pairs. *Twin Res Hum Genet.* 10(6), 812-820. doi: 10.1375/twin.10.6.812.
- Ding, D., Kolbe-Alexander, T., Nguyen, B., Katzmarzyk, P. T., Pratt, M., & Lawson, K. D. (2017). The economic burden of physical inactivity: a systematic review and critical appraisal. *Br J Sports Med.* 51(19), 1392-1409. doi: 10.1136/bjsports-2016-097385.
- Dou, L. (2025). Frontier hotspots and development trends in research on sports injury prevention and treatment: A bibliometric and visualization analysis. *Medicine (Baltimore)* 104(34), 1-11. doi: 10.1097/MD.00000000000044012.
- Ebert, J. R., Magi, A., Unt, E., Prans, E., Wood, D. J., & Koks, S. (2023). Genome-wide association study identifying variants related to performance and injury in high-performance athletes. *Exp Biol Med (Maywood).* 248(20), 1799-1805. doi: 10.1177/15353702231198068.
- Edwards, A. W. (2008). G. H. Hardy (1908) and Hardy-Weinberg equilibrium. *Genetics* 179(3), 1143-1150. doi: 10.1534/genetics.104.92940.
- Egli, R. J., Southam, L., Wilkins, J. M., Lorenzen, I., Pombo-Suarez, M., Gonzalez, A., . . . Loughlin, J. (2009). Functional analysis of the osteoarthritis susceptibility-associated GDF5 regulatory polymorphism. *Arthritis Rheum.* 60(7), 1-20. doi: 10.1002/art.24616.
- El Haddouchi, A., Marrouh, A., Kartti, S., El Fahime, E., Boutayeb, S., Chagar, Y., . . . Dakka, T. (2025). Molecular signatures of sprint, strength, and power performance: Integrating genetic, epigenetic, transcriptomic, and telomeric evidence. *Sci Prog.* 108(4), 1-33. doi: 10.1177/00368504251385991.
- Elmagd, M. A. (2016). Common sports injuries. *International Journal of Physical Education, Sports and Health* (5), 142-148.

- Eynon N, Ruiz JR, Oliveira J, Duarte JA, Birk R, Lucia A, et al (2011) Genes and elite athletes: a roadmap for future research. *J Physiol* 589:3063–3070. doi:10.1113/jphysiol.2011.207035.
- Flore, L., Francalacci, P., Massidda, M., Robledo, R., & Calò, C. M. (2023). Influence of different evolutive forces on GDF5 gene variability. *Genes (Basel)*. 14(10), 2-8. doi: 10.3390/genes14101895.
- GeneCards. (2026, 24 Şubat). Erişim adresi <https://www.genecards.org/Search/Keyword?queryString=GDF5>.
- Gibbon, A., Hobbs, H., van der Merwe, W., Raleigh, S. M., Cook, J., Handley, C. J., . . . September, A. V. (2017). The MMP3 gene in musculoskeletal soft tissue injury risk profiling: A study in two independent sample groups. *J Sports Sci*. 35(7), 655-662. doi: 10.1080/02640414.2016.
- Goodlin, G. T., Roos, A. K., Roos, T. R., Hawkins, C., Beache, S., Baur, S., & Kim, S. K. (2015). Applying personal genetic data to injury risk assessment in athletes. *PLoS One*. 10(4), 1-13. doi: 10.1371/journal.pone.0122676.
- Gorasso, V., Van der Heyden, J., De Pauw, R., Pelgrims, I., De Clercq, E. M., De Ridder, K., . . . Vansteelandt, S. (2023). The health and economic burden of musculoskeletal disorders in Belgium from 2013 to 2018. *Popul Health Metr*. 21, 2-10. doi: 10.1186/s12963-023-00303-z.
- Guo, G., Xie, S., Cai, F., Zhou, X., Xu, J., Wu, B., . . . Fang, M. (2021). Effectiveness and safety of massage for athletic injuries. *Medicine (Baltimore)*. 100(32), 1-5. doi: 10.1097/MD.00000000000026925.
- Guo, R., Ji, Z., Gao, S., Aizezi, A., Fan, Y., Wang, Z., & Ning, K. (2022). Association of COL5A1 gene polymorphisms and musculoskeletal soft tissue injuries: a meta-analysis based on 21 observational studies. *J Orthop Surg Res*. 17(1), 2-13. doi: 10.1186/s13018-022-03020-9.
- Gutiérrez-Hellín, J., Baltazar-Martins, G., Aguilar-Navarro, M., Ruiz-Moreno, C., Oliván, J., & Del Coso, J. (2021). Effect of ACTN3 R577X genotype on injury epidemiology in elite endurance runners. *Genes (Basel)*. 12(1), 2-9. doi: 10.3390/genes12010076.
- Hall, E. C., Baumert, P., Larruskain, J., Gil, S. M., Lekue, J. A., Rienzi, E., . . . Ade, J. D. (2022). The genetic association with injury risk in male academy soccer players depends on maturity status. *Scand J Med Sci Sports*. 32(2), 338-350. doi: 10.1111/sms.14077.
- Harsanyi, S., Zamborsky, R., Krajciová, L., Kokavec, M., & Danisovic, L. (2021). Genetic study of IL6, GDF5 and PAPP2 in association with Developmental Dysplasia of the hip. *Genes (Basel)*. 12(7), 2-7. doi: 10.3390/genes12070986.
- Huang, X., Zhang, W., & Shao, Z. (2018). Association between GDF5 rs143383 genetic polymorphism and musculoskeletal degenerative diseases

- susceptibility: a meta-analysis. *BMC Med Genet.* 19(1), 2-8. doi: 10.1186/s12881-018-0685-7.
- Humińska-Lisowska, K. (2024). Dopamine in sports: A narrative review on the genetic and epigenetic factors shaping personality and athletic performance. *Int J Mol Sci.* 25(21), 2-50. doi: 10.3390/ijms252111602.
- İlgin, F., Günay, V., Yıldırım, S., & Cerit, M. (2020). Atletik performans genleri ve atletik yeteneğin belirlenmesine ilişkin yaklaşımlar. *TURAN-SAM Uluslararası Bilimsel Hakemli Dergisi* 12(48), 166-174. doi: org/10.15189/1308-8041.
- Jacob, Y., Anderton, R. S., Wilkie, J. L., Rogalski, B., Laws, S. M., Jones, A., . . . Hart, N. H. (2022). Genetic variants within *NOGGIN*, *COL1A1*, *COL5A1*, and *IGF2* are associated with musculoskeletal injuries in elite male Australian Football League players: a preliminary study. *Sports Med Open* 8(1), 2-14. doi: 10.1186/s40798-022-00522-y.
- John, R., Dhillon, M. S., & Dhillon, S. (2020). Genetics and the elite athlete: our understanding in 2020. *Indian J Orthop.* 54(3), 256–263. doi: 10.1007/s43465-020-00056-z.
- Kaynak, M., Nijman, F., van Meurs, J., Reijman, M., & Meuffels, D. E. (2017). Genetic variants and anterior cruciate ligament rupture: a systematic review. *Sports Med.* 47(8), 1637-1650. doi: 10.1007/s40279-017-0678-2.
- Kerssemakers, S. P., Fotiadou, A. N., de Jonge, M. C., Karantanas, A. H., & Maas, M. (2009). Sport injuries in the paediatric and adolescent patient: a growing problem. *Pediatric Radiology* 39, 471-484. doi 10.1007/s00247-009-1191-z.
- Koshy, D., Koshy, D. I., & Ooi, E. (2025). Biologic therapies in the management of sports-related tendon and ligament injuries: A narrative review. *Cureus.* 17(5), 2-8. doi: 10.7759/cureus.84556.
- Kubo, K., Yata, H., & Tsunoda, N. (2013). Effect of gene polymorphisms on the mechanical properties of human tendon structures. *Springerplus* 343, 2-6. doi: 10.1186/2193-1801-2-343.
- Leońska-Duniec, A. (2025). Genetic susceptibility to sport-related muscle injuries: Insights from the literature and novel gene candidates. *Int J Mol Sci.* 26(22), 2-26. doi: 10.3390/ijms262211175.
- Liu, M., Gong, S., Sheng, X., Zhang, Z., & Wang, X. (2025). Bioinformatic identification of important roles of *COL1A1* and *TNFRSF12A* in cartilage injury and osteoporosis. *J Int Soc Sports Nutr.* 22(1), 2-17. doi: 10.1080/15502783.2025.2454641.
- Maestro, A., Del Coso, J., Aguilar-Navarro, M., Gutiérrez-Hellín, J., Morencos, E., Revuelta, G., . . . Varillas-Delgado, D. (2022). Genetic profile in genes associated with muscle injuries and injury etiology in professional soccer players. *Front Genet.* 13, 1-15. doi: 10.3389/fgene.2022.1035899.

- Malsagova, K. A., Butkova, T. V., Kopylov, A. T., Izotov, A. A., Rudnev, V. R., Klyuchnikov, M. S., . . . Kaysheva, A. L. (2021). Molecular portrait of an athlete. *Diagnostics (Basel)* 11(6), 2-23. doi: 10.3390/diagnostics11061095.
- Manchón-Davó , M., Del Coso , J., Vera-Garcia , F. J., González-Rodenas, J., Miralles-Iborra , A., Rodas, G., . . . Moreno-Pérez, V. (2025). Association Between the COL5A1 rs12722 genotype and the prevalence of anterior cruciate ligament rupture in professional football players. *Genes (Basel)*. 16(6), 2-17. doi: 10.3390/genes16060649.
- Marrouh, A., Haddouchi, A. E., Kartti, S., Fahime , E. E., Boutayeb, S., Chagar , Y., . . . Eljaoudi , R. (2025). The role of genetic and epigenetic factors in sports-related muscle, bone, and brain injuries. *Sci Prog.* 108(4), 2-33. doi: 10.1177/00368504251385937.
- Mazy, D., Léveillé, N., Séguy, L., Londono, I., Moldovan, F., & Nault, M.-L. (2025). Growth differentiation factor 5 improves meniscal healing in a pilot study on rats. *J Exp Orthop.* 12(2), 1-8. doi: 10.1002/jeo2.70309.
- McCabe, K., & Collins, C. (2018). Can genetics predict sports injury? The association of the genes GDF5, AMPD1, COL5A1 and IGF2 on soccer player injury occurrence. *Sports (Basel)*. 6(1), 2-10. doi: 10.3390/sports6010021.
- Mechelen, W. v. (1997). The severity of sports injuries. *Sports Medicine* 24(3), 176-180.
- Meena, A., Yadav, A. K., Panchal, S., Malik, S., Farinelli, L., D'Ambrosi, R., . . . Tapasvi, S. (2025). Sports injuries during Kabaddi: a literature review. *Ann Jt.* 10, 2-6. doi: 10.21037/aoj-24-62. eCollection 2025.
- Mikkelsen, L. O., Nupponen, H., Kaprio, J., Kautiainen, H., Mikkelsen, M., & Kujala, U. M. (2006). Adolescent flexibility, endurance strength, and physical activity as predictors of adult tension neck, low back pain, and knee injury: a 25 year follow up study. *Br J Sports Med.* 40(2), 107-113. doi: 10.1136/bjsm.2004.017350.
- Miyamoto-Mikami , E., Miyamoto , N., Kumagai , H., Hirata, K., Kikuchi , N., Zempo, H., . . . Fuku , N. (2019). COL5A1 rs12722 polymorphism is not associated with passive muscle stiffness and sports-related muscle injury in Japanese athletes. *BMC Med Genet.* 20, 2-9. doi: 10.1186/s12881-019-0928-2.
- Miyamoto-Mikami , E., Zempo, H., Fuku, N., Kikuchi, N., Miyachi, M., & Murakami, H. (2018). Heritability estimates of endurance-related phenotypes: A systematic review and meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports.* 28(3), 834-845. doi: 10.1111/sms.12958.
- Naomi, R., Ridzuan, P. M., & Bahari , H. (2021). Current insights into collagen type I. *Polymers (Basel)*. 13(16), 2-19. doi: 10.3390/polym13162642.

- Parkkari, J., Kujala, U. M., & Kannus, P. (2001). Is it possible to prevent sports injuries? *Sports Medicine* 31 (14), 985–995 .
- Pimenta EM, Coelho DB, Veneroso CE, Coelho EJB, Cruz IR, Morandi RF, et al (2013) Effect of ACTN3 gene on strength and endurance in soccer players. *J Strength Cond Res* 27:3286-3292. doi:10.1519/JSC.0b013e3182915e66.
- Pitsiladis, Y. P., Tanaka, M., Eynon, N., Bouchard, C., North, K. N., Williams, A. G., . . . Britton, S. L. (2015). Athlome Project Consortium: a concerted effort to discover genomic and other “omic” markers of athletic performance. *Physiol Genomics*. 48(3), 183–190. doi: 10.1152/physiolgenomics.00105.2015.
- Pranckeviciene E, Gineviciene V, Jakaitiene A, Januska L, Utkus A (2021) Total genotype score modelling of polygenic endurance-power profiles in Lithuanian elite athletes. *Genes* 12:2-18. doi:10.3390/genes12071067.
- Pruna, R., Artells, R., Ribas, J., Montoro, B., Cos, E, Muñoz, C., . . . Maffulli, N. (2013). Single nucleotide polymorphisms associated with non-contact soft tissue injuries in elite professional soccer players: influence on degree of injury and recovery time. *BMC Musculoskelet Disord*. 14, 2-7. doi: 10.1186/1471-2474-14-221.
- Psatha, A., Al-Mahayri, Z. N., Mitropoulou, C., & Patrinos, G. P. (2024). Meta-analysis of genomic variants in power and endurance sports to decode the impact of genomics on athletic performance and success. *Hum Genomics*. 18(1), 2-8. doi: 10.1186/s40246-024-00621-9.
- Raleigh, S. M., Posthumus, M., O’Cuinneagain, D., van der Merwe, W., & Collins, M. (2013). The GDF5 gene and anterior cruciate ligament rupture. *Int J Sports Med*. 34(4), 364-367. doi: 10.1055/s-0032-1316361.
- Ribbans, W. J., September, A. V., & Collins, M. (2022). Tendon and ligament genetics: how do they contribute to disease and injury? a narrative review. *Life (Basel)*. 12(5), 2-36. doi: 10.3390/life12050663.
- Rzeszutko-Belzowska, A., & Leońska-Duniec, A. (2026). The transforming growth factor β genes and susceptibility to musculoskeletal injuries in a physically active Caucasian cohort. *J Clin Med*. 15(1), 2-19. doi: 10.3390/jcm15010358.
- Semenova, E. A., Hall, E. C., & Ahmetov, I. I. (2023). Genes and Athletic Performance: The 2023 Update. *Genes (Basel)*. 14(6), 2-32. doi: 10.3390/genes14061235.
- Sharma, S., Whiteley, R., Rani, B., Sartori, S., Sharma, H., & Gabbett, T. J. (2026). Mapping the existing return-to-sport criteria after pectoralis major tendon injury in different sports: a scoping review for getting back to the game. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach* 0(0), 1-12. doi: 10.1177/19417381251408058.
- Storm, E. E., Huynh, T. V., Copeland, N. G., Jenkins, N. A., Kingsley, D. M., & Lee, S. J. (1994). Limb alterations in brachypodism mice due to mutations

- in a new member of the TGF beta-superfamily . *Nature* 368(642), 639-43. doi: 10.1038/368639a0.
- Styrkarsdottir , U., Stefansson, O. A., Gunnarsdottir, K., Thorleifsson, G., Lund , S. H., Stefansdottir, L., . . . Agustsdottir, A. B. (2019). GWAS of bone size yields twelve loci that also affect height, BMD, osteoarthritis or fractures. *Nat Commun.* 10(1), 1-13. doi: 10.1038/s41467-019-09860-0.
- Sun, Z., Ciğszczyk , P., & Bojarczuk, A. (2025). COL5A1 rs13946 polymorphism and anterior cruciate ligament injury: systematic review and meta-analysis. *Int J Mol Sci.* 26(13), 2-14. doi: 10.3390/ijms26136340.
- Syddall, C. M., Reynard, L. N., Young, D. A., & Loughlin, J. (2013). The identification of trans-acting factors that regulate the expression of GDF5 via the osteoarthritis susceptibility SNP rs143383. *PLoS Genet.* 9(6), 1-14. doi: 10.1371/journal.pgen.1003557.
- Taimela, S., Kujala, U. M., & Osterman, K. (1990). Intrinsic risk factors and athletic injuries. *Sports Medicine* 9(4), 205-215.
- Takahata, Y., Hagino, H., Kimura , A., Urushizaki , M., Yamamoto, S., Wakamori , K., . . . Nishimura , R. (2022). Regulatory mechanisms of Prg4 and Gdf5 expression in articular cartilage and functions in Osteoarthritis. *Int J Mol Sci.* 23(9), 2-15. doi: 10.3390/ijms23094672.
- Tanisawa K, Wang G, Seto J, Verdouka I, Twycross-Lewis R, Ka-ranikolou A, et al (2020) Sport and exercise genomics: the FIMS 2019 consensus statement update. *Br J Sports Med* 54:969-975. doi:10.1136/bjsports-2019-10153243.
- Tarnowski, M., Tomasiak , P, Tkacz, M., Zgutka , K., & Piotrowska, K. (2022). Epigenetic alterations in sports-related injuries. *Genes (Basel).* 13(8), 2-39. doi: 10.3390/genes13081471.
- Tekpinar, L., & Erdem, R. (2019). Kişiselleştirilmiş tıp ve genom araştırmalarının sağlık çıktıları bağlamında değerlendirilmesi. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi* 22(4), 843-862.
- Terekhov, M. V., Deev, R. V., Kadykova, A. I., Dzhumaniiazova, I. H., Mamchur , A. A., Zelenova, E. A., . . . Ivanov, M. V. (2025). GWAS shows links between EDARADD and LRFN5 and performance in professional athletes. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* 18, 2-9. doi: 10.1186/s13102-025-01423-9.
- Torrejón, L. N., Martínez-Serrano , A., Villalón , J. M., & Alcaraz, P. E. (2024). Economic impact of muscle injury rate and hamstring strain injuries in professional football clubs. Evidence from LaLiga. *PLoS One* 19(6), 1-13. doi: 10.1371/journal.pone.0301498.
- Varillas-Delgado D, Coso JD, Gutiérrez-Hellín J, Aguilar-Na-varro M, Muñoz A, Maestro A, et al (2022) Genetics and sports performance: the present and future in the identification of talent for sports based on DNA testing. *Eur J Appl Physiol* 122:1811-1830. doi:10.1007/s00421-022-04945-z.

- Varillas-Delgado, D., Gutierrez-Hellín, J., & Maestro, A. (2023). Genetic profile in genes associated with sports injuries in elite endurance athletes. *Int J Sports Med.* 44(1), 64-71. doi: 10.1055/a-1917-9212.
- Varillas-Delgado, D., Morencos, E., Gutiérrez-Hellín, J., Aguilar-Navarro, M., Muñoz, A., Láiz, N. M., . . . Maestro, A. (2022). Genetic profiles to identify talents in elite endurance athletes and professional football players. *PLoS One* 17(9), 1-24. doi: 10.1371/journal.pone.0274880.
- Wang, C., Li, H., Chen, K., Wu, B., & Liu, H. (2017). Association of polymorphisms rs1800012 in COL1A1 with sports-related tendon and ligament injuries: a meta-analysis. *Oncotarget* 8(16), 27627–27634. doi: 10.18632/oncotarget.15271.
- Wang, Y., He, Z., Mei, T., Yang, X., Gu, Z., Zhang, Z., & Li, Y. (2024). Sports-related genomic predictors are associated with athlete status in Chinese sprint/power athletes. *Genes (Basel)*. 15(10), 2-10. doi: 10.3390/genes15101251.
- Wang, Y.-P., Di, W.-J., Yang, S., Qin, S.-L., Xu, Y.-F., Han, P.-F., & Hou, K.-D. (2023). The association of growth differentiation factor 5 rs143383 gene polymorphism with osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res.* 18(1), 2-16. doi: 10.1186/s13018-023-04245-y.
- Wenzinger, E., Rivera-Barrios, A., Gonzalez, G., & Herrera, F. (2019). Trends in upper extremity injuries presenting to US emergency departments. *Hand (N Y)*. 14(3), 408–412. doi: 10.1177/1558944717735943.
- Willard, K., Laguette, M.-J. N., de Souza Rios, L. A., D'Alton, C., Nel, M., Prince, S., . . . September, A. V. (2020). Altered expression of proteoglycan, collagen and growth factor genes in a TGF- β 1 stimulated genetic risk model for musculoskeletal soft tissue injuries. *J Sci Med Sport.* 23(8), 695-700. doi: 10.1016/j.jsams.2020.02.007.
- Williams, A. G., Wackerhage, H., & Day, S. H. (2016). Genetic testing for sports performance, responses to training and injury risk: practical and ethical considerations. *Med Sport Sci.* 61, 105-119. doi: 10.1159/000445244.
- Wolfman, N. M., Hattersley, G., Cox, K., Celeste, A. J., Nelson, R., Yamaji, N., . . . Rosen, V. (1997). Ectopic induction of tendon and ligament in rats by growth and differentiation factors 5, 6, and 7, members of the TGF-beta gene family. *J Clin Invest.* 100(2), 321–330. doi: 10.1172/JCI119537.
- Xiong, Y., Liu, Y., Zhou, J., Shang, X., He, H., Li, G., . . . Li, J. (2025). Clinical practice guidelines for topical NSAIDs in the treatment of sports injuries. *J Evid Based Med.* 18(1), 1-15. doi: 10.1111/jebm.12661.
- Yan, S., Nie, H., Bu, G., Yuan, W., & Wang, S. (2021). The effect of common variants in GDF5 gene on the susceptibility to chronic postsurgical pain. *J Orthop Surg Res.* 16(1), 2-7. doi: 10.1186/s13018-021-02549-5.

- Zempo, H., Miyamoto-Mikami, E., Kikuchi, N., Fuku, N., Miyachi, M., & Murakami, H. (2017). Heritability estimates of muscle strength-related phenotypes: A systematic review and meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*, 27(12), 1537-1546. doi: 10.1111/sms.12804.
- Zhang, M., Wang, H., Dai, G.-C., Lu, P.-P., Gao, Y.-C., Cao, M.-M., . . . Rui, Y.-E. (2024). Injectable self-assembled GDF5-containing dipeptide hydrogels for enhanced tendon repair. *Mater Today Bio*, 26, 2-17. doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101046.
- Zhang, N., Meng, Q., Xiao, M., Zhou, L., Leng, H., & Bao, C. (2026). Advances in biomaterials for sports injury prevention and rehabilitation: current status and future perspectives. *Nanoscale Adv*, 8, 811-828. doi: 10.1039/D5NA00874C.

Sezon İçi Milli Takım Aralarında Mikro Dozlama Temelli Dayanıklılık Antrenmanlarının Performans Üzerine Etkileri

Murat Tutar¹

Özet

Modern futbolda artan fiziksel talepler ve yoğun maç takvimi, sezon içi süreçte geleneksel yüksek hacimli dayanıklılık antrenmanlarının uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bu durum, düşük hacimli, yüksek yoğunluklu ve yüksek frekansta uygulanan antrenman uyarılarına dayanan mikro dozlama yaklaşımı gibi alternatif stratejilerin önemini artırmıştır. Bu çalışmanın amacı, sezon içi milli takım aralarında uygulanan mikro dozlama temelli dayanıklılık antrenmanlarının elit futbolcularda fizyolojik ve performans parametreleri üzerindeki etkilerini incelemektir.

Bu kapsamda, yüksek şiddetli interval antrenman (HIIT), tekrarlı sprint yeteneği (RSA), maksimal aerobik hız (MAS) intervalleri ve dar alan oyunlarını (SSG) içeren yapılandırılmış 7 günlük bir mikro dozlama antrenman modeli oluşturulmuştur. Antrenman yaklaşımı; düşük toplam hacim, yüksek yoğunluk ve sık nöromusküler uyarım prensiplerine dayanmakta olup, yeterli toparlanma süreçleri ile desteklenmiştir.

Mevcut literatür ve önerilen model doğrultusunda, mikro dozlama yaklaşımının maksimal oksijen tüketimini (VO_2max) koruyabileceği veya artırabileceği, tekrarlı sprint yeteneğini geliştirebileceği, sprint performansını sürdürebileceği ve yorgunluk direncini artırabileceği öngörülmektedir. Mikro dozlama kapsamında lineer ve oyun temelli antrenmanların birlikte kullanımı hem fizyolojik hem de futbola özgü adaptasyonların eş zamanlı gelişimine katkı sağlayabilir. Ayrıca düşük antrenman hacmi sayesinde birikmiş yorgunluğun ve sakatlık riskinin azaltılması mümkün olabilir.

Sonuç olarak mikro dozlama yaklaşımı, milli takım araları gibi kısa süreli sezon içi periyotlarda elit futbolcular için zaman açısından verimli ve etkili bir

1 İstanbul Gedik Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, tutarmurat@gmail.com, Orcid: 0009-0009-1726-7581

antrenman stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım, yoğun müsabaka takvimlerinde performans gelişimi ile toparlanma arasında optimal denge kurulmasına katkı sağlayabilir. Gelecek deneysel çalışmaların, bu modelin uzun vadeli etkilerini ve farklı oyuncu profilleri üzerindeki uygulamalarını incelemesi gerekmektedir.

1. Giriş

Günümüz futbolu, yüksek fiziksel talepler, yoğun maç takvimleri ve artan performans beklentileri doğrultusunda multidisipliner bir hazırlık sürecini zorunlu kılmaktadır. Modern futbolcuların müsabaka sırasında kat ettikleri toplam mesafenin yaklaşık 8–12 km arasında değişmesi ve maksimum oksijen tüketim (VO_2max) değerlerinin elit seviyede $55-70 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{dk}^{-1}$ aralığında bulunması, aerobik kapasitenin performans belirleyicileri arasında kritik bir yer tuttuğunu göstermektedir (Hoff & Helgerud, 2004; Stølen ve ark., 2005). Bununla birlikte futbol, yalnızca sürekli koşu temelli bir spor olmayıp; yüksek şiddetli sprintler, ani yön değiştirmeler, sıçramalar ve kısa süreli maksimal eforların tekrarlandığı aralıklı bir yapıya sahiptir. Bu nedenle aerobik kapasitenin geliştirilmesi, anaerobik performansın sürdürülebilirliği açısından da önemli bir temel oluşturmaktadır (Bangsbo, 1994).

Futbola özgü antrenman uygulamalarında yüklenme şiddeti; saha boyutu, oyuncu sayısı, kural modifikasyonları, yüklenme-dinlenme oranları ve antrenör müdahaleleri gibi çok sayıda değişken aracılığıyla manipüle edilebilmektedir. Özellikle dar alan oyunları (small-sided games), teknik ve taktik gelişim ile fizyolojik yüklenmeyi entegre edebilmesi nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir (Hill-Haas ve ark., 2009; Aguiar ve ark., 2012). Ancak bu tür oyunların doğası gereği değişken hareket paternleri içermesi, antrenman şiddetinin standardizasyonunu ve kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kalp atım hızı, kan laktat konsantrasyonu ve GPS tabanlı performans verileri gibi objektif ölçüm araçlarının kullanımı, antrenman yükünün izlenmesi açısından kritik öneme sahiptir (Rampinini ve ark., 2007).

Literatürde aerobik dayanıklılığın geliştirilmesine yönelik yüksek şiddetli interval antrenmanlarının haftada 2–3 seans olmak üzere 8–10 hafta uygulanmasının etkili olduğu belirtilmektedir (Stølen ve ark., 2005). Ancak sezon içi yoğun fikstür, seyahat yükü, toparlanma gereksinimleri ve teknik-taktik hazırlık süreçleri göz önüne alındığında, bu tür uzun süreli ve sistematik yüklenmelerin uygulanabilirliği sınırlıdır. Bu durum, antrenörleri daha kısa sürede etkili adaptasyonlar sağlayabilecek alternatif antrenman modellerine yönlendirmektedir.

Sezon içerisinde milli takım maçları nedeniyle verilen aralar, bu bağlamda önemli bir fırsat penceresi oluşturmaktadır. Bu dönemler hem oyuncuların toparlanması hem de fiziksel kapasitelerin yeniden yapılandırılması açısından “mini hazırlık dönemi” olarak değerlendirilebilir. Ancak bu süreçlerin genellikle 7–10 gün gibi sınırlı süreleri kapsaması, uygulanacak antrenman modellerinin yüksek verimlilikte olmasını zorunlu kılmaktadır (Liu ve ark., 2024).

Bu noktada son yıllarda spor bilimleri literatüründe öne çıkan mikro dozlama (micro-dosing) yaklaşımı, düşük hacimli ancak yüksek yoğunluklu ve sık tekrar eden antrenman uyaranları ile performans gelişimini hedefleyen yenilikçi bir model olarak dikkat çekmektedir (Liu ve ark., 2024). Mikro dozlama özellikle sezon içi yoğunlukta, yorgunluğu minimize ederken performansı koruma ve hatta geliştirme potansiyeli sunması açısından futbol gibi aralıklı yüksek şiddetli sporlarda önemli bir uygulama alanı bulmaktadır (Cuthbert ve ark., 2024).

Bu bölümün amacı, sezon içi milli takım aralarında uygulanan mikro dozlama temelli dayanıklılık antrenman modellerinin futbolcularda fizyolojik ve performans parametreleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu doğrultuda, futbola özgü dayanıklılık gereksinimleri, farklı antrenman yöntemleri, mikro dozlama yaklaşımının teorik temelleri ve pratik uygulama örnekleri detaylı olarak ele alınacaktır.

2. Futbolda Dayanıklılık Gereksinimleri ve Enerji Sistemleri

Futbol, fizyolojik açıdan incelendiğinde sürekli ve aralıklı yüklenmelerin iç içe geçtiği kompleks bir yapıya sahiptir. Oyuncular, müsabaka boyunca düşük şiddetli aktiviteler (yürüme, hafif koşu) ile yüksek şiddetli eforlar (sprint, hızlanma, yön değiştirme) arasında sürekli geçiş yapmaktadır. Bu nedenle futbol performansı hem aerobik hem de anaerobik enerji sistemlerinin eş zamanlı ve etkileşimli çalışmasına bağlıdır (Aguiar ve ark., 2012).

2.1. Aerobik Dayanıklılık ve Futbol Performansı

Aerobik kapasite, futbolcularda maç süresince yüksek şiddetli eforların tekrar edilebilmesi ve toparlanma hızının artırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek VO_{2max} değerlerine sahip oyuncuların:

- Daha fazla toplam mesafe kat edebildiği
- Yüksek şiddetli koşuları daha sık tekrar edebildiği
- Sprintler arası toparlanma süresinin daha kısa olduğu rapor edilmiştir (Helgerud ve ark., 2001).

Aerobik sistemin en önemli katkılarından biri, fosfokreatin (PCr) depolarının yeniden sentezlenmesi ve laktatın uzaklaştırılması süreçlerinde

rol almasıdır. Bu durum, özellikle tekrarlı sprint performansı (Repeated Sprint Ability-RSA) açısından belirleyici bir faktördür. Futbol gibi yüksek yoğunluklu aralıklı sporlarda, aerobik kapasitenin gelişmiş olması, oyuncuların maçın son bölümlerinde performans düşüşünü minimize etmektedir (Hill-Haas ve ark., 2009).

2.2. Anaerobik Dayanıklılık ve Yüksek Şiddetli Aksiyonlar

Futbolda belirleyici anlar genellikle yüksek şiddetli aktiviteler sırasında ortaya çıkar. Sprintler, ani yön değiştirmeler, sıçramalar ve ikili mücadeleler büyük oranda anaerobik enerji sistemine dayanmaktadır. Bu aktiviteler sırasında enerji üretimi başlıca:

- ATP-PCr sistemi (alaktik anaerobik sistem)
- Anaerobik glikolitik sistem (laktik sistem) tarafından sağlanmaktadır.

Müsabaka analizleri, toplam koşu mesafesinin yaklaşık %10–15'inin yüksek şiddetli aktivitelerden oluştuğunu, ancak bu aktivitelerin maç sonucuna etkisinin orantısız olarak çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Özellikle sprint performansı ve tekrarlı sprint kapasitesi, elit futbolcuların ayırt edici özellikleri arasında yer almaktadır (Hoff & Helgerud, 2004; Stølen ve ark., 2005).

2.3. Tekrarlı Sprint Yeteneği (RSA)

RSA, kısa süreli maksimal sprintlerin sınırlı toparlanma süreleri ile tekrar edilebilirlik kapasitesi olarak tanımlanır ve modern futbolda kritik performans göstergelerinden biridir. RSA performansı;

- Aerobik kapasite
- Kas içi tamponlama kapasitesi
- Nöromusküler dayanıklılık gibi birçok faktörden etkilenmektedir.

Yüksek aerobik kapasiteye sahip oyuncuların, sprintler arası toparlanmayı daha hızlı gerçekleştirdiği ve performans düşüşünü daha az yaşadığı gösterilmiştir. Bu nedenle aerobik ve anaerobik sistemlerin birlikte geliştirilmesi, futbola özgü dayanıklılık programlarının temelini oluşturmaktadır (Rampinini ve ark., 2007).

2.4. Maç İçinde Yorgunluk ve Performans Düşüşü

Futbol müsabakalarında yorgunluk, performansı sınırlayan temel faktörlerden biridir. Araştırmalar, maçın ikinci yarısında:

- Toplam koşu mesafesinde %5–10 azalma

- Yüksek şiddetli koşullarda belirgin düşüş
- Sprint sayısında azalma olduğunu göstermektedir (Bangsbo, 1991).

Bu performans düşüşünün başlıca nedenleri:

- Glikojen depolarının azalması
- Metabolik yan ürünlerin (H^+ , laktat) birikimi
- Nöromüsküler yorgunluk
- Termoregülasyon stresidir

Bu bağlamda dayanıklılık antrenmanlarının temel amacı yalnızca performansı artırmak değil, aynı zamanda yorgunluğa karşı direnç geliştirmek olmalıdır (Gibala ve ark., 2012).

2.5. Mevkiye Göre Dayanıklılık Gereksinimleri

Futbolcuların fiziksel talepleri oynadıkları mevkiye göre farklılık göstermektedir:

- Orta saha oyuncuları: En yüksek toplam mesafe ve yüksek aerobik yük
- Kanat oyuncuları: Yüksek sprint ve yüksek şiddetli koşu frekansı
- Defans oyuncuları: Daha düşük toplam mesafe ancak kritik sprintler
- Forvet oyuncuları: Kısa mesafeli patlayıcı aksiyonlar

Bu farklılıklar, antrenman programlarının bireyselleştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Hill-Haas ve ark., 2009). Özellikle mikro dozlama yaklaşımı, bu bireyselleştirme ihtiyacına cevap verebilecek esnek bir yapı sunmaktadır.

3. Futbolda Dayanıklılık Antrenman Modelleri

Futbolda dayanıklılık antrenmanı, sporun aralıklı ve yüksek şiddetli doğası nedeniyle tek bir yöntemle sınırlı kalmayıp farklı antrenman modellerinin entegrasyonunu gerektirmektedir. Bu modeller genel olarak doğrusal (lineer) koşu temelli antrenmanlar ve futbola özgü oyun temelli uygulamalar olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Bununla birlikte, son yıllarda yüksek şiddetli interval antrenmanları (HIIT), sprint interval antrenmanları (SIT) ve maksimal aerobik hız (MAS) temelli çalışmalar performans gelişiminde önemli yer edinmiştir (Clemente, ve ark., 2020; Škorik, M., ve ark., 2026).

3.1. Yüksek Şiddetli Interval Antrenmanı (HIIT)

Yüksek şiddetli interval antrenmanları (HIIT), belirli süreler boyunca yüksek yoğunlukta gerçekleştirilen egzersizlerin aktif veya pasif dinlenme periyotları ile ardışık olarak uygulanmasına dayanan etkili bir dayanıklılık geliştirme yöntemidir. Futbolda HIIT genellikle %85–95 maksimum kalp atım hızı (HRmax) şiddetinde, 2–4 dakika süren yüklenmeler ve 1–3 dakika arası dinlenme periyotları ile planlanmaktadır. Bu antrenman modeli, özellikle aerobik kapasitenin geliştirilmesinde en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmekte olup VO₂max artışı, mitokondriyal yoğunlukta yükselme ve kardiyovasküler adaptasyonlar üzerinde önemli etkiler göstermektedir (Buchheit, 2012). Ayrıca HIIT, zaman açısından oldukça verimli olması ve bilimsel literatürde geniş kullanım alanı bulması nedeniyle antrenörler tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, futbola özgü hareket paternlerinden kısmen uzak kalabilmesi, oyuncu motivasyonunun bazı durumlarda düşük olması ve nöromusküler yüklenmenin sınırlı düzeyde kalması bu yöntemin başlıca dezavantajları arasında yer almaktadır (Buchheit & Laursen, 2013).

3.2. Sprint Interval Antrenmanı (SIT)

Sprint interval antrenmanları (SIT) ise çok kısa süreli (genellikle 10–30 saniye) maksimal sprintler ile daha uzun dinlenme periyotlarının birleşiminden oluşan ve özellikle anaerobik kapasite ile nöromusküler performansı geliştirmeyi hedefleyen bir antrenman modelidir. Futbolda SIT uygulamaları çoğunlukla 6–10 tekrar, 20–30 metre sprint mesafesi ve 20–60 saniye dinlenme aralıkları ile yapılandırılmaktadır. Bu tür antrenmanlar sprint performansında doğrudan gelişim sağlaması, tekrarlı sprint yeteneğine (RSA) katkıda bulunması ve sinir-kas sistemi üzerinde güçlü adaptasyonlar oluşturması açısından oldukça etkilidir. Bununla birlikte SIT antrenmanlarının yüksek düzeyde yorgunluk oluşturması, özellikle hamstring kas grubu başta olmak üzere sakatlık riskini artırabilmesi ve aerobik kapasiteye olan katkısının sınırlı kalması önemli dezavantajlar olarak değerlendirilmektedir (Gibala ve ark., 2012; Spencer ve ark., 2005).

3.3. Maksimal Aerobik Hız (MAS) Temelli Antrenmanlar

Maksimal aerobik hız (MAS), bir sporcunun maksimum oksijen tüketimine (VO₂max) ulaştığı en düşük koşu hızı olarak tanımlanmakta ve dayanıklılık antrenmanlarının bireyselleştirilmesinde kritik bir referans noktası olarak kullanılmaktadır (Panasci ve ark., 2026). Bu yaklaşım, antrenman yükünün sporcuya özgü olarak ayarlanmasına imkân tanıyarak hem performans gelişimini optimize etmekte hem de aşırı yüklenme riskini azaltmaktadır. MAS temelli antrenmanlar genellikle %100–120 MAS şiddetinde, 15 saniye ile 3 dakika

arasında değişen yüklenme süreleri ve eşit ya da kısa dinlenme aralıkları ile planlanmaktadır. Bu yapı, hem aerobik hem de anaerobik enerji sistemlerini eş zamanlı olarak uyararak futbolun fizyolojik gereksinimleriyle yüksek düzeyde örtüşmektedir. Özellikle 30-15 Intermittent Fitness Test (30-15 IFT) gibi saha testleri ile belirlenen MAS değerleri, futbolculara özgü antrenman reçetelerinin oluşturulmasına olanak tanımakta ve uygulamada yüksek doğruluk sağlamaktadır (Buchheit ve ark., 2013). MAS temelli antrenmanların başlıca avantajları arasında bireyselleştirilmiş yüklenme sunması hem aerobik hem de anaerobik katkı sağlaması ve futbola özgü koşu yapısına yakın olması yer almaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemin uygulanabilmesi için düzenli testlerin yapılması gerekliliği ve saha uygulamalarında yük takibinin zaman zaman zorlaşabilmesi önemli sınırlılıklar arasında değerlendirilmektedir.

Tekrarlı sprint antrenmanları (RSA temelli yaklaşım) ise kısa mesafeli sprintlerin sınırlı toparlanma süreleri ile tekrar edilmesine dayanan ve doğrudan maç içi performansı hedefleyen etkili bir antrenman modelidir. Futbolun doğası gereği yüksek şiddetli aksiyonların sık tekrar edilmesi gerektiğinden, RSA antrenmanları bu gereksinimi spesifik olarak karşılamaktadır. Tipik bir RSA protokolü, 6–10 tekrar halinde 20–30 metre sprintlerin 15–30 saniyelik kısa dinlenme aralıkları ile uygulanması şeklinde yapılandırılmaktadır. Bu tür yüklenmeler, yalnızca maksimal sprint performansını geliştirmekle kalmayıp aynı zamanda yorgunluk direncini artırmakta ve sprintler arası toparlanmayı hızlandıran aerobik sistem katkısını da güçlendirmektedir. Dolayısıyla RSA temelli antrenmanlar, futbolcularda hem hız hem de dayanıklılık bileşenlerini eş zamanlı olarak geliştiren, yüksek derecede spesifik ve etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

3.4. Oyun Temelli Dayanıklılık Antrenmanları (Small-Sided Games, SSG)

Dar alan oyunları (small-sided games, SSG), modern futbol antrenmanının en temel ve işlevsel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu antrenman yöntemi, teknik, taktik ve fiziksel yüklenmenin eş zamanlı olarak sağlanabilmesine olanak tanınması nedeniyle özellikle sezon içi süreçte büyük avantaj sunmaktadır (Helgerud ve ark., 2007; Clemente ve ark., 2020; Hill-Haas ve ark., 2009). SSG uygulamalarında antrenman şiddeti; saha boyutu, oyuncu sayısı, temas kuralları, oyunda kullanılan top sayısı ve antrenör müdahalesi gibi değişkenler aracılığıyla kolaylıkla manipüle edilebilmektedir. Bu sayede antrenman içeriği, hedeflenen fizyolojik ve performans çıktılar doğrultusunda esnek bir şekilde düzenlenebilmektedir. Nitekim literatürde, uygun şekilde tasarlanan dar alan oyunlarının sporcuları %85–95 maksimum kalp atım hızı (HRmax) seviyelerine ulaştırabildiği, yüksek düzeyde laktat

üretimi oluşturduğu ve futbola özgü dayanıklılık gelişimine önemli katkılar sağladığı gösterilmiştir. Bununla birlikte SSG'lerin futbola özgü olması, oyuncu motivasyonunu artırması ve teknik-taktik unsurlarla fiziksel gelişimi entegre edebilmesi önemli avantajları arasında yer almaktadır. Ancak bu yöntemin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Özellikle yük kontrolünün zor olması, standartizasyonun düşük olması ve bireysel oyuncular arasında oluşan yük farklılıkları, antrenman planlamasında dikkat edilmesi gereken önemli unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 1. Lineer vs Oyun Temelli Antrenmanlar: Kritik Karşılaştırma

Özellik	Lineer Koşu (HIIT, MAS)	Oyun Temelli (SSG)
Yük kontrolü	Yüksek	Düşük
Spesifiklik	Düşük-Orta	Yüksek
Motivasyon	Orta	Yüksek
Nöromüsküler yük	Orta	Yüksek
Taktik katkı	Yok	Yüksek

4. Mikro Dozlama Yaklaşımı: Teorik Temeller ve Futbolda Uygulama

4.1. Mikro Dozlama Nedir?

Mikro dozlama (micro-dosing), antrenman biliminde son yıllarda giderek daha fazla ilgi gören bir yaklaşım olup, düşük hacimli ancak yüksek yoğunluklu ve sık tekrar eden antrenman uyarılarıyla ile performans adaptasyonlarını maksimize etmeyi amaçlayan bir modeldir. Bu yaklaşım, geleneksel antrenman periyotlamasının aksine, yüksek yüklenmeleri kısa sürelerle bölerek sporcular üzerinde oluşan toplam yorgunluğu minimize etmeyi hedefler (Jiménez-Rubio ve ark., 2024).

Klasik dayanıklılık antrenmanlarında adaptasyon sağlamak için genellikle yüksek hacimli ve sistematik yüklenmeler tercih edilirken, mikro dozlama yaklaşımı:

- Daha kısa süreli antrenmanlar
- Daha yüksek yoğunluk
- Daha sık uygulama
- Düşük toplam hacim prensiplerine dayanır.

Bu model, özellikle yoğun maç takvimine sahip takım sporlarında, performansın korunması ve geliştirilmesi açısından önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Liu ve ark., 2024).

4.2. Mikro Dozlamanın Ortaya Çıkış Nedeni

Modern futbolun mevcut yapısı, geleneksel antrenman modellerinin uygulanabilirliğini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Özellikle haftada 2–3 maçın oynandığı yoğun müsabaka periyotları, artan seyahat yükü, kısıtlı toparlanma süreleri ve buna bağlı olarak yükselen sakatlık riski, yüksek hacimli antrenmanların sürdürülebilirliğini zorlaştıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu tür yoğunluk içeren dönemlerde sporcuların hem performanslarını korumaları hem de yorgunluk birikimini minimize etmeleri kritik bir gereklilik haline gelmektedir. Bu bağlamda mikro dozlama yaklaşımı, zaman kısıtlılığı, yorgunluk yönetimi, performansın korunması ve sakatlık riskinin azaltılması gibi temel problemlere çözüm sunan yenilikçi bir antrenman modeli olarak ortaya çıkmıştır (Cuthbert ve ark., 2024). Düşük hacimli ancak yüksek yoğunluklu antrenman uyaranlarının daha sık uygulanmasına dayanan bu yaklaşım, sınırlı zaman dilimlerinde maksimum fizyolojik ve performans adaptasyonlarını hedeflemektedir. Özellikle elit futbolcular üzerinde gerçekleştirilen güncel çalışmalar, mikro dozlama benzeri düşük hacimli yüksek yoğunluklu antrenman modellerinin, geleneksel yüksek hacimli yaklaşımlarla benzer hatta bazı durumlarda daha üstün adaptasyonlar sağlayabildiğini ortaya koymaktadır (Cuthbert ve ark., 2024; Jiménez-Rubio ve ark., 2024; Liu ve ark., 2024). Bu bulgular, mikro dozlama yaklaşımının modern futbolun gereksinimlerine uyum sağlayan, sürdürülebilir ve etkili bir antrenman stratejisi olduğunu desteklemektedir.

4.3. Mikro Dozlama ve Fizyolojik Mekanizmalar

Mikro dozlama yaklaşımının etkinliği, temel olarak birkaç fizyolojik mekanizmaya dayanmaktadır (Gibala ve ark., 2012). Yüksek şiddetli egzersizler, kısa sürede maksimum motor ünite aktivasyonu ve yüksek metabolik stres oluşturur. Bu durum, mitokondriyal biyogenez, oksidatif enzim aktivitesi ve kas içi enerji sistemlerinin gelişimi üzerinde güçlü etkiler yaratır. Kısa süreli yüksek yoğunluklu yüklenmeler ile kas liflerinin senkronizasyonunu artırır, kuvvet üretim hızını geliştirir ve sprint performansına katkı sağlar. Bu durum özellikle futbol gibi patlayıcı aksiyonların belirleyici olduğu sporlarda kritik öneme sahiptir. Düşük hacimli antrenmanlar sayesinde, merkezi sinir sistemi yorgunluğu azalır. Buna bağlı olarak kas hasarı minimize edilir ve glikojen depoları daha hızlı yenilenir. Bu durum daha sık kaliteli antrenman yapılmasına olanak tanır. Mikro dozlama ile uygulanan yüksek yoğunluklu kısa süreli

çalışmalar hem aerobik hem de anaerobik sistemleri aynı anda uyabilir. Bu özellik, futbolun fizyolojik gereksinimleri ile yüksek düzeyde örtüşmektedir (Gibala ve ark., 2012).

4.4. Futbolda Mikro Dozlama Neden Kritiktir?

Futbol, diğer birçok spordan farklı olarak sürekli değişken yoğunluklu bir yapıya sahiptir. Bu nedenle antrenman modellerinin spesifik yani branşa özgü olması önemlidir. Ayrıca yüklenme dönemleri ve performans ilişkisi incelendiğinde zamanın daha verimli kullanılması söz konusudur. Sezon içerisinde sporcularda yorgunluğa ve sakatlanma riskine bağlı olarak performans artışı zor olduğu için kritik bir öneme sahiptir. Mikro dozlama bu gereksinimlerin tamamını karşılayabilen nadir yaklaşımlardan biridir. Özellikle sezon içi süreçte performansın korunması, Sprint kapasitesinin sürdürülmesi ve aerobik gücün stabil tutulması açısından mikro dozlama etkili bir araç olarak kullanılabilir (Jiménez-Rubio ve ark., 2024).

4.5. Mikro Dozlama Yaklaşımının Avantajları ve Sınırlılıkları

Mikro dozlama yaklaşımı, düşük hacimli ancak yüksek yoğunluklu antrenman uyarıları sayesinde zaman verimliliği sağlaması, yorgunluk birikimini azaltması ve sakatlık riskini minimize etmesi bakımından sezon içi antrenman planlamasında önemli avantajlar sunmaktadır (Haugen ve ark., 2019). Bu yaklaşım, özellikle yoğun maç takvimi içerisinde performansın korunmasına katkıda bulunurken, aynı zamanda nöromüsküler ve metabolik adaptasyonların birlikte geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, mikro dozlama yaklaşımının bazı sınırlılıkları da göz ardı edilmemelidir. Uzun vadeli fizyolojik adaptasyonlar açısından tek başına yeterli olmayabileceği, yüksek yoğunluklu yüklenmelerin uygun şekilde planlanmaması durumunda aşırı yüklenme riskini artırabileceği ve bireysel farklılıkların mutlaka dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca bu yaklaşımın etkin bir şekilde uygulanabilmesi için antrenman yükünün objektif olarak izlenmesini sağlayan GPS, kalp atım hızı (HR) ve benzeri ölçüm sistemlerinin kullanılması büyük önem taşımaktadır (Impellizzeri ve ark., 2019; MacInnis ve ark., 2017).

5. Milli Takım Aralarında Mikro Dozlama Temelli Dayanıklılık Stratejileri

5.1. Milli Takım Araları: “Mini Hazırlık Dönemi” Perspektifi

Sezon içerisinde milli takım maçları nedeniyle verilen 7–10 günlük aralar, klasik periyotlama içerisinde genellikle göz ardı edilen ancak doğru planlandığında yüksek performans kazanımları sağlayabilecek kritik zaman

dilimleridir. Bu süreçler, yoğun maç temposunun yarattığı yorgunluğun yönetilmesi ve fiziksel kapasitenin yeniden yapılandırılması açısından “mini hazırlık dönemi” olarak değerlendirilebilir. Ancak bu periyotların kısa olması, geleneksel dayanıklılık antrenman modellerinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Cuthbert ve ark., 2024; Jiménez-Rubio ve ark., 2024; Liu ve ark., 2024). Bu noktada mikro dozlama yaklaşımı, sınırlı sürede yüksek adaptasyon elde etmek için ideal bir çözüm sunar.

5.2. Temel Planlama Prensipleri

Milli takım aralarında uygulanacak mikro dozlama temelli dayanıklılık antrenmanları aşağıdaki prensiplere dayanmalıdır:

1. Düşük Hacim – Yüksek Yoğunluk
2. Sık Uyarım (Frekansta Artış)
3. Nöromusküler Yük Yönetimi
4. Hibrit Model Kullanımı
5. Bireyselleştirme

Tablo 2. Milli Takım Arasında 7 Günlük Mikro Dozlama Temelli Dayanıklılık Antrenman Planı

Gün	Antrenman Türü	İçerik	Yoğunluk	Amaç
Gün 1	Rejenerasyon	Mobilite + düşük tempolu koşu (15–20 dk)	Düşük	Toparlanma
Gün 2	Mikro HIIT	3–4 × 2 dk (%90–95 HRmax), 2 dk aktif dinlenme	Yüksek	Aerobik uyarım
Gün 3	RSA + Sprint	2 × (6 × 20–25 m sprint), 20 sn dinlenme	Çok yüksek	Sprint + toparlanma
Gün 4	SSG	4 × 4 dk (4v4 / 5v5), 2 dk dinlenme	Orta-Yüksek	Teknik + dayanıklılık
Gün 5	MAS Intervalleri	2 × (8 × 15 sn koşu / 15 sn dinlenme)	Yüksek	Aerobik + anaerobik
Gün 6	Aktif Dinlenme	Teknik + core + mobilite	Düşük	Yenilenme
Gün 7	Kombine Gün	3 × 3 dk SSG + 4–6 × 30 m sprint	Yüksek	Maç simülasyonu

Doğru planlanmış bir mikro dozlama süreci sonunda:

- VO₂max korunur veya artar
- RSA performansı gelişir

- Sprint sayısı ve kalitesi artar
- Yorgunluk direnci yükselir. Bu kazanımlar, özellikle sezonun ikinci yarısında performans sürekliliği açısından kritik rol oynar.

Tablo 3. Mikro Dozlama İçin Kullanılan Antrenman Türlerinin Özeti

Antrenman Türü	Süre	Yoğunluk	Frekans	Temel Adaptasyon
HIIT	Kısa	Yüksek	Orta	VO ₂ max
RSA	Çok kısa	Çok yüksek	Orta	Sprint tekrar kapasitesi
MAS	Kısa-Orta	Yüksek	Orta	Aerobik güç
SSG	Orta	Değişken	Yüksek	Spesifik dayanıklılık

6. Mikro Dozlama Temelli Dayanıklılık Antrenmanlarının Performans Parametreleri Üzerine Etkileri

Mikro dozlama yaklaşımının etkinliği, yalnızca teorik avantajları ile değil, aynı zamanda çeşitli fizyolojik ve performans parametreleri üzerindeki ölçülebilir etkileri ile değerlendirilmelidir. Futbolda performans çok boyutlu bir yapı sergilediğinden, bu etkiler aerobik kapasite, tekrarlı sprint yeteneği, sprint performansı ve nöromusküler yanıtlar bağlamında incelenmelidir (Cuthbert ve ark., 2024; Afonso ve ark., 2025).

6.1. Maksimal Oksijen Tüketimi (VO₂max)

VO₂max, futbolcularda aerobik kapasitenin en önemli göstergelerinden biri olup, yüksek şiddetli eforların sürdürülebilirliği açısından kritik rol oynamaktadır. Geleneksel yaklaşımlarda VO₂max gelişimi için yüksek hacimli dayanıklılık antrenmanları önerilmekle birlikte, son yıllarda düşük hacimli yüksek yoğunluklu antrenmanların benzer adaptasyonlar sağlayabildiği gösterilmiştir (Jiménez-Rubio ve ark., 2024; Liu ve ark., 2024). Mikro dozlama yaklaşımında uygulanan kısa süreli ancak yüksek yoğunluklu interval çalışmalar:

- Kardiyak debide artış
- Mitokondriyal yoğunlukta artış
- Oksijen kullanım kapasitesinde gelişim gibi adaptasyonları tetikleyerek VO₂max üzerinde olumlu etkiler oluşturabilir.

Özellikle %90–95 maksimum kalp atım hızı seviyesinde yapılan kısa süreli interval yüklenmelerin, sınırlı toplam süreye rağmen anlamlı aerobik gelişim sağladığı bildirilmektedir. Bu durum, mikro dozlama yaklaşımının sezon içi uygulanabilirliğini güçlendirmektedir.

6.2. Tekrarlı Sprint Yeteneği (RSA)

RSA, futbol performansının en kritik belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Mikro dozlama yaklaşımı, RSA gelişimi açısından iki önemli mekanizma üzerinden etki göstermektedir:

- .. **Aerobik katkı**
- .. **Nöromüsküler adaptasyon**

Düşük hacimli ancak yüksek yoğunluklu sprint tekrarları, kas içi fosfokreatin yenilenmesini hızlandıran aerobik sistem ile anaerobik enerji sistemleri arasında güçlü bir adaptasyon oluşturur. Bu sayede sporcular, maç içerisinde yüksek şiddetli aksiyonları daha sık ve daha az performans kaybı ile gerçekleştirebilir. Araştırmalar, kısa süreli yoğun sprint antrenmanlarının bile RSA performansında anlamlı gelişmeler sağlayabileceğini göstermektedir. Bu durum mikro dozlamamanın özellikle zaman kısıtlı dönemlerde neden etkili olduğunu açıklamaktadır (Buchheit, M., 2012; Afonso ve ark., 2025).

6.3. Sprint Performansı ve Yüksek Şiddetli Koşular

Sprint performansı, futbol müsabakalarında maç sonucunu doğrudan etkileyen kritik faktörlerden biridir. Mikro dozlama yaklaşımı kapsamında uygulanan kısa mesafeli sprintler ve yüksek yoğunluklu yüklenmeler; maksimal hız gelişimi, hızlanma kapasitesi ve mekanik verimlilik üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Özellikle kısa süreli ve sık tekrar edilen sprint uyarıları, sinir-kas sisteminde yüksek aktivasyon sağlayarak performansın korunmasına yardımcı olur. Ayrıca bu tür yüklenmeler, oyuncuların sezon içerisinde kaybetmeye eğilimli olduğu sprint kapasitesinin stabil tutulmasını sağlar.

6.4. Nöromüsküler Performans ve Yorgunluk Yönetimi

Mikro dozlama yaklaşımının en önemli avantajlarından biri, nöromüsküler performans üzerindeki olumlu etkileridir. Geleneksel yüksek hacimli antrenmanlar genellikle, kas hasarı, merkezi sinir sistemi yorgunluğu ve performans düşüşü ile ilişkilendirilirken, mikro dozlama bu etkileri minimize etmeyi hedefler. Düşük hacimli yüklenmeler sayesinde ise kas liflerinde aşırı hasar oluşmaz, sinir sistemi daha hızlı toparlanır. Ayrıca antrenman kalitesi korunur. Bu durum, özellikle sezon içi süreçte performans sürekliliği açısından büyük avantaj sağlamaktadır (Buchheit, M., 2012).

6.5. Metabolik Yanıtlar ve Laktat Dinamikleri

Futbolda yüksek şiddetli aktiviteler sırasında laktat üretimi artmakta ve bu durum yorgunluk ile ilişkilendirilmektedir. Mikro dozlama yaklaşımında

uygulanan yüksek yoğunluklu kısa süreli egzersizler sırasında metabolik uyum anlamında fizyolojik gelişimler görülmektedir. Laktat toleransını artması, tamponlama kapasitesini gelişmesi ve metabolik verimliliği artışı ön plandadır. Bu adaptasyonlar, oyuncuların yüksek şiddetli eforları daha uzun süre sürdürebilmesine olanak tanır.

6.6. Performansın Korunması vs Geliştirilmesi

Sezon içi antrenmanlarda en büyük sorunlardan biri, performansın geliştirilmesinden ziyade korunmasının hedeflenmesidir. Mikro dozlama yaklaşımı bu noktada önemli bir avantaj sunar:

- Klasik modeller → performansı korur
- Mikro dozlama → koruma + geliştirme potansiyeli sunar

Özellikle kısa süreli yoğun uyarıların, detraining etkisini önlemede etkili olduğu ve bazı durumlarda performans artışı sağlayabildiği gösterilmiştir.

7. Tartışma

Modern futbolun artan fiziksel talepleri ve yoğun müsabaka takvimi, geleneksel yüksek hacimli dayanıklılık antrenmanlarının uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu bağlamda mikro dozlama yaklaşımı, düşük hacimli ancak yüksek yoğunluklu yüklenmeler ile benzer hatta bazı durumlarda daha üstün adaptasyonlar sağlayabilmesi açısından dikkat çekmektedir. Nitekim son yıllarda yapılan çalışmalar, düşük hacimli yüksek yoğunluklu interval antrenmanlarının aerobik kapasite ve metabolik adaptasyonlar üzerinde anlamlı gelişimler sağladığını ortaya koymuştur (Buchheit & Laursen, 2013; MacInnis & Gibala, 2017).

Bu çalışmada ele alınan mikro dozlama yaklaşımının VO_2max üzerindeki etkileri, literatürde yer alan yüksek şiddetli interval antrenman çalışmalarının destekler niteliktedir. Özellikle kısa süreli ancak %90–95 maksimal kalp atım hızı seviyesinde gerçekleştirilen yüklenmelerin, kardiyovasküler adaptasyonları tetiklediği ve aerobik kapasitenin korunmasına katkı sağladığı belirtilmektedir (Helgerud ve ark., 2007; Iaia & Bangsbo, 2010). Bu durum, milli takım araları gibi sınırlı sürelerde bile aerobik kapasitenin sürdürülebileceğini göstermektedir.

Tekrarlı sprint yeteneği (RSA) açısından değerlendirildiğinde, mikro dozlama yaklaşımının hem aerobik toparlanma süreçlerini hızlandırdığı hem de nöromüsküler performansı desteklediği görülmektedir. Buchheit (2012), RSA performansının yalnızca anaerobik kapasite ile değil, aynı zamanda aerobik sistemin etkinliği ile yakından ilişkili olduğunu vurgulamıştır. Bu doğrultuda mikro dozlama ile uygulanan kısa süreli yüksek yoğunluklu sprint

tekrarlarının, sprintler arası toparlanmayı iyileştirerek performans sürekliliğine katkı sağladığı söylenebilir.

Sprint performansı açısından mikro dozlama yaklaşımı değerlendirildiğinde, düşük hacimli ancak yüksek frekansta uygulanan sprint uyaranlarının sinir-kas sistemi üzerinde olumlu etkiler yarattığı görülmektedir. Haugen ve ark. (2019), sprint performansının korunması için düzenli yüksek yoğunluklu uyaranların gerekli olduğunu belirtmiş ve sezon içi süreçte sprint kapasitesinin korunmasının kritik olduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda mikro dozlama, sprint performansında meydana gelen sezon içi düşüşleri önleyebilecek etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Oyun temelli antrenmanlar ile lineer koşu temelli antrenmanların karşılaştırıldığı çalışmalarda, her iki modelin farklı avantajlara sahip olduğu ancak hibrit kullanımın daha etkili olduğu ifade edilmektedir (Hill-Haas ve ark., 2011; Clemente ve ark., 2020). Bu çalışmada önerilen mikro dozlama yaklaşımı da benzer şekilde hem SSG hem de lineer sprint ve interval yüklenmelerin birlikte kullanılmasını içermektedir. Bu durum, antrenmanın hem fizyolojik hem de teknik-taktik boyutlarını kapsaması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Sezon içi antrenmanların en önemli hedeflerinden biri performansın korunmasıdır. Ancak mikro dozlama yaklaşımı, yalnızca performansın korunmasını değil, aynı zamanda sınırlı sürelerde performans gelişimi sağlama potansiyeli de sunmaktadır. Bu durum, detraining etkisinin önlenmesi ve hatta tersine çevrilmesi açısından önemli bir avantajdır. Özellikle kısa süreli yüksek yoğunluklu antrenmanların, düşük hacimli olmalarına rağmen yüksek adaptasyon oluşturduğu gösterilmiştir (Gibala ve ark., 2012).

Bununla birlikte mikro dozlama yaklaşımının bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle, yüksek yoğunluklu yüklenmelerin yanlış planlanması durumunda aşırı yüklenme ve sakatlık riski ortaya çıkabilir. Ayrıca bireysel farklılıklar (oyuncu seviyesi, mevki, yük geçmişi) dikkate alınmadan yapılan uygulamalar beklenen adaptasyonları sağlamayabilir. Bu nedenle mikro dozlama uygulamalarının, objektif yük takip sistemleri (GPS, kalp atım hızı, RPE) ile desteklenmesi gerekmektedir (Impellizzeri ve ark., 2019).

Sonuç olarak, bu bölümde ele alınan bulgular mikro dozlama yaklaşımının, özellikle sezon içi milli takım aralarında uygulanabilecek etkili, zaman verimli ve performans odaklı bir antrenman modeli olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmaların, bu yaklaşımın uzun vadeli etkilerini ve farklı oyuncu profilleri üzerindeki sonuçlarını incelemesi literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

- Afonso, J., Nakamura, F. Y., Baptista, I., Pinho, G. R., Brito, J., & Figueiredo, P. (2025). Response to “Microdosing: A Conceptual Framework for Use as Programming Strategy for Resistance Training in Team Sports”. *Strength & Conditioning Journal*, 47(1), 118-119.
- Aguiar, M., Botelho, G., Lago, C., Maças, V., & Sampaio, J. (2012). A review on the effects of soccer small-sided games. *Journal of Human Kinetics*, 33, 103–113.
- Bangsbo, J. (1994). *Fitness training in football: A scientific approach*. August Krogh Institute.
- Buchheit, M. (2012). Repeated-sprint performance in team sport players. *Sports Medicine*, 42(6), 1–24.
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013). High-intensity interval training solutions to the programming puzzle. *Sports Medicine*, 43(5), 313–338.
- Clemente, F. M., Sarmiento, H., Rabbani, A., Van Der Linden, C. M., Kargarfard, M., & Costa, I. T. (2020). Variations of external load variables between medium- and large-sided soccer games. *Research in Sports Medicine*, 28(1), 1–14.
- Cuthbert, M., Haff, G. G., McMahan, J. J., Evans, M., & Comfort, P. (2024). Microdosing: a conceptual framework for use as programming strategy for resistance training in team sports. *Strength & Conditioning Journal*, 46(2), 180-201.
- Dolci, F., Hart, N. H., Kilding, A. E., Chivers, P., Piggott, B., & Spiteri, T. (2020). Physical and energetic demand of soccer: A brief review. *Strength & Conditioning Journal*, 42(3), 70–77.
- Gibala, M. J., Little, J. P., Macdonald, M. J., & Hawley, J. A. (2012). Physiological adaptations to low-volume high-intensity interval training. *Journal of Physiology*, 590(5), 1077–1084.
- Haugen, T., Tønnessen, E., & Seiler, S. (2019). Speed and sprint training in soccer. *Sports Medicine*, 49(2), 165–172.
- Helgerud, J., Engen, L. C., Wisløff, U., & Hoff, J. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(11), 1925–1931.
- Helgerud, J., et al. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(4), 665–671.
- Hill-Haas, S. V., Dawson, B., Impellizzeri, F. M., & Coutts, A. J. (2011). Physiology of small-sided games. *Sports Medicine*, 41(3), 199–220.
- Iaia, F. M., & Bangsbo, J. (2010). Speed endurance training is a powerful stimulus. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(2), 11–23.

- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., & Coutts, A. J. (2019). Internal and external training load. *Sports Medicine*, 49(3), 1–10.
- Jiménez-Rubio, S., Rodríguez, J. L. E., Escamilla-Galindo, V. E. G., Sáiz, S. L. J., & Del Coso, J. (2024). Effects of a 10-Week Athletic Performance Program on Match Performance Variables in Professional Football Players.
- Liu, G., Wang, X., & Xu, Q. (2024). Microdosing plyometric training enhances jumping performance, reactive strength index, and acceleration among youth soccer players: a randomized controlled study design. *Journal of sports science & medicine*, 23(2), 342.
- MacInnis, M. J., & Gibala, M. J. (2017). Physiological adaptations to interval training. *The Journal of Physiology*, 595(9), 2915–2930.
- Panascì, M., Ferrando, V., Castagna, C., Apollaro, G., Ruggeri, P., & Faelli, E. L. (2026). Small-Sided Games vs. Running-Based High-Intensity Interval Training: An Exploratory Study of the Effects on Physical Performance and Internal Load in Under-11 Male Football Players. *Sports*, 14(3), 114. <https://doi.org/10.3390/sports14030114>.
- Riboli, A., et al. (2020). Training load monitoring in soccer. *Frontiers in Physiology*, 11, 1–12.
- Škorik, M., Kalina, T., Pupiš, M., & Hrubý, M. (2026). The impact of microdosed plyometric training on speed and explosive abilities of football players during the pre-season. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*.
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., & Goodman, C. (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities. *Sports Medicine*, 35(12), 1025–1044.

Sporda Genetik Testler Performans İçin Belirleyici Midir?

Sedat Kahya¹

Akan Bayraktar²

Özet

Sportif performans, birçok faktörden etkilenen kompleks bir olgudur. Genetik faktörler, spor performansının belirlenmesinde önemli bir misyona sahip olabilir. Mevcut çalışma, sporda genetik testlerin spor performansını belirlemede etkili yöntemler olup olmadığını literatürde yer alan çalışmalar dahilinde incelemesi amacıyla yapılmıştır. Çalışma anlatısal (narrative) derleme türünde dizayn edilmiştir. Verilerin elde edilmesinde NCBI veri tabanında yer alan PubMed ve PubMed-Central arama motorları, Web of Science, Google Akademik veri tabanları kullanılmıştır. Çalışmada, DNA dizileme yöntemlerinin gelişmesi sonucunda genetik testlerin hem sayısının hem de kullanım alanlarının arttığı raporlanmıştır. Genetik testler, spora dair becerileri belirlemede kritik bir öneme sahip olsa da bu amaca ulaşmada bu testlerin halen erken bir aşamada olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, sporda genetik testlerin halihazırda yapılan uygulamaları incelendiğinde bu testlerin büyük bir oranının ticari amaçlı yapıldığı görülmektedir. Genetik testler, sporcunun sahip olduğu performans ile ilgili biyolojik alt yapıyı detaylı bir şekilde açıklamasına rağmen sporda başarının önemli bir şartı olan psikolojik ve zihinsel durumla ilgili birtakım eksiklikleri de barındırmaktadır. Ayrıca bu testler, insanları sahip olduğu biyolojik özelliklere göre sınıflayabilir. Bu durum, insanların yaşadıkları toplumda ayrımcılığa maruz kalmaları ile sonuçlanabilir. Bu sonuçlara rağmen sporda genetik testler insanlara birtakım faydalar da sağlayabilir. Bu testler aracılığıyla, sporcuların besin hassasiyetleri ve darbeye bağlı olmayan yaralanma eğilimleri rahatlıkla tespit edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre de sporcuya/sporculara özgü antrenman planlamaları yapılarak sporda başarı yüzdesi önemli oranda artırılabilir.

1 Dr., Milli Eğitim Bakanlığı, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1169-2642>
sedatkayha58@gmail.com

2 Doç. Dr., Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3217-0253>, akan.bayraktar@alanya.edu.tr

Sonuç olarak, genetik testler kontrollü bir şekilde amaca hizmet ettiği sürece mevcut yetenek testlerine entegre edilerek kullanılabilir. Alanla ilgili daha fazla çalışmanın yapılması önerilmektedir.

Giriş

Yetenek, belirli bir alanda ifade edilen ve doğuştan getirilen yüksek performansa ilişkin bir olgu olarak tanımlanabilir (Tümen, 2024). Bu olgu; sanat, spor, dil, sayısal, sözel, sosyal, akademik, vb. birçok alanı içerisine alan geniş bir terimdir. Birey/bireylerin sahip olduğu olası beceri durumları, onların ilgili alanlarda başarılı olmalarında önemli bir kriter olabilir. Ancak bu başarının elde edilmesinde, çoğu faktörün etki gücü dikkate alınması gereken önemli bir husustur. Çünkü yetenek, kalımsal olarak belirlenen ve çevre etkisiyle şekillenen kompleks bir özelliktir (Sevimli, 2015).

Spor, günümüzde insanların bireysel, takım, profesyonel, rekreatif, vb. birçok farklı şekillerde dahil olduğu etkinliklerdir. Teknolojik gelişmelerin gölgesinde gelişen spor, zamanla daha spesifik alanlara hizmet etme gayesiyle sporcu yeteneğinin belirlenmesinde önemli bir misyon üstlenmiştir. Bu görevin yerine getirilmesinde, başarının ilgili olduğu performans karakteristiğinin ortaya çıkarılması nihai hedeftir. Bu durum, spora dair becerilerin zaman kaybetmeden tespit edilerek geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, sportif başarıda erken dönem spora başlama önemlidir (Güçlüöver ve ark., 2019).

Spora özgü becerilerin tespit edilmesinde, birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerin ortak noktası, bireylerin spor branş/branşlarına özgü beceri uygunluğunu fiziksel parametreler üzerinden tahmin edebilmek üzerinedir. Ancak bu testler, bazı durumlarda öngördükleri amaçlara tam olarak ulaşamayabilir. Bu bağlamda, iyi bir kısa mesafe koşucusunun sahip olduğu performansı koşunun yalnız fiziksel durumu ile davranışsal bir şekilde açıklamak sürat kavramının tam olarak değerlendirilmesi için doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Bu durum, sürat performansını etkileyebilecek başkaca faktörlerin varlığını da düşündürmektedir. Fizikte sürat, hareket halindeki bir nesnenin birim zamanda aldığı yolun uzunluğu tanımlayan skaler bir büyüklüktür. Ancak bu tanımlama sürati yalnız mekanik ve fiziksel açılarından tanımlayan bir özellik değildir. Sürat, aynı zamanda biyolojik ve fizyolojik süreçleri de içerisine alan bir olgudur. Sınırlardan gelen uyarılar yardımıyla kasların ATP (Adenozin trifosfat)'yi hızlı bir şekilde yenilemesi süratin fizyolojik boyutuna örnek teşkil etmektedir. Bu durum, ATP'nin rejenerasyonunda, kalımsal mekanizmaların sürat becerisinde önemli olabileceğini göstermektedir (Yağcıner, 1990). Ayrıca kaslarda enerji metabolizmasının düzenlenmesinde, bazı genetik markörlerin anahtar rol oynadığı ve bu amaçla sporcuların spor branşlarının gerektirdiği

sürat, dayanıklılık, kuvvet, vb. becerilerinin genetik faktörlerin etkisi altında olduğunu da bilinmektedir (Balberova ve ark., 2021).

Spor ve genetik ilişkisi bağlamında yapılan literatür taramasında, spor branşına özgü performans becerileri üzerinde bazı biyolojik özelliklerin genetik testler aracılığıyla belirlenebildiği görülmüştür. Bu amaçla, genetik testler spor performansını belirlemede kritik bir öneme sahip olabilir (Varley ve ark., 2017). Ancak bu sonucun aksine, ilgili literatürde genetik testlerin spor yeteneğini belirlemede tam bir yetkinliğe sahip olmadığını belirten bazı çalışmalar da bulunmaktadır. Bu doğrultuda, spor yeteneğinin belirlenmesine yönelik yapılan genetik testlerin etki durumları ile ilgili literatür kapsamında net veriler bulunmamaktadır.

Mevcut çalışma, sporda genetik testlerin spor performansını belirlemede etkili yöntemler olup olmadığını literatürde yer alan çalışmalar dahilinde incelemesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen verilerin bu alanda çalışan bireylere rehber olabileceği düşünülmektedir.

Yöntem

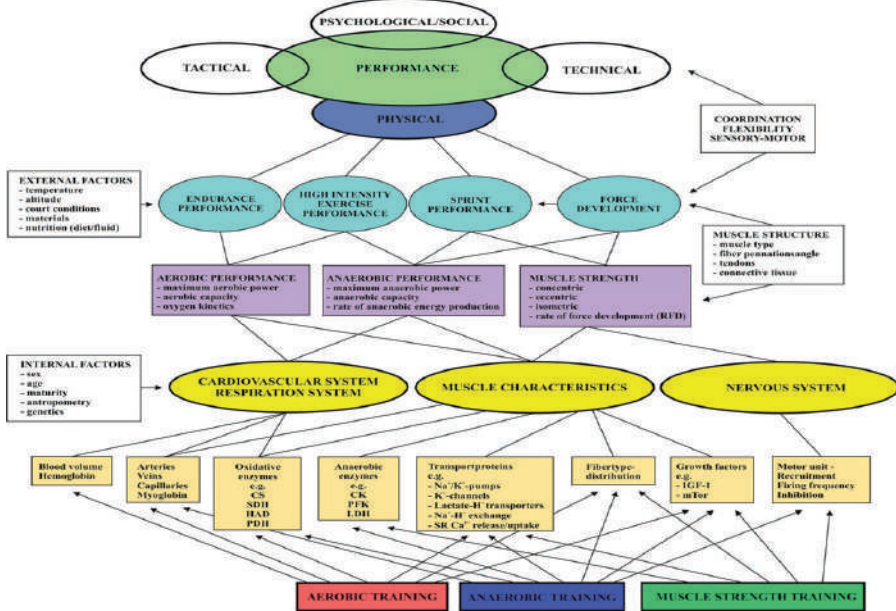
Mevcut çalışma, anlatsal (narrative) derleme türünde olup genel literatür değerlendirmesi şeklinde dizayn edilmiştir. Anlatsal derlemeler, literatürde konu ile ilgili verileri özetleyen, eleştiren ve kritiğini yapan makale türleridir (İlçe ve ark., 2025). Çalışma kapsamında, verilerin elde edilmesinde NCBI veri tabanında yer alan PubMed ve PubMed-Central arama motorları, Web of Science, Google Akademik veri tabanları aktif olarak kullanılmıştır. İlgili veri tabanlarına “sporda yetenek belirleme” “ sporda genetik testler ” “ genetik test “ “ sporda performansı etkileyen faktörler, “ spor ve genetik ilişkisi “ anahtar kelimeleri yazılarak elde edilen veriler titizlikle incelenmiş ve çalışma kapsamına uygun olan dokümanlar çalışmaya dahil edilmiştir. Mevcut çalışmada, yalnız alanla ilgili yapılmış makale türündeki çalışmalardan faydalanılmıştır. Bu amaçla çalışmaya; geleneksel derleme, sistematik derleme ve meta analiz, kohort, kesitsel, vaka-kontrol türünde yapılmış makaleler dahil edilmiştir. Ayrıca çalışmada, PubMed verileri indekslemek için NIH (National Library of Medicine) veri tabanında bulunan MeSH (Medical Subject Headings)’den yararlanılmıştır. MeSH, PubMed veri tabanında yer alan makalelerin indekslenmesinde kullanılan NLM kontrollü eş anlamlılar sözlüğüdür.

Sportif Performans üzerinde Etkili Faktörler

İnsanoğlu, varoluşundan itibaren hayatta kalmak ve mevcut durumunu geliştirmek adına bazı temel yaşam becerileri edinmiştir. Sürekli mücadele içerisinde geçen asırlar ardından insanoğlu artık etkinliklerini daha planlı ve

düzenli bir şekilde yapmaya başlamış ve bunun sonucunda fiziksel aktiviteyi de içerisinde alan “spor kavramı” ortaya çıkmıştır. Spor, yaşadığımız dünyada hem sağlık hem de mücadele amaçlı birçok insan tarafından gerçekleştirilen ve belirli hareket deseni/desenlerine sahip uygulamalar bütünüdür. Ayrıca spor, insanların birbirleriyle rekabet ettiği ve bu amaçla sahip oldukları becerilerini ve fiziksel kapasitelerini ortaya çıkarttıkları eylemlerdir (Terlemez, 2022). Spor, günümüz dünyasında insanlar tarafından yoğun ilgiye maruz kalarak popülaritesi giderek artan bir konumda yer almaktadır (Yetim, 2000).

Genel olarak; fizyolojik, psikolojik, sosyolojik, teknik ve taktik becerileri içeren sportif performans kavramı sporun merkezinde yer alan ve sporcunun verimlilik düzeyini ifade eden bir olgudur. Bu olgu, spora özgü yapılması gereken görevin yerine getirilmesindeki çabaların tamamı olarak da tanımlanabilir (Aktürk ve Yüksek, 2023). Sportif performans, doğası gereği sürekli gelişim halindedir. Bu duruma sporcuyu açısından bakıldığında, sürekli artan performans spor başarısında istenen bir durumdur. Ancak spor performansını artırma noktasında, bazı hususların iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Özellikle performans üzerinde etkili olabilecek faktörlerin etki gücünü bilmek ve anlamak spor paydaşlarına önemli bir kılavuz olabilir (Bozkurt, 2009). Sportif performans, birçok faktörün hem dolaylı hem de doğrudan etkisi altındadır. Bu durum, spor performansının multifaktöriyel özelliğinden sahip olması ile açıklanabilir (Kürklü ve ark., 2025; Yaşar ve Umay, 2025).



Şekil 1. Sportif performansı etkileyen faktörlerin ilişki durumları (Bangsbo, 2015).

Şekil 1’de görüldüğü üzere spor performansını etkileyen faktörler, birbirleriyle karışık bir ilişki halindedir. Bu ilişkiye, farklı antrenman uygulamaları ve spor branşları da dahil edildiğinde mevcut durum daha da karmaşık hale gelmektedir. Ayrıca son yıllarda, bu alanda yapılan çalışmalarda, farklı antrenman uygulamalarının spor performansı üzerinde önemli etkilere sahip olabileceği de ortaya çıkarılmıştır (Alpözgen ve ark., 2022). Spor performansını etkileyen faktörlerin sayısındaki artışa rağmen bu kavram genel anlamda içsel ve dışsal olmak üzere iki bölümde incelenmektedir. Bu faktörler, her sporcu için farklı etki düzeyinde ifade edilmektedir. Bu faktörlere ilişkin bilgiler aşağıda sunulmuştur. (Tablo 1).

Tablo 1. Spor performansı üzerinde etkili faktörler (Bayraktar ve Kurtoğlu, 2009).

Sportif Performansı Etkileyen Faktörler	
İçsel faktörler	Dışsal faktörler
Yaş	Beslenme
Cinsiyet	Ergojenik yardımcıları (vitamin, mineral, vb.)
Genetik	Ekonomik bileşenler
Sinir-kas uyumu	İklim ve sıcaklık
Psikoloji ve motivasyon	Coğrafi konum (yükseleti)
Fizyoloji	Seyirci ve tezahürat
Kognitif	Sosyal çevreyle ilişki
Anatomik	Aile ve arkadaşlık durumu
Kas yapısı (Tip I ve Tip II)	Geçirilmiş sakatlanma durumu
Kas-iskelet sistemi adaptasyonu	İllegal madde kullanımı (doping)
Kas-iskelet biyomekaniği ve kinantropometrik özellikler	Zamansal farklılıklar
Otonom sinir sistemi	Beğeni ve takdir edilme duygusu
Hormonal	Antrenman yöntemleri
Metabolizma	Antrenmanın içeriği, yoğunluğu, şiddeti ve sıklığı
Enerji harcama mekanizmaları	Esneklik ve hareket genişliğine ilişkin uygulanan yöntemler
Vücut organlarının ilişkisi	Antrenör etkisi
Alerjik durumlar	Isınma ve soğuma
Kardiyopulmoner sistem durumu	Uykunun kalitesi ve düzeni

Spor performansı, sporcu/sporcuların performanslarına ilişkin gerçekçi veriler ortaya çıkarsa da bu durum üzerinde spor branşına özgü bazı beceriler önemli bir sebep olabilir. Bu durumu bir örnekle açıklamak gerekirse; uzun

mesafe atletizm sporcusunun koşu sırasında gösterdiği performans ile bir basketbolcunun topla yaptığı ani hareketler, performans üzerinde etkili faktörlerin spor dalına özgü olarak da farklılaştığını göstermektedir (Kılınç ve ark., 2011). Bu örnekten de anlaşılacağı üzere spor performansı ile ilgili iki farklı fiziksel beceri (dayanıklılık ve sürat, çeviklik) performans akışını önemli oranda değiştirebilmektedir. Ancak, sporun kompleks yapısı göz önüne alındığında spor performansını yalnız fiziksel faktörlerle değerlendirmek sorunun çözümünde doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Bunun üzerinde, sporcunun psikolojik hazır oluşu da dikkate alınması gereken bir husus olabilir. Bir okçunun atışı esnasında göstereceği sağlam bir konsantrasyonun, başarı için belirleyici bir etken olması bu duruma örnek olarak gösterilebilir (Kılınç ve Özen, 2024). Burada görüldüğü üzere, sportif performans yapısı gereği hem fiziksel hem fizyolojik hem de psikolojik faktörden etkilenme potansiyeline sahiptir. Performans üzerinde etkili faktörlerin çok boyutlu yapısı dikkate alındığında, bu durum üzerinde başkaca faktörlerin etkisi de dikkate alınmalıdır. Bu amaçla, insanların sahip olduğu biyolojik özellikler spor performansı üzerinde önemli bir etmen olabilir.

Kalıtımsal Faktörlerin Spor Performansına Etkisi

Spor performansının kompleks yapısı dikkatli bir şekilde incelendiğinde, birçok faktörün bu yapı üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmektedir. Bu anlamda, içsel ve dışsal faktörler sportif başarıyı belirleyen etkenler olabilir. Ancak spor performansının geliştirilmesinde, bu faktörlerin etki düzeyleri sporcudan sporcuya farklılık gösterebilmektedir. Özellikle bu durum, sporcunun doğuştan getirdiği beceriler ile sonrasında elde ettiği beceriler karşılaştırıldığında daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Sporcular, ilgili spor dallarındaki becerilerini geliştirmelerinde her ne kadarda düzenli ve doğru antrenman uygulamalarına maruz kalsalar da bazı durumlarda, egzersize bağlı olarak, performans limitlerinin ötesine geçmeleri çok da muhtemel gözükmemektedir (Yamanaka ve ark., 2026). Bu durum, antrenman bilimlerinde yapılan uzun soluklu çalışmalarda bahsi geçen spora özgü; yüklenme, şiddet, yoğunluk, dinlenme, beslenme, adanmışlık, güven, motivasyon, vb. faktörlerin bunca zaman boşuna mı ? incelendiğine işaret etmekte yoksa spor performansının gizli kalmış ve halen keşfedilmemiş bazı yönlerinin mi ? bulunduğunu bizlere göstermektedir. IGP (İnsan Genom projesi)'nin tamamlanmasının ardından bu soruların cevabı netlik kazanarak spor performansının kalıtımsal mekanizması alanda yapılan birçok çalışmayla ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, yapılan çalışmalarda spor performansına katkıda bulunan genetik yapılar incelenmiştir (Ma ve ark., 2013). Özellikle 4488 ikiz üzerinde yapılan çalışmada, spor performansı üzerinde genetiğin % 66'lık bir güce sahip

olduğu raporlanmıştır (De Moor ve ark., 2007). Bu sonuç ardından, spor genetiğine yönelik ilgi giderek artmaya başlamıştır. Spor genetiği araştırmaları sonucunda sportif performans kavramı, spor fenotipini şekillendirmekten sorumlu olan birbirine bağlı genlerin ve varyantlarının karmaşık etkileşime dayandırılmıştır (Naureen ve ark., 2020). Literatürde, spor performansının kalıtsal mekanizmasını araştıran birçok çalışma bulunmasına rağmen, bu mekanizmanın nasıl çalıştığı ile ilgili belirsizlikler halen devam etmektedir.

Genetik Testler

Omiks teknolojilerde yaşanan hızlı gelişmeler sonucunda, DNA dizileme yöntemleri gelişmiş ve önceleri yapılması hem masraflı hem de zaman kaybına sebep olan uygulamalar yerini daha kısa süreli ve yüksek doğruluğa sahip yeni tekniklere bırakmıştır. Bu anlamda IGP, insanlık tarihi için bir dönüm noktası olmuştur. ABD Enerji Bakanlığı ve Ulusal Sağlık Enstitüleri (NIH) öncülüğünde yürütölen bu uluslararası proje, 1990 yılında başlamış ve 2003 yılında tamamlanmıştır. IGP, DNA dizileme yöntemlerine yeni ve çok boyutlu bir bakış açısı getirmiş ve bu durum tek gen dizilemelerinden birçok genin kısa sürede aynı anda dizilendiği yöntemlerin gelişimine kadar geniş bir yelpazede insan biyolojisine önemli katkılar sağlamaya başlamıştır. Bu yöntemlerden biri olan GWAS (Genome-Wide Association Study), bir hastalık veya belirli bir özellik için istatistiksel olarak ilişkili genomik varyantları belirlemek için kullanılan bir araştırma yaklaşımıdır. Bu yöntem, birçok insanın genomunu inceleyerek belirli bir hastalığa veya özelliğe sahip olanlarda, bu hastalığa veya özelliğe sahip olmayanlara kıyasla daha sık görölen genomik varyantları tanımlamayı içerir. Genomik varyantlar belirlendikten sonra, genellikle hastalığa veya özelliğe doğrudan katkıda bulunan yakınlardaki varyantlar araştırılmaktadır (NIH, 2016). GWAS, karmaşık hastalık özelliklerine yakınlık varyantlarını keşfetmede en güçlü ve yaygın olarak kullanılan yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Ayrıca teknolojiadaki gelişmeler, maliyetlerin düşmesi ve büyük, iyi tanımlanmış vaka ve kontrol gruplarının oluşturulması gibi gelişmeler GWAS kapsamında yapılan taramaların prevalansını artırmıştır (McAllister ve ark., 2011). Bu bağlamda, GWAS birçok kalıtsal hastalığın tanımlanmasında kritik bir öneme sahip olmuştur (Chen ve Schunkert, 2021). Hastalıklara hassasiyetin belirlenmesinde GWAS haricinde, aday gen (candidate gene) ve bağlantı (linkage) yaklaşımları da bulunmaktadır.

Aday genler, genellikle olası mutasyonları ortaya çıkarmak için, temel bilimsel ve klinik çalışmalardan elde edilen önceden var olan bilgileri içermektedir. Bu yaklaşımın avantajı, genetik varyantların nispeten hızlı ve küçük soy ağaçları şeklinde tanımlamasıdır (Lagendijk ve ark., 2010). Ayrıca aday gen çalışmaları, biyolojik bilgilere dayanarak önceden seçilen bir genin alt

kümesinde yer alan polimorfizmleri de incelemektedir. Sonrasında incelenen sınırlı sayıda polimorfizmler, orta büyüklükte örneklem boyutları kullanılarak küçük etkilerin tespit edilmesine olanak tanıyan çoklu test düzenlemelerine dönüştürülür (Basson ve ark., 2012).

Bağlantı (Linkage) yaklaşımında ise, etiyojide yer alan belirli genler hakkında hiçbir varsayımda bulunmadan, bir özellik çoklu yapı içerisinde ayrıştığı kromozal bölgeler bakımından incelenir (Riley, 2004).

Günümüzde genetik testler, birçok hastalığı farklı yöntemlerle tespit edebilmektedir. Bu bağlamda, genetik testler zamanla farklı uygulama alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Spor, bu alanlardan biridir. Yapılan çalışmalar, spor performansının genetik süreçlerle açıklanabileceğini ortaya çıkartmıştır.

Sporada Yetenek Seçimi

Sporcunun sahip olduğu performans karakteristiğini belirlenmeye yönelik birçok test yapılmaktadır. Bu testlerin nihai amacı, sporcuların ilgili spor branşlarındaki becerilerini erken yaşlarda keşfederek onların uzmanlaşma ve gelişim sürelerini ciddi oranda kısaltmaktır. Bu sayede spora harcanan emek, zaman ve yatırım doğru bir şekilde kullanılmış olacaktır. Sporada yetenek, sportif bir alana yönelik olarak standartların üstünde olan ancak tam anlamıyla gelişmemiş beceriler için kullanılan bir terimdir (Arabacı, 2008). Çocuk ve genç bireylerin sahip oldukları becerileri erken dönemde ortaya çıkartmayı amaçlayan sporda yetenek seçimi, (Tolu ve Atılğan, 2024) her spor branşına özgü olarak birtakım ön şartları içermektedir. Bunlar; antropometrik, tekno-motorik, kondisyonel, öğrenim becerisi, performans, kognitif beceriler, sosyal ve psikolojik olarak sıralanabilir (Sevim, 1991). Spor becerisini belirlemede, her ne kadar da spora özgü şartlar yerine getirilse de sporun doğasında var olan çok faktörlü kompleks yapı bu durum içinde geçerlidir. Spor becerisi, yalnız sporcunun doğuştan sahip olduğu beceriler ile bu becerilerin tespit edilmesi süreçlerini değil aynı zamanda üzerinde içsel ve dışsal faktörlerin etkili olduğu koşulları da kapsayan bir süreçtir. Bu doğrultuda, Guevara-Araya ve ark. (2025) yaptıkları çalışmada sporda yetenek seçiminde; yaş, cinsiyet, coğrafya ve uygunluk düzeyi gibi faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini raporlamışlardır.

Sportif başarıda, sporcuların ilgili oldukları spor branşlarındaki becerilerine ait performans karakteristiklerinin yaşamın ilk yıllarında belirlenmesi ve bu veriler üzerinden sporcu/sporcuların yetiştirilmesi önemli bir kriterdir. Bu amaçla, bu alanda yapılan çalışmalarda sportif başarı ile spora erken dönem yönlendirme arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya çıkarılmıştır

(Dinçer, 2023). Ayrıca bu durum üzerinde, küçük yaştaki potansiyel bireylere uygulanan testlerin içerdiği kapsam da önemli bir etken olabilir. Bu doğrultuda, sporda beceri testlerinin genel kapsamda bir uygulamaya sahip olması sporcu performansının doğru tahmin edilmesinde anahtar rol oynayabilir. Marinho ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada genel motor beceri testlerinin yetenek belirleme sürecinde, performans ayırımında ve tahmininde önemli bir misyona sahip olduğunu raporlamışlardır. Bu durum üzerinde, motor koordinasyon düzeyinin spor performansı ile olan ilişkisi sebep olarak gösterilmiştir. Ancak spor yeteneği her ne kadarda bu testler yardımıyla nihai olarak belirlense de maksimum performans değerini ortaya çıkartmada mutlak bir sonuç veremeyebilir (Berthelot vd., 2015).

Sporda Genetik Testler

Son yıllarda, sportif performansın altında yatan gizli mekanizmaların araştırılması ve teknolojik gelişmelerin spor biyolojisine yansımaları sporda yetenek belirleme sürecini çok farklı bir boyuta getirmiştir. Özellikle bu durum, sporcuların doğuştan getirdiği spora özgü birtakım becerilerin tanımlanmasına olanak sağlayarak sportif performansın başarıyı tahmin edebilme yüzdesine ciddi katkılarda bulunmuştur. Bu doğrultuda sporda genetik testler, spor becerisinin genetik alt yapısını inceleyerek performans üzerinde hangi genotipin etkili olduğunu belirleyen uygulamalar olarak tanımlanabilir (Akgül ve ark., 2018).

Günümüzde, sporda genetik testler büyük bir endüstri haline gelmiştir. Hatta bu testler ile ilgili veriler, sporculara ve alilerine doğrudan sunulan bir hizmet olmuştur. Bu amaçla, DTC (Direct-to-Consumer) genetik testler, sporcuların sahip olduğu performans durumunu (güç, kuvvet, dayanıklılık, yaralanma, kardiyovasküler sistem, vb.) tahmin eden ticari amaçlı bir uygulamadır (Wagner ve Royal, 2012). DTC genetik testlerde, öncelikle birey/ bireylerin ağız hücrelerinden salya örnekleri pamuk çubuk aracılığıyla alınır. Bu örnekler, DNA izolasyonu yapılacak ilgili şirkete gönderilir. Daha sonra alınan bu numuneler, şirket içi programlar yardımıyla analiz edilir ve genetik profile ilişkin elde edilen veriler doğrudan kişi/kişilere sunulur. Genetik testler, şirketlerin operasyonel iş ve işlemlerine göre farklılaşabilmektedir. Genetik testlerin ortalama maliyeti, uygulamayı yapan test şirketlerine değişmekle birlikte ortalama 100 ile 1000 dolar arasındadır (Oh, 2019). Çoğu DTC genetik test uygulamalarında, tüm genom dizilenmez. Genellikle, genetik kod boyunca belirli varyantların varlığını veya yokluğunu kontrol eden SNP-çip genotipleme adı verilen bir yöntem kullanılır ve bu uygulamalarda belirli tek nükleotid polimorfizmleri (SNPs²), küçük insertions (eklemeler) veya deletions (silinmeler) lar taranır (Horton ve ark., 2019). DTC genetik testleri uygulayan

şirketler, Web siteleri üzerinden müşterilerine genellikle řu iddialarda bulunurlar (Webborn ve ark., 2015).

- Genlerinizin atletik özelliklerinize nasıl katkıda bulunduğunu keşfedin.
- Spor genetiği sonuçlarınıza göre antrenmanınızı kişiselleştirin.
- Doğuştan gelen gücünüzün avantajını alın ve sınırlarınızı aşın.
- Çocukların takım ve bireysel sporlarında, ebeveynlere ve antrenörlere erken bilgi sağlar.
- Genetik yatkınlığın belirlenmesi, atletik ve spor gelişiminde gerekli olan antrenman ve kondisyon programlarının ana hatlarının çizilmesinde değerli olabilir.
- Test sonuçları, daha sonra diğer atletik performans unsurlarıyla birlikte geliştirme sürecinde kullanılabilir.
- DNA sonuçlarınızı kullanarak yağ yakmanıza, incelmeye, kas yapmanıza ve daha fit olmanıza yardımcı oluyoruz.
- Atletik yeteneği belirleyen genetik testler şunları tanımlar;
 - hem dayanıklılık sporlarına hem de güç gerektiren sporlara katılma konusunda daha iyi veya eşit bir yatkınlığa sahip olmayı,
 - 8 puanlık bir ölçekte dayanıklılık veya güç gerektiren sporlarla uğraşmaya yönelik genetik yatkınlığın puanını,
 - kaslarınızdaki kan akışının, çalışma kapasitesinin ve metabolik süreçlerin düzenlenmesini,
 - kas liflerinin hangi tür (hızlı ya da yavaş kasılan) olduğunu,
 - hücrelerdeki enerji varlığını,
 - egzersiz sırasında kaslarınızdaki sürekli enerjinin varlığını ve
 - kaslarınızın yorgunluğa karşı korunma düzeyi ve kapsamını.

Genetik testler sportif başarının tespitinde önemli bir göreve sahip olmasına rağmen, birtakım endişeleri de barındırmaktadır. Özellikle bu testlerin bilimsel alt yapıdan yoksun olarak dizayn edilmesi bu endişeleri daha da artırmaktadır. Bu doğrultuda, Zourmand ve ark. (2025) yaptıkları çalışmada genetik testlerin yetenek tespiti amacıyla kullanılmasına ilişkin etik hususların halen kritik bir endişe kaynağı olmaya devam ettiğini vurgulamışlardır. Bu sonuç üzerinde ilgili şirketlerin bu testleri uygulamada ve yorumlamada henüz istenen seviyeye gelmemeleri etkili olmuş olabilir. Bu amaçla, Collins ve September (2023) yaptıkları çalışmada, ticari anlamda, kas-iskelet sistemi yaralanma hassasiyetini

tahmin etmeye yönelik yapılan genetik testlerin gelişim aşamasında olduğunu raporlamışlardır. Bir diğer çalışmada, Borzemska ve ark. (2024) genetiğin yaralanmaları önlemedeki klinik uygulamalarının henüz çok erken bir dönemde olduğu tespit etmişlerdir. Ancak sporda genetik testlerin gelişim süreci içerisinde olması, bu testlere yönelik uygulamaların süreç içerisinde gelişeceği anlamına da gelmemelidir. Aksine bu durum, hızla gelişen teknolojiyle birlikte, bu alanda hizmet veren insanları yeni birtakım bilgi ve beceriler elde etmeye zorlayacak ve bu işe harcanan zaman ve maliyeti hatırı sayılır bir şekilde de artırabilecektir. Bu doğrultuda, Taranto ve ark. (2018) tarafından ABD’de yapılan çalışmada, spor hekimlerinin sağlam mesleki organizasyon politikaları geliştirebilmeleri için sporda genetik testler konusunda daha fazla bilgilendirilmeleri gerektiği raporlanmıştır. Ancak yaşadığımız dönem itibariyle sporun artan popüleritesi ve hızla gelişen teknoloji, her geçen zamanda sporda genetik testlere daha yeni ve daha farklı bir anlam yüklemiştir. Bu amaçla, günümüzde genetik testler spor kulüplerinin büyük paralara transfer edeceği sporculardan bazı ülkelerin prestijlerini korumak adına katılacakları organizasyonlardaki saygınlıklarına kadar birçok amaca hizmet eden bir lokasyondadır. John ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, genetik testlerin her ne kadar da ciddi etik kaygılara yol açtığı bilinse de 21. yüzyılda bazı spor federasyonları ve bazı ülkeler oyuncularını için genetik testler yapmayı gündemlerine aldığını raporlamışlardır.

Genetik testler; kuvvet, sürat, dayanıklılık, esneklik, hareket genişliği gibi motorik beceriler ile kardiyopulmoner sistem verimliliği, darbeye bağlı olmayan yaralanmalara karşı hassasiyet, kas fibril yapısı, vb. spora özgü performans özelliklerini belirli polimorfizm, genotip ve alel üzerinden belirleyebilmektedir. Bu doğrultuda, *ACE* (Anjiyotensin-I Dönüştürücü Enzim) I > D rs1799752 insersiyon-delesyon ve *ACTN3* (Alfa-Aktinin 3) C > T rs1815739 tek nükleotid polimorfizmleri (SNPs) spor genetiğinde sıklıkla çalışılan genlerdir. Özellikle *ACE* I/D rs1799752 polimorfizmi yüksek irtifa dağcılarını konu alarak çalışılan ilk gen varyantı olma özelliğine sahiptir (Montgomery ve ark., 1998).

ACE, renin anjiyotensin önemli bir parçası olarak, damarların iç yüzeylerinde bulunan tek katlı yassı hücrelerden oluşan endotel aktivitesi için kritik öneme sahip bir enzimdir. RAAS (Renin-Angiotensin-Aldosterone System), kan basıncını ve akış dengesini düzenleyen bir hormon sistemidir (Liu ve ark., 2012; Durmic ve ark., 2017). *ACE* enzim aktivitesinin ana fonksiyonu, anjiyotensin I ‘i anjiyotensin II’ye dönüştürerek vazokonstriktör kinin degradasyonu oluşturmak ve damarların iç yüzeyinde bulunan endotel zarını inaktif hale getirmektedir. Böylece bradikinin peptiti parçalanır ve damar içi basınç da yükselmeye başlar (Di Mauro ve ark., 2010). Bu genle ilgili yapılan çalışmalarda, *ACE* I/D rs1799752 polimorfizm intron 16’da 287 bp (baz

çifti)'nin insertion (I alel) sporda dayanıklılık performansı ile ilişkilendirilirken bu durumun aksine deletion (D alel) ise sporda güç ve kuvvet performanslarıyla ilişkilendirilmiştir (Cabrera ve ark., 2025; Goulart ve ark., 2025).

α -Aktinin, iskelet kasının Z çizgisinde bulunan ve kas liflerinin düzenli dizilimini ve kasılma fonksiyonunu korumak için ince miyofilamentlerle birleşen bir aktin bağlayıcı proteindir (Yang ve ark., 2023). α -Aktinin proteinin işlevi, *ACTN3* geni tarafından düzenlenmektedir. *ACTN3* geni, iskelet kaslarında bağlayıcı bir protein olan α -aktinin-3'ü kodlar. Bu genin ekson 16'daki 1747C > T transisyonu, (CGA'dan TGA'ye) arginin amino asitinin (C alleli) erken durdurma kodonuna (T aleli) denk gelmesine sebep olur (Lima ve ark., 2023). *ACTN3* geni ile ilgili yapılan çalışmalar, bu gendeki (rs1815739) C > T baz değişikliğinin iskelet kaslarının hız ve güç özellikleriyle ilişkili olabileceğini gösterilmiştir. Bu doğrultuda, *ACTN3* sadece hızlı kasılan glikolitik kas liflerinde ifade edilmekte olup, bu gendeki iki T alelinin (anlamsız aleller) birleşimi *ACTN3* gen ifadesinin tamamen yokluğuna yol sebep olabilmektedir (Godina ve ark., 2025).

Literatür incelendiğinde, sporda genetik testler ile ilgili olarak birçok çalışmanın bulunduğu görülmektedir. Bu bağlamda, özellikle *ACE* I/D ve *ACTN3* R577X gen varyantları sporcu performansını belirlemede üzerinde sıklıkla çalışılan genlerdir. Sonuç olarak, bu genlerin spor performansı üzerindeki etkisine yönelik birçok kanıt elde edilmiştir. Ancak *ACE* I/D ve *ACTN3* R577X gen varyantları ile spor performansı ilişkisine yönelik daha fazla ve sağlam kanıtlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Mevcut veriler, barındırdığı sınırlılıklar sebebiyle spor performansı ve genetik ilişkisini henüz tam olarak açıklayamamaktadır (Ferreira ve ark., 2024). Bu doğrultuda, genetik testler spor yeteneğini tek başına belirlemede yeterli veriye sahip olmayabilir. Genetik testlerle birlikte diğer test araç-gereçleri ve tekniklerinin birlikte kullanılması, spora yatkınlığın yüksek doğrulukla tahmin edilmesine önemli katkılar sağlayabilir (Pickering ve ark., 2019).

Sonuç

Çalışmada, spor performansını belirlemede uygulanan yetenek testlerinin çocuk ve gençlerin sahip olduğu beceri potansiyelini belirlemede önemli bir misyona sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca teknolojide yaşanan gelişmelere paralel DNA dizileme yöntemlerinin gelişmesi, spora dair biyolojik yapıyı keşfetmeye yönelik ilginin artmasına ve bu doğrultuda genetik testlerin hem sayısının hem de kullanım alanlarının artması sebep olmuştur. Mevcut çalışmada, genetik testlerin her ne kadarda spora dair becerileri belirlemede kritik bir öneme sahip olduğu tespit edilse de bu testlerin bu görevi yerine

getirmede halen erken bir evrede olduğu düşünülmektedir. Bu doğrultuda, sporda genetik testlerin halihazırda yapılan uygulamaları incelendiğinde bu testlerin büyük bir oranının ticari amaçlı yapıldığı görülmektedir. Genetik testler, sporcunun sahip olduğu performans ile ilgili biyolojik alt yapıyı detaylı bir şekilde açıklamasına rağmen sporda başarının önemli bir şartı olan psikolojik ve zihinsel durumla ilgili birtakım eksiklikleri de barındırmaktadır. Ayrıca bu testler, insanları sahip olduğu biyolojik özelliklere göre sınıflayabilir. Konuya bu açıdan bakıldığında, genetik testler insanların yaşadıkları toplumda ayrımcılığa maruz kalmalarına da sebep olabilir. Bu olumsuzluklara rağmen, sporda genetik testler insanlara birtakım faydalar da sağlayabilir. Bu testler aracılığıyla, sporcuların besin hassasiyetleri ve darbeye bağlı olmayan yaralanma eğilimleri rahatlıkla tespit edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre de sporcuya/ sporculara özgü antrenman planlamaları yapılarak sporda başarı yüzdesi önemli oranda artırılabilir.

Sonuç olarak, genetik testler kontrollü bir şekilde amaca hizmet ettiği sürece mevcut yetenek testlerine entegre edilerek kullanılabilir. Alanla ilgili daha fazla çalışmanın yapılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- Akgül, M., Ünlüışler, Ş., & Karaca, D. (2018). Genetik yapının sportif performansa etkisi. *Research Studies Anatolia Journal* 1(3), 424-437. doi.org/10.33723/rs.470847.
- Aktürk, O., & Yüksek, S. (2023). Masajın sporcu performansı üzerine etkilerinin incelenmesi . *Kafkas Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi* 3(1), 65-73.
- Alpözgen, A. Z., Sırma, G. Ç., & Işıklar, Ç. (2022). Sporcu performansını geliştirmede kullanılan güncel egzersiz yaklaşımları. *Aksaray University Journal of Sport and Health Researches* 3(1), 48-60.
- Arabacı, R. (2008). Olimpiyatlar için sporda yetenek seçimi ve spora yönlendirme projesi II. aşama sonuçlarının incelenmesi. *Sports Sciences* 3(2), 86-98.
- Balberova, O. V., Bykov, E. V., Medvedev, G. V., Zhogina, M. A., Petrov, K. V., Petrova, M. M., . . . Shnayder, N. A. (2021). Candidate genes of regulation of skeletal muscle energy metabolism in athletes. *Genes (Basel)* 12(11), 2-18. doi: 10.3390/genes12111682.
- Bangsbo, J. (2015). Performance in sports--with specific emphasis on the effect of intensified training. *Scand J Med Sci Sports*. 25 (Suppl. 4), 88-99. doi: 10.1111/sms.12605.
- Basson, J., Simino, J., & Rao, D. (2012). Between candidate genes and whole genomes: time for alternative approaches in blood pressure genetics. *Curr Hypertens Rep*. 14, 46-61. doi: 10.1007/s11906-011-0241-8.
- Bayraktar, B., & Kurtoğlu, M. (2009). Sporda performans, etkili faktörler, değerlendirilmesi ve artırılması. *Klinik Gelişim* 22(1), 16-24.
- Berthelot, G., Sedeaud, A., Marck, A., Antero-Jacquemin, J., Schipman, J., Saulière, G., . . . Toussaint, J.-F. (2015). Has athletic performance reached its peak? *Sports Med*. 45(9), 1263-1271. doi: 10.1007/s40279-015-0347-2.
- Borzemska, B., Cięszczyk, P., & Żekanowski, C. (2024). The genetic basis of non-contact soft tissue injuries-are there practical applications of genetic knowledge? *Cells* 13(22), 2-27. doi: 10.3390/cells13221828.
- Bozkurt, S. (2009). Sportif performansa psikolojik bakış. *BESBD* 5(1), 28-37.
- Cabrera, P., de Villarreal Sáez, E., & Cardozo, L. (2025). Genotypic distribution and allele frequency of the ACE I/D and ACTN3 R577X in colombian young athletes. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte* 14(3), 42-52. doi: 10.24310/riccafd.14.3.2025.21812.
- Chen, Z., & Schunkert, H. (2021). Genetics of coronary artery disease in the post-GWAS era. *JIM* 290(5), 980-992. doi: 10.1111/joim.13362.
- Collins, M., & September, A. V. (2023). Are commercial genetic injury tests premature? *Scand. J. Med. Sci. Sports*. 33, 1584–1597. doi: 10.1111/sms.14406.

- De Moor, M. H., Spector, T. D., Cherkas, L. E., Falchi, M., Hottenga, J. J., Boomsma, D. I., & De Geus, E. J. (2007). Genome-wide linkage scan for athlete status in 700 British female DZ twin pairs. *Twin Res Hum Genet.* 10(6), 812-820. doi: 10.1375/twin.10.6.812.
- Di Mauro, M., Izzicupo, P., Santarelli, E., Falone, S., Pennelli, A., Amicarelli, E., . . . Gallina, S. (2010). ACE and AGTR1 polymorphisms and left ventricular hypertrophy in endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 42(5), 915-921. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181c29e79.
- Dinçer, U. (2023). Sporda yetenek seçimi ve yönetimi ile ilgili Türkiye’de yapılmış araştırmaların derlemesi. *Uluslararası Dağcılık ve Tırmanış Dergisi* 6(1), 8-27. doi.org/10.36415/dagcilik.1302013.
- Durmic, T. S., Zdravkovic, M. D., Djelic, M. N., Gavrilovic, T. D., Saranovic, S. D., Plavsic, J. N., . . . Antic, M. N. (2017). Polymorphisms in ACE and ACTN3 genes and blood pressure response to acute exercise in elite male athletes from Serbia. *Tohoku J. Exp. Med.* 243, 311-320.
- Ferreira, C. P., Silvino, V. O., Trevisano, R. G., de Moura, R. C., Almeida, S. S., & dos Santos, M. P. (2024). Influence of genetic polymorphism on sports talent performance versus non-athletes: a systematic review and meta-analysis. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation* 16, 2-21. doi: 10.1186/s13102-024-01001-5.
- Godina, E., Khromov-Borisov, N., & Bondareva, E. (2025). Prediction of success in sports based on assumed individual genetic predisposition: lack of association with the C > T variant in the ACTN3 gene. *J Physiol Anthropol.* 44, 2-8. doi: 10.1186/s40101-025-00386-7.
- Goulart, C. C., Scheer, A. K., Silva, C. S., Atrib, A. B., Schneider, A., Schadock, L., . . . Barros, C. C. (2025). Prevalence of ACE I/D and ACTN3 R577X genetic polymorphisms in Taekwondo athletes. *Physiology International* 112(3), 380-391. doi.org/10.1556/2060.2025.00658.
- Guevara-Araya, A., Curripan-Henríquez, S., Aguilera-Julio, J., Antinao-Soto, A., & Araneda, O. F. (2025). Chilean national sports talent detection system: influence of biological age, sex, and geographic area. *J. Funct. Morphol. Kinesiol.* 10(1), 2-15. doi.org/10.3390/jfmk10010006.
- Güçlüöver, A., Şahin, İ. N., Güllü, M., & Esen, H. T. (2019). Sporda yetenek seçimi ve spora yönlendirmede 9-10 yaş çocukların bazı fiziksel özellikleri ve performans profillerinin incelenmesi: Kırıkkale örneği. *Gaziantep Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi* 4(2), 199-210. doi.org/10.31680/gaunjs.513784.
- Horton, R., Crawford, G., Freeman, L., Fenwick, A., Wright, C. F., & Lucassen, A. (2019). Direct-to-consumer genetic testing. *BMJ* 367, 1-6. doi: https://doi.org/10.1136/bmj.l5688.

- İlçe, A., Andsoy, I. I., & Turgut, A. (2025). Sağlıkla ilgili araştırmalarda derleme (inceleme) türleri . Sağlık Akademisi Kastamonu 10(1), 83-98. doi: <https://doi.org/10.25279/sak.1386841>.
- John , R., Dhillon, M. S., & Dhillon , S. (2020). Genetics and the elite athlete: our understanding in 2020. *Indian J Orthop.* 54(3), 256–263. doi: 10.1007/s43465-020-00056-z.
- Kılınç, F., & Özen, G. (2024). Basketbolcularda çoklu performans analizi. *ÇOMÜ Spor Bilimleri Dergisi* 7(3), 123-152.
- Kılınç, F., Koç, H., Erol, A. E., Pulur, A., & Gelen, E. (2011). Kısa kamp döneminde uygulanan yoğun antrenmanların yıldız erkek basketbolcuların biyomotorik ve teknik performansları üzerine etkileri. *Uluslararası İnsan Bilimleri Dergisi* 8(1), 1072-1080.
- Kürklü, G. B., Güler, C., & Mengütay, S. (2025). A review of muscle injury prevention methods in athletes. *Spor & Hareket Bilimleri Dergisi* 6(2), 157-162.
- Lagendijk, A. K., Smith, K. A., & Bakkers, J. (2010). Genetics of congenital heart defects: a candidate gene approach. *TCM* 20(4), 124-128.
- Lima, G., Almeida, S. S., Silva, E. D., Rosa, J. P., de Souza, A. L., Sierra, A. R., . . . Costa, C. A. (2023). Association between basketball playing position and ACTN3 R577X polymorphism in athletes of first division Brazilian basketball league . *Gene* 863, 2-8. doi.org/10.1016/j.gene.2023.147302.
- Liu, B., Zhang, L., & Yang, Q. (2012). Genetics of intracerebral hemorrhage: insights from candidate gene approaches. *Neurology India* 60(1), 3-8. doi: 10.4103/0028-3886.93581.
- Ma, F., Yang, Y., Li, X., Zhou, F., Gao, C., Li, M., & Gao, L. (2013). The association of sport performance with ACE and ACTN3 genetic polymorphisms: a systematic review and meta-analysis. *PLoS One* 8(1), 1-9. doi: 10.1371/journal.pone.0054685.
- Marinho, B., do Amaral, F V., de Oliveira Luz , L. G., Guimarães, G. L., Batista , L. A., & Chagas, D. d. (2024). Generic motor tests as tools to identify sports talent: a systematic review. *Hum Mov.* 25(2), 53-63. doi: <https://doi.org/10.5114/hm/188260>.
- McAllister, K., Eyre, S., & Orozco, G. (2011). Genetics of rheumatoid arthritis: GWAS and beyond. *Open Access Rheumatology: Research and Reviews* 3, 31-46. doi: 10.2147/OARRR.S14725.
- Montgomery, H. E., Marshall, R., Hemingway, H., Myerson, S., Clarkson, P., Dollery, C., . . . Holliman, D. E. (1998). Human gene for physical performance. *Nature* 393, 221-222.
- Naureen, Z., Perrone, M., Paolacci, S., Maltese, P. E., Dhuli , K., Kurti, D., . . . Miotto, R. (2020). Genetic test for the personalization of sport training. *Acta Biomed.* 91(13-S), 2-15. doi: 10.23750/abm.v91i13-S.10593.

- NIH. (2016). <https://www.genome.gov/genetics-glossary/Genome-Wide-Association-Studies-GWAS#:~:text=A%20genome%2Dwide%20association%20study,disease%20or%20a%20particular%20trait>.
- Oh, B. (2019). Direct-to-consumer genetic testing: advantages and pitfalls. *Genomics Inform.* 17(3), 1-3. doi: 10.5808/GI.2019.17.3.e33.
- Pickering, C., Kiely, J., Grgic, J., Lucia, A., & Del Coso, J. (2019). Can genetic testing identify talent for sport? *Genes (Basel)* 10(12), 2-13. doi: 10.3390/genes10120972.
- Riley, B. (2004). Linkage studies of Schizophrenia. *Neurotoxicity Research* 6(1), 17-34.
- Sevim, Y. (1991). Sporda yetenek seçimi ve temel ilkeleri. *Journal of Physical Education and Sports Studies* 2(7), 45-48.
- Sevimli, D. (2015). Sporda yetenek geliştirme sürecinin yönetimi. *CBÜ Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi* 10(1), 1-9.
- Taranto, E., Fishman, M., Benjamin, H., & Ross, L. (2018). Genetic testing by sports medicine physicians in the United States: attitudes, experiences, and knowledge. *Sports (Basel)* 6(4), 2-12. doi: 10.3390/sports6040145.
- Terlemez, M. (2022). Modern sporun sosyolojik ve tarihsel temelleri . *Kafkas Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi* 2(1), 16-25.
- Tolu, M., & Atılgan, D. (2024). Sportif performansla ilişkili en çok araştırılan genler: literatür incelemesi. *Genç Mütefekkirler Dergisi* 5(1), 152-173.
- Tümen, E. (2024). Yetkinlik mi? Yetenek mi? *Uluslararası Akademik Yönetim Bilimleri Dergisi* 10(16), 1-19.
- Varley, I., Patel, S., Williams, A. G., & Hennis, P. J. (2017). The current use, and opinions of elite athletes and support staff in relation to genetic testing in elite sport within the UK. *Biol Sport.* 35(1), 13-19. doi: 10.5114/biol sport.2018.70747.
- Wagner, J. K., & Royal, C. D. (2012). Field of genes: an investigation of sports-related genetic . *J. Pers. Med.* 2, 119-137. doi:10.3390/jpm2030119.
- Webborn, N., Williams, A., McNamee, M., Bouchard, C., Pitsiladis, Y., Ahmetov, I., . . . Byrne, N. (2015). Direct-to-consumer genetic testing for predicting sports performance and talent identification: consensus statement. *Br J Sports Med.* 49, 1486-1491. doi:10.1136/bjsports-2015-095343.
- Yalçın, M. (1990). Süratin fizyolojik özellikleri. *Journal of Physical Education and Sports Studies* 1(3), 28-31.
- Yamanaka, K., Kim, J., Tsukioka, K., Ezure, S., Ichihara, H., Pham, L. T., & Waki, H. (2026). Amygdala-hypothalamus-brainstem circuits underlying cardiovascular responses associated with the limits of high-intensity endurance exercise. *Front Physiol.* 16, 1-7. doi: 10.3389/fphys.2025.1714093.

- Yang, S., Lin, W., Jia , M., & Chen, H. (2023). Association between ACE and ACTN3 genes polymorphisms and athletic performance in elite and sub-elite Chinese youth male football players. *PeerJ* 11, 2-21. doi: 10.7717/peerj.14893.
- Yaşar, N., & Umay, B. (2025). Yüksek performans sporcularında aşırı antrenman sendromu ve dinlenme ihtiyacı. *ÇOMÜ Spor Bilimleri Dergisi* 8(3), 112-125.
- Yetim, A. A. (2000). Sporun sosyal görünümü. *Gazi Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi (Gazi BESBD)* 5(1), 63-72.
- Zourmand, G., Taheri, M., Ezdini, E. S., & Irandoust, K. (2025). The role of genetic and hormonal factors in shaping exercise responses and performance in children: a comprehensive review. *Cell Mol Biol (Noisy-le-grand)* 71(5), 66-77. doi: 10.14715/cmb/2025.71.5.10.

Ekstraselüler Matriks ve Genetik Düzenleyicilerin Spor Yaralanmalarına Etkisi

Cihad Onur Kurhan¹

Recep Aydemir²

Özet

Spor yaralanmaları, yalnızca mekanik yüklenme ve travmatik olaylarla açıklanamayacak kadar karmaşık bir biyolojik altyapıya sahiptir. Bu bağlamda ekstraselüler matriks (ECM), pasif bir yapısal bileşen olmanın ötesinde, doku dayanıklılığını, hücrel yanıtı ve iyileşme kapasitesini belirleyen aktif bir düzenleyici sistem olarak değerlendirilmektedir. Özellikle tendon ve ligament dokularında kollajen organizasyonu, proteoglikan dengesi ve matriks remodeling süreçleri, yaralanma riskinin ortaya çıkışında ve doku bütünlüğünün korunmasında kritik rol oynamaktadır.

Bu bölümde, ECM organizasyonunun genetik ve epigenetik düzenleyicilerle etkileşimi spor yaralanmaları bağlamında ele alınmıştır. COL1A1, COL5A1 ve MMP ailesi gibi genetik belirleyicilerin, bağ dokusunun mekanik özelliklerini ve yeniden yapılanma kapasitesini etkileyerek bireyler arası yaralanma yatkınlığını modüle edebildiği görülmektedir. Bununla birlikte mevcut kanıtlar, bu ilişkinin tek gen etkisiyle açıklanamayacağını; sürecin poligenik, multifaktöriyel ve çevresel uyaranlara açık bir yapıda değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Mekanotransdüksiyon mekanizmaları ile mikroRNA ve diğer epigenetik düzenleyiciler ise, mekanik yüklenme ile biyolojik yanıt arasındaki ilişkiyi açıklayan temel moleküler eksenler olarak öne çıkmaktadır.

Ekstraselüler matriks biyolojisi ile genetik düzenleyicilerin birlikte değerlendirilmesi, spor yaralanmalarının oluşumu, ilerleyişi ve iyileşme süreçlerinin daha doğru anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, bireyselleştirilmiş koruyucu stratejiler ve hedefe yönelik rehabilitasyon modelleri için güçlü bir bilimsel temel sunmaktadır.

1 İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beden Eğitimi ve Spor ABD, E-mail: cihadonurkurhan@gmail.com, Orcid: 0000 0002-1892-6245

2 Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beden Eğitimi ve Spor ABD, E-mail: reecep@hotmail.com Orcid: 0000-0003-0189-7051

Giriş

Spor yaralanmaları uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak mekanik yüklenme, travmatik olaylar ve antrenman hataları çerçevesinde ele alınmış olsa da, bu olgunun çok daha karmaşık ve çok katmanlı bir yapıya sahip olduğu ortaya konmuştur (Bahr & Krosshaug, 2005). Benzer antrenman yüklerine ve karşılaştırılabilir çevresel koşullara maruz kalan bireylerde dahi farklı yaralanma paternlerinin gözlenmesi, kas-iskelet sistemi dokularının yalnızca mekanik değil, aynı zamanda biyolojik ve moleküler özelliklerinin de belirleyici olduğunu düşündürmektedir (Collins & Posthumus, 2011). Bu bağlamda ekstraselüler matriks (ECM), klasik anlamda pasif bir yapısal destek unsuru olarak değerlendirilmenin ötesine geçerek, hücrel davranışları yönlendiren ve doku adaptasyonunu şekillendiren aktif bir biyolojik sistem olarak ele alınmaktadır (Frantz et al., 2010). Dolayısıyla spor yaralanmalarını yalnızca dışsal yüklenmelerin bir sonucu olarak değerlendirmek yerine, bu yüklenmelere yanıt veren dokunun içsel organizasyonunu ve biyolojik kapasitesini de dikkate alan bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesi gerekmektedir (Kjaer, 2004).

Ekstraselüler matriks, kollajenler, elastik lifler, proteoglikanlar ve adezyon glikoproteinlerinden oluşan karmaşık bir yapı sergilemekte olup, bu yapı dokuların mekanik bütünlüğünü sağlamanın ötesinde hücrel proliferasyon, diferansiyasyon ve migrasyon gibi temel süreçleri de düzenlemektedir (Theocharis et al., 2016). Özellikle tendon ve ligament gibi yüksek çekme kuvvetlerine maruz kalan dokularda tip I kollajenin organizasyonu, kuvvet iletim verimliliğini belirleyen temel faktörlerden biri olarak öne çıkmakta ve bu organizasyondaki bozulmalar mikrohasar birikimi ile ilişkilendirilmektedir (Ricard-Blum, 2011). Bununla birlikte ECM'nin dinamik doğası, sürekli sentez ve yıkım süreçleri arasındaki denge ile korunmakta ve bu denge doku homeostazı ile iyileşme süreçlerinin temelini oluşturmaktadır (Lu et al., 2011). Bu nedenle ekstraselüler matriks, yalnızca yapısal bir bileşen değil, çevresel uyarılara yanıt veren ve hücrel süreçleri yönlendiren aktif bir mikroçevre olarak değerlendirilmelidir (Hynes, 2009).

Ekstraselüler matriks organizasyonunun bir diğer belirleyici boyutu genetik ve epigenetik düzenleyicilerdir; zira matriks bileşenlerinin sentezi ve yeniden yapılanması çok sayıda gen tarafından kontrol edilmektedir (Pickering & Kiely, 2017). Özellikle kollajen sentezinde rol oynayan COL1A1 ve COL5A1 gibi genlerdeki varyasyonların tendon ve ligament dokularının mekanik özelliklerini etkileyerek yaralanma yatkınlığını modüle edebildiği gösterilmiştir (Khoschnau et al., 2008). Bunun yanı sıra ECM remodeling süreçlerinde görev alan matriks metalloproteinazları kodlayan genlerdeki polimorfizmler de doku yıkım ve yeniden yapılanma dengesini etkileyebilmektedir (Raleigh

et al., 2009). Bununla birlikte mevcut kanıtlar, spor yaralanmalarının tek bir gen ile açıklanamayacağını ve bu sürecin poligenik ve multifaktöriyel bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır (September et al., 2007). Bu nedenle genetik faktörler, mutlak belirleyicilerden ziyade, bireylerin mekanik yüklenmelere verdiği biyolojik yanıtın sınırlarını belirleyen bir duyarlılık zemini olarak değerlendirilmelidir (Collins & Posthumus, 2011).

Kas-iskelet sistemi dokularının mekanik yüklenmeye verdiği yanıt, ekstraselüler matriks ile hücreler arasındaki etkileşim üzerinden şekillenmekte ve bu süreç mekanotransdüksiyon olarak tanımlanmaktadır (Wang, 2006). Hücrelerin integrinler aracılığıyla ECM'ye bağlanması, mekanik kuvvetlerin hücre içine aktarılmasını sağlayarak gen ekspresyonunun düzenlenmesine olanak tanımaktadır (Humphries et al., 2019). Uygun düzeyde mekanik yüklenmenin kollajen sentezini artırarak matriks organizasyonunu güçlendirdiği, buna karşın aşırı yüklenmenin matriks metalloproteinaz aktivitesini artırarak ECM yıkımını hızlandırdığı bilinmektedir (Page-McCaw et al., 2007). Bu durum, spor yaralanmalarının çoğu zaman ani bir olaydan ziyade, uzun süreli mikroyapısal bozulmaların birikimi sonucunda ortaya çıktığını düşündürmektedir (Riley, 2004). Nitekim tendinopati ve ön çapraz bağ yaralanmaları gibi klinik tablolar, mekanik yüklenme ile biyolojik yanıt arasındaki dengenin bozulmasının tipik örnekleri arasında yer almaktadır (Sharma & Maffulli, 2005).

Yaralanma sonrası iyileşme süreci de ekstraselüler matriksin yeniden yapılanması ile yakından ilişkili olup, inflamasyon, proliferasyon ve remodeling fazlarını içeren dinamik bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Voleti et al., 2012). Bu süreçte oluşan kollajen organizasyonu ve matriks bileşenlerinin kompozisyonu, dokunun nihai mekanik özelliklerini belirlemekte ve iyileşmenin kalitesini doğrudan etkilemektedir (Wynn & Ramalingam, 2012). Bununla birlikte bazı durumlarda fibrotik yanıtın baskın hale gelmesi, fonksiyonel açıdan yetersiz dokuların oluşmasına neden olabilmektedir (Leask & Abraham, 2004). Ayrıca epigenetik düzenleyiciler ve mikroRNA'ların ECM sentezi ve yıkımı üzerinde etkili olduğu ve bu süreçlerin çevresel faktörlerle etkileşim içinde doku yanıtını şekillendirdiği gösterilmiştir (Bird, 2007). Bu durum, genetik yatkınlık ile çevresel maruziyet arasındaki ilişkinin dinamik ve değişken bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır (Jaenisch & Bird, 2003).

Bu bölümün amacı, ekstraselüler matriks ile genetik düzenleyiciler arasındaki etkileşimi spor yaralanmaları bağlamında bütüncül bir perspektifle ele almak ve bu etkileşimin doku biyolojisi, mekanik adaptasyon ve klinik sonuçlar üzerindeki rolünü ortaya koymaktır. Bu doğrultuda öncelikle ekstraselüler matriksin biyolojik özellikleri incelenecek, ardından tendon ve ligament dokularında matriks organizasyonunun mekanik işlevle ilişkisi ele alınacaktır.

Daha sonra genetik varyasyonlar ve mekanotransdüksiyon süreçleri üzerinden konu derinleştirilecek ve son olarak klinik yansımalar ile bireyselleştirilmiş yaklaşımlar tartışılacaktır. Bu yaklaşımın, spor yaralanmalarına yönelik geleneksel mekanik paradigmanın ötesine geçerek moleküler biyoloji ile klinik uygulamaları entegre eden daha hedefe yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Ekstraselüler Matrisin Biyolojisi

Ekstraselüler matris (ECM), yalnızca hücreleri çevreleyen pasif bir yapı değil, aynı zamanda hücre davranışlarının düzenlenmesinde aktif rol oynayan dinamik ve çok bileşenli bir mikroçevre olarak tanımlanmaktadır (Frantz et al., 2010). Bu kompleks yapı; kollajenler, elastin lifleri, proteoglikanlar ve adezyon glikoproteinleri gibi çeşitli makromoleküllerden oluşmakta olup, dokuların mekanik bütünlüğünü sağlarken aynı zamanda hücrel sinyalizasyon süreçlerine doğrudan katılım göstermektedir (Theocharis et al., 2016). ECM'nin biyolojik işlevi yalnızca yapısal destekle sınırlı kalmamakta, hücre proliferasyonu, diferansiyasyonu ve migrasyonu gibi temel süreçlerin düzenlenmesinde belirleyici bir rol üstlenmektedir (Hynes, 2009). Bu bağlamda, ECM ile hücreler arasındaki etkileşimler çoğunlukla integrin reseptörleri aracılığıyla gerçekleşmekte ve bu etkileşimler hücre içi sinyal yollarını aktive ederek gen ekspresyonunu şekillendirmektedir (Humphries et al., 2019). Kollajenler, ECM'nin en baskın protein ailesini oluşturmaktadır olup özellikle tip I kollajen, tendon ve ligament gibi bağ dokularında yüksek oranda bulunarak dokuların çekme dayanıklılığını belirlemektedir (Ricard-Blum, 2011). Buna karşın proteoglikanlar ve glikozaminoglikanlar, su tutma kapasiteleri sayesinde ECM'ye viskoelastik özellik kazandırmakta ve mekanik yüklerin absorbe edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Iozzo & Schaefer, 2015). Ayrıca fibronectin ve laminin gibi adezyon glikoproteinleri, hücrelerin ECM'ye bağlanmasını sağlayarak hücrel organizasyonu ve doku mimarisini stabilize etmektedir (Pankov & Yamada, 2002). ECM'nin dinamik doğası, sürekli olarak sentez ve yıkım süreçlerinin dengesi ile korunmakta olup bu denge özellikle matris metalloproteinazlar (MMP'ler) ve onların inhibitörleri (TIMP'ler) tarafından düzenlenmektedir (Page-McCaw et al., 2007). Bu remodeling süreci, normal doku homeostazının korunmasında hayati öneme sahipken, aynı zamanda yaralanma sonrası iyileşme süreçlerinin de temelini oluşturmaktadır (Lu et al., 2011). ECM'nin biyomekanik özellikleri ile biyokimyasal sinyalleri arasındaki etkileşim, hücrelerin çevresel uyarılara verdiği yanıtı belirleyen mekanotransdüksiyon süreçlerinin merkezinde yer almakta ve bu durum özellikle kas-iskelet sistemi dokularında fonksiyonel adaptasyon açısından kritik bir önem taşımaktadır (Discher et al., 2005).

2.1 Ekstraselüler matriks bileşenlerinin spor yaralanmalarıyla ilişkili biyomekanik ve biyolojik etkileri

Ekstraselüler matriks bileşenlerinin yalnızca yapısal organizasyonu değil, aynı zamanda bu yapıların biyomekanik stres altında gösterdiği davranış biçimi, spor yaralanmalarının oluşumunda belirleyici bir rol oynamaktadır (Thorpe et al., 2015). Özellikle tendon ve ligament dokularında kollajen liflerin hizalanma derecesi ve çapraz bağlanma yoğunluğu, dokunun tekrarlayan yüklenmelere karşı verdiği yanıtı doğrudan etkileyerek mikroyaralanmaların birikimini belirlemektedir (Kannus, 2000). Bu bağlamda, tip I kollajenin yüksek organizasyon düzeyi sağlıklı dokularda optimal kuvvet iletimine olanak tanırken, kollajen yapısındaki düzensizlikler yük dağılımında heterojenliğe yol açarak lokal stres artışına neden olmaktadır (Screen et al., 2015). Kollajen tip III'ün ise özellikle yaralanma sonrası erken dönemde artış göstermesi, hızlı ancak mekanik açıdan daha zayıf bir matriks oluşumuna neden olmakta ve bu durum dokunun yeniden yaralanmaya açık hale gelmesine katkıda bulunmaktadır (Frank, 2004). Proteoglikanlar, özellikle tendon dokusunda düşük oranda bulunmalarına rağmen, su içeriğini düzenleyerek kollajen lifler arasındaki kaymayı kolaylaştırmakta ve böylece dokunun viskoelastik davranışını modüle etmektedir (Robinson et al., 2004). Ancak proteoglikan içeriğindeki artış, özellikle tendinopatik dokularda gözlemlenen mukoid dejenerasyon ile ilişkilendirilmekte ve bu durum matriks organizasyonunun bozulduğunu göstermektedir (Riley, 2004). Benzer şekilde, decorin ve biglycan gibi küçük proteoglikanların kollajen fibril oluşumunu düzenleyici etkilerindeki değişiklikler, fibril çapında heterojenliğe yol açarak mekanik dayanıklılığın azalmasına neden olabilmektedir (Zhang et al., 2006). ECM'nin adezyon glikoproteinlerinden biri olan fibronectin, özellikle yaralanma sonrası dönemde artış göstererek hücre migrasyonunu ve doku yeniden yapılanmasını desteklemektedir, ancak bu artışın kronikleşmesi fibrotik süreçlerin gelişmesine katkıda bulunabilmektedir (To & Midwood, 2011). Laminin ise kas dokusunda hücre-ECM etkileşimlerini düzenleyerek kas liflerinin stabilitesini sağlamakta ve bu yapıdaki bozulmalar kas yaralanmalarına yatkınlığı artırabilmektedir (Yurchenco, 2011). Elastin liflerinin bütünlüğü de özellikle dinamik ve tekrarlayan yüklenmelere maruz kalan dokularda kritik öneme sahip olup elastik geri dönüş kapasitesinin azalması, dokunun enerji depolama ve geri kazanım özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Thorpe et al., 2015). ECM bileşenlerinin bu yapısal ve fonksiyonel özellikleri, yalnızca yaralanmanın oluşumunu değil, aynı zamanda iyileşme sürecinin kalitesini de belirlemektedir (Wang, 2006). Yaralanma sonrası ECM'de meydana gelen yeniden yapılanma sürecinde, kollajen organizasyonu, proteoglikan içeriği ve glikoprotein ekspresyonu gibi parametrelerdeki değişiklikler, dokunun eski biyomekanik

özelliklerine ne ölçüde dönebileceğini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Dolayısıyla ekstraselüler matris bileşenlerinin dengesi, yalnızca doku bütünlüğünün korunmasında değil, aynı zamanda sporcularda yaralanma riskinin belirlenmesi ve iyileşme sürecinin optimize edilmesi açısından da merkezi bir öneme sahiptir (Kannus, 2000).

2.2 Ekstraselüler matrisin dinamik yapısı ve yeniden yapılanma süreçleri

Ekstraselüler matris, statik bir yapı olmaktan ziyade sürekli olarak sentez ve yıkım süreçleri arasında dengede tutulan dinamik bir sistemdir ve bu özellik, dokuların çevresel streslere adapte olabilesini mümkün kılmaktadır (Lu et al., 2011). Bu dinamik denge, başta matris metalloproteinazlar (MMP'ler) ve onların inhibitörleri olan doku inhibitörleri (TIMP'ler) tarafından düzenlenmekte olup, ECM'nin bütünlüğü bu iki sistem arasındaki hassas dengeye bağlıdır (Page-McCaw et al., 2007). MMP'ler, kollajenler ve diğer matris bileşenlerini parçalayan çinko-bağımlı enzimler olarak görev yapmakta ve özellikle hasar görmüş dokuların temizlenmesi ile yeniden yapılanma süreçlerinde kritik rol oynamaktadır (Visse & Nagase, 2003). Buna karşılık TIMP'ler, MMP aktivitesini sınırlayarak aşırı matris yıkımını engellemekte ve böylece doku homeostazının korunmasına katkıda bulunmaktadır (Brew & Nagase, 2010). Normal fizyolojik koşullarda ECM turnover süreci dengeli bir şekilde ilerlerken, bu dengenin bozulması durumunda patolojik değişiklikler ortaya çıkmakta ve bu durum özellikle sporcularda kronik yaralanmaların gelişiminde önemli bir faktör haline gelmektedir (Riley, 2004). Örneğin, aşırı mekanik yüklenme sonucunda MMP aktivitesinde artış meydana gelmekte ve bu durum kollajen yapısının parçalanmasına yol açarak tendon dokusunun zayıflamasına neden olmaktadır (Wang, 2006). Bu süreç, özellikle tekrarlayan mikrotravmaların biriktiği durumlarda daha belirgin hale gelmekte ve ECM'nin yapısal organizasyonunun bozulması ile sonuçlanmaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Yaralanma sonrası ECM yeniden yapılanması üç temel fazda incelenmektedir; inflamasyon, proliferasyon ve remodeling fazları, bu süreçlerin her biri matris bileşenlerinin farklı düzeylerde yeniden düzenlenmesini içermektedir (Voleti et al., 2012). İnflamasyon fazında hasarlı dokudan salınan sitokinler ve büyüme faktörleri, fibroblast ve diğer hücrelerin bölgeye göçünü uyarak ECM sentezinin başlangıcını tetiklemektedir (Marsolais et al., 2001). Proliferasyon fazında fibroblast aktivitesi artmakta ve özellikle tip III kollajen sentezi ön plana çıkarak hızlı ancak mekanik olarak zayıf bir matris oluşmaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Remodeling fazında ise bu geçici matris yapısı daha organize bir hale gelmekte ve tip I kollajen sentezi artarak dokunun mekanik dayanıklılığı yeniden kazanılmaktadır (Voleti et

al., 2012). Ancak bu yeniden yapılanma sürecinin her zaman optimal şekilde gerçekleşmediği ve bazı durumlarda düzensiz kollajen organizasyonu ile karakterize fibrotik dokuların oluştuğu bilinmektedir (Wynn & Ramalingam, 2012). Fibrozis gelişimi, ECM'nin aşırı birikimi ile sonuçlanmakta ve bu durum dokunun elastikiyetini azaltarak fonksiyonel kapasitenin düşmesine yol açmaktadır (Wynn & Ramalingam, 2012). Bununla birlikte, büyüme faktörleri özellikle TGF- β , ECM sentezini artırarak iyileşme sürecini desteklerken, aşırı aktivasyonu fibrotik yanıtın gelişmesine katkıda bulunabilmektedir (Leask & Abraham, 2004). Mekanik yüklenme, ECM yeniden yapılanmasını yönlendiren en önemli dışsal faktörlerden biri olarak kabul edilmekte olup uygun düzeyde uygulandığında matriks organizasyonunu güçlendirirken, aşırı ya da yetersiz yüklenme bu sürecin bozulmasına neden olabilmektedir (Wang, 2006). Dolayısıyla ECM remodeling süreci, genetik faktörler, biyokimyasal sinyaller ve mekanik uyarıların birlikte etkilediği karmaşık bir denge sistemi olarak değerlendirilmelidir ve bu denge spor yaralanmalarının oluşumu ve iyileşme sürecinin kalitesi açısından kritik öneme sahiptir (Lu et al., 2011).

3. Tendon ve ligament dokularında ekstraselüler matriks organizasyonu ve mekanik işlevin yapısal temelleri

Tendon ve ligament dokuları, yoğun düzenli bağ dokusunun özelleşmiş formları olarak kabul edilmekte olup, bu dokuların biyomekanik özellikleri büyük ölçüde ekstraselüler matriksin hiyerarşik organizasyonuna dayanmaktadır (Kannus, 2000). Her iki doku benzer moleküler bileşenlere sahip olmasına rağmen, üstlendikleri fonksiyonel roller nedeniyle matriks organizasyonları belirgin farklılıklar göstermektedir (Frank, 2004). Tendonlar esas olarak kas tarafından üretilen kuvveti kemiğe iletmek üzere özelleşmiş yapılarırken, ligamentler eklem stabilitesini sağlamak ve hareketi kontrol etmek üzere daha kompleks yüklenme paternlerine uyum sağlayacak şekilde organize olmaktadır (Frank, 2004). Bu fonksiyonel farklılık, kollajen liflerin yönlenmesi, matriks yoğunluğu ve elastik bileşenlerin dağılımı gibi birçok yapısal özelliği doğrudan etkilemektedir (Screen et al., 2015). Tendon dokusunda ekstraselüler matriksin büyük çoğunluğunu tip I kollajen oluşturmakta ve bu kollajen fibrilleri mikrofibrillerden başlayarak fibril, lif ve fasikül düzeyine kadar uzanan çok katmanlı bir organizasyon göstermektedir (Kannus, 2000). Bu hiyerarşik yapı yalnızca yüksek çekme dayanımı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda farklı yönlerden gelen mekanik yüklerin dokuda dengeli bir şekilde dağıtılmasına olanak tanımaktadır (Screen et al., 2015). Kollajen fibrillerin tam anlamıyla paralel olmaması ve belirli düzeyde dalgalı (crimp) bir yapı sergilemesi, tendonun yüklenme sırasında elastik davranış göstermesine katkıda bulunmaktadır (Kannus, 2000). Bu crimp yapısı, düşük düzeydeki yüklenmelerde enerjinin

absorbe edilmesini sağlarken, daha yüksek yüklenmelerde kollajen liflerin gerilerek maksimum kuvvet iletimine olanak tanınmasına yardımcı olmaktadır (Wang, 2006). Ligament dokusunda ise kollajen organizasyonu daha heterojen olup, lifler farklı yönlere hizalanarak çok eksenli streslere karşı direnç oluşturacak şekilde düzenlenmiştir (Frank, 2004). Bu durum, ligamentlerin yalnızca çekme kuvvetlerine değil, aynı zamanda rotasyonel ve kesme kuvvetlerine karşı da dayanıklı olmasını sağlamaktadır (Frank, 2004). Ligamentlerde elastin liflerinin tendonlara kıyasla daha belirgin olması, bu dokuların deformasyon sonrası eski uzunluklarına dönebilme kapasitesini artırmaktadır (Thorpe et al., 2015). Tendon ve ligament dokularının matris bileşimi yalnızca kollajen liflerden ibaret olmayıp, proteoglikanlar ve glikoproteinler gibi non-kollajenöz bileşenler de bu yapının önemli bir parçasını oluşturmaktadır (Screen et al., 2015). Decorin ve biglycan gibi küçük proteoglikanlar, kollajen fibril oluşumunu düzenleyerek fibril çapı ve organizasyonunun kontrol edilmesinde kritik rol oynamaktadır (Zhang et al., 2006). Bu proteoglikanların yapısal düzenleyici etkilerindeki değişiklikler, kollajen organizasyonunu bozarak dokunun mekanik dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Zhang et al., 2006). Ayrıca interfasciküler matris olarak adlandırılan ve fasiküller arasındaki kaymayı sağlayan yapı, tendonun viskoelastik davranışında belirleyici bir rol oynamaktadır (Thorpe et al., 2015). Bu bölgedeki proteoglikan ve elastin içeriği, özellikle enerji depolayan tendonlarda mekanik performansın korunması açısından kritik öneme sahiptir (Thorpe et al., 2015). Enerji depolayan tendonlar, yüklenme sırasında elastik enerji depolayıp boşalma sırasında bu enerjiyi geri vererek hareket ekonomisini artırmaktadır (Wang, 2006). Bu süreçte matris organizasyonundaki küçük bozulmalar dahi enerji transferinde verimsizliğe yol açarak mikroyaralanmaların birikmesine neden olabilmektedir (Sharma & Maffulli, 2005). Ligament dokusunda ise matris organizasyonundaki düzensizlikler, eklem stabilitesinin azalmasına ve özellikle ani yön değişiklikleri sırasında yaralanma riskinin artmasına neden olmaktadır (Frank, 2004). Ön çapraz bağ gibi yapılarda kollajen liflerin organizasyonu ve matris bütünlüğü, ligamentin mekanik dayanıklılığını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Haslauer et al., 2014). Yaralanma sonrası dönemde tendon ve ligament dokularında ekstraselüler matrisin organizasyonu önemli ölçüde değişmekte ve bu değişiklikler genellikle daha düzensiz ve mekanik olarak daha zayıf bir yapı ile sonuçlanmaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Özellikle ligament iyileşmesinde oluşan skar dokusunun, orijinal dokunun biyomekanik özelliklerini tam olarak karşılayamaması, yeniden yaralanma riskinin artmasına neden olmaktadır (Frank, 2004). Benzer şekilde tendon iyileşmesi sırasında kollajen liflerin hizalanmasındaki bozukluklar ve tip III kollajen oranındaki artış, dokunun uzun vadeli dayanıklılığını azaltmaktadır

(Sharma & Maffulli, 2005). Bu nedenle tendon ve ligament dokularında ekstraselüler matriks organizasyonu, yalnızca doku yapısının bir özelliği değil, aynı zamanda yaralanma riski, iyileşme kalitesi ve fonksiyonel performansın belirleyicisi olarak değerlendirilmelidir (Screen et al., 2015). Bu bağlamda, matriks organizasyonunu şekillendiren biyolojik süreçlerin anlaşılması, spor yaralanmalarının önlenmesi ve tedavi stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Wang, 2006).

4. Genetik düzenleyiciler ve polimorfizmler bağlamında ekstraselüler matriks organizasyonunun bireysel farklılıkları

Ekstraselüler matriksin yapısı ve organizasyonu, yalnızca çevresel yüklenmelerin bir sonucu olarak şekillenmemekte, aynı zamanda genetik düzeyde belirlenen biyolojik süreçlerin doğrudan bir yansıması olarak ortaya çıkmaktadır (September et al., 2007). Bu durum, benzer antrenman yüklerine maruz kalan bireyler arasında neden farklı yaralanma profilleri gözlemlendiğini açıklamada genetik faktörlerin önemini ön plana çıkarmaktadır (September et al., 2007). Özellikle bağ dokusu bütünlüğünü belirleyen kollajen proteinlerini kodlayan genlerdeki varyasyonlar, tendon ve ligament dokularının mekanik özelliklerini etkileyerek yaralanma yatkınlığını modüle edebilmektedir (Collins & Posthumus, 2011). Bu bağlamda en çok çalışılan genlerden biri olan COL1A1, tip I kollajen sentezinde rol oynayan temel genlerden biri olarak kabul edilmekte ve bu gen üzerindeki polimorfizmlerin bağ dokusu dayanıklılığı ile ilişkili olduğu gösterilmektedir (Khoschnau et al., 2008). COL1A1 genindeki belirli varyasyonların, kollajen fibril organizasyonunu etkileyerek tendon ve ligamentlerin mekanik stabilitesini değiştirebildiği ve bunun da yaralanma riskine yansıdığı bildirilmektedir (Khoschnau et al., 2008). Buna benzer şekilde COL5A1 geni, kollajen fibrillogenesis sürecinde düzenleyici rol oynayan tip V kollajeni kodlamakta ve bu genin özellikle tendon yaralanmaları ile güçlü bir ilişki gösterdiği ortaya konmuştur (September et al., 2009). COL5A1 genindeki rs12722 gibi polimorfizmler, kollajen fibril çapı ve düzenlenmesini etkileyerek tendon dokusunun esneklik ve dayanıklılık özelliklerini değiştirebilmektedir (Posthumus et al., 2009). Bu değişiklikler, özellikle tekrarlayan yüklenmelere maruz kalan sporcularda mikroyaralanmaların birikmesine ve kronik tendinopati gelişimine zemin hazırlayabilmektedir (Collins & Posthumus, 2011). Kollajen genlerinin yanı sıra, ekstraselüler matriksin yeniden yapılanmasında rol oynayan enzimleri kodlayan genler de yaralanma riskinin belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir (Raleigh et al., 2009). Bu noktada MMP3 geni, matriks metalloproteinaz-3 enzimini kodlayarak ECM bileşenlerinin yıkımında görev almakta ve bu gen üzerindeki varyasyonların doku remodeling süreçlerini etkilediği bilinmektedir (Raleigh

et al., 2009). MMP3 genindeki belirli polimorfizmlerin, ECM yıkım hızını değiştirerek tendon ve ligament dokularının yapısal bütünlüğünü etkileyebileceği ve bunun da yaralanma yatkınlığı ile ilişkili olduğu öne sürülmektedir (Raleigh et al., 2009). Bu durum, ECM'nin yalnızca yapısal değil aynı zamanda sinyal iletiminde aktif rol oynayan bir sistem olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır (Hynes, 2009). Bununla birlikte, son yıllarda yapılan çalışmalar, ekstraselüler matris biyolojisinin yalnızca kollajen ve matris yıkım enzimleriyle sınırlı olmadığını, vasküler yanıt ve iyileşme kapasitesiyle ilişkili biyolojik yolların da bu tabloya katkı sunabileceğini düşündürmektedir (Collins & Posthumus, 2011). Özellikle iyileşme biyolojisinde rol oynayan vasküler düzenleyici yolların, doku vaskülarizasyonu ve onarım kalitesi üzerinden yaralanma fenotipini etkileyebileceği düşünülmektedir; ancak bu alandaki kanıtların kollajen genleri kadar tutarlı olmadığı da vurgulanmalıdır (Collins & Posthumus, 2011). Bu nedenle, vasküler yanıtla ilişkili genetik farklılıkların yaralanma riski ve iyileşme dinamikleri üzerinde etkili olabileceği öne sürülse de, mevcut literatürde bu ilişkinin henüz tam anlamıyla netleşmediği kabul edilmektedir (Collins & Posthumus, 2011). Ancak mevcut literatür incelendiğinde, bu genetik ilişkilerin her popülasyonda aynı şekilde gözlenmediği ve sonuçların sıklıkla çelişkili olabildiği görülmektedir (Collins & Posthumus, 2011). Bu durum, spor yaralanmalarının genetik temelini poligenik ve multifaktöriyel bir yapıya sahip olduğunu göstermekte ve tek bir gen üzerinden risk değerlendirmesi yapılmasının yetersiz kalabileceğini düşündürmektedir (September et al., 2007). Ayrıca çevresel faktörler, antrenman yükü, biyomekanik özellikler ve epigenetik düzenleyiciler gibi unsurların da bu genetik altyapı ile etkileşim içerisinde olduğu unutulmamalıdır (Pickering & Kiely, 2017). Dolayısıyla ekstraselüler matris organizasyonunun genetik belirleyicileri, sabit bir kaderden ziyade çevresel uyaranlarla sürekli etkileşim halinde olan dinamik bir sistem olarak değerlendirilmelidir (Pickering & Kiely, 2017). Bu bakış açısı, spor yaralanmalarının yalnızca genetik yatkınlıkla açıklanamayacağını, ancak genetik faktörlerin bireysel risk profilinin önemli bir bileşeni olduğunu ortaya koymaktadır (Collins & Posthumus, 2011). Genetik polimorfizmler ekstraselüler matrisin yapısını ve fonksiyonunu etkileyerek sporcularda yaralanma riskini modüle eden önemli biyolojik faktörler arasında yer almakta, ancak bu etkilerin çok faktörlü bir sistem içerisinde değerlendirilmesi gerekmektedir (September et al., 2007; Collins & Posthumus, 2011).

5. Mekanotransdüksiyon süreçleri bağlamında genetik düzenleyiciler ile ekstraselüler matris etkileşimi

Kas-iskelet sistemi dokularında ekstraselüler matrisin yalnızca yapısal bir destek unsuru olmadığı, aynı zamanda mekanik uyaranların biyokimyasal sinyallere dönüştürülmesinde aktif rol oynayan bir düzenleyici sistem olduğu

giderek daha açık bir şekilde ortaya konmaktadır (Wang, 2006). Bu dönüşüm süreci, mekanotransdüksiyon olarak tanımlanmakta ve hücrelerin mekanik yüklenmelere verdiği yanıtın gen ekspresyonu düzeyinde şekillenmesini sağlamaktadır (Humphrey et al., 2014). Tendon ve ligament dokularında bulunan fibroblast benzeri hücreler, özellikle integrinler aracılığıyla ekstraselüler matriks ile bağlantı kurmakta ve bu bağlantı sayesinde mekanik sinyalleri hücre içine iletmektedir (Humphries et al., 2019). Integrin aracılı bu sinyal iletimi, hücre iskeleti ile ECM arasında fiziksel bir köprü oluşturarak mekanik yüklerin doğrudan hücresel yanıt mekanizmalarına aktarılmasını mümkün kılmaktadır (Hynes, 2002). Bu süreçte aktive olan sinyal yolları arasında özellikle MAPK, TGF- β ve FAK (focal adhesion kinase) gibi yollar yer almakta ve bu yollar hücresel proliferasyon, diferansiyasyon ve matriks sentezini düzenlemektedir (Humphrey et al., 2014). Mekanik yüklenmenin şiddeti, süresi ve yönü, bu sinyal yollarının aktivasyon düzeyini belirleyerek ekstraselüler matriks bileşenlerinin sentez ve organizasyonunu doğrudan etkilemektedir (Wang, 2006). Bu nedenle uygun düzeyde mekanik yüklenme, tendon ve ligament dokularında kollajen sentezini artırarak matriks organizasyonunun güçlenmesine katkıda bulunurken, aşırı yüklenme bu sürecin bozulmasına neden olabilmektedir (Kjaer, 2004). Aşırı mekanik stres altında, matriks metalloproteinazların ekspresyonunda artış meydana gelmekte ve bu durum ECM yıkımının sentezden daha baskın hale gelmesine yol açmaktadır (Riley, 2004). Bunun sonucunda kollajen fibril organizasyonu bozulmakta ve dokunun mekanik dayanıklılığı azalmakta, bu da spor yaralanmalarına yatkınlığı artırmaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Mekanik yüklenme ile genetik düzenleyiciler arasındaki etkileşim, özellikle kollajen genlerinin ekspresyonunda belirgin şekilde gözlenmektedir (Kjaer, 2004). Örneğin, uygun yüklenme koşullarında COL1A1 ve COL3A1 genlerinin ekspresyonunda artış gözlenirken, bu artış ECM sentezinin hızlanmasına ve doku adaptasyonunun gelişmesine katkı sağlamaktadır (Kjaer, 2004). Buna karşılık, düzensiz ya da aşırı yüklenme koşullarında gen ekspresyon profili değişmekte ve daha çok dejeneratif süreçlerle ilişkili bir moleküler yanıt ortaya çıkmaktadır (Riley, 2004). TGF- β sinyal yolu, mekanotransdüksiyon süreçlerinde merkezi bir rol oynamakta ve fibroblast aktivasyonu ile ECM sentezinin düzenlenmesinde kritik bir aracı olarak görev yapmaktadır (Leask & Abraham, 2004). Ancak TGF- β aktivitesinin aşırı artışı, ECM bileşenlerinin kontrolsüz bir şekilde birikmesine ve fibrotik dokuların oluşmasına neden olabilmektedir (Leask & Abraham, 2004). Bu durum, iyileşme sürecinde doku kalitesinin düşmesine ve fonksiyonel performansın azalmasına yol açmaktadır (Wynn & Ramalingam, 2012). Mekanik sinyallerin gen ekspresyonu üzerindeki etkisi yalnızca protein kodlayan genlerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda epigenetik düzenleyiciler ve

mikroRNA'lar aracılığıyla da gerçekleşmektedir (Pickering & Kiely, 2017). Bu bağlamda, mekanik yüklenmenin mikroRNA ekspresyonunu değiştirebildiği ve bu değişikliklerin ECM bileşenlerinin sentezini dolaylı olarak etkileyebildiği gösterilmektedir (Pickering & Kiely, 2017). Dolayısıyla mekanotransdüksiyon süreçleri, genetik yatkınlık ile çevresel yüklenme arasındaki etkileşimin somutlaştığı temel mekanizmalardan biri olarak değerlendirilmektedir (Humphrey et al., 2014). Bu etkileşim, sporcularda aynı antrenman programına rağmen farklı adaptasyon ve yaralanma yanıtlarının ortaya çıkmasını açıklayan önemli bir biyolojik temel sunmaktadır (Kjaer, 2004). Ayrıca bu süreç, ekstraselüler matrisin yalnızca pasif bir yapı olmadığını, aksine hücrel davranışı yönlendiren aktif bir biyolojik düzenleyici olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır (Hynes, 2009). Mekanotransdüksiyon süreçleri genetik düzenleyiciler ile ekstraselüler matris arasındaki etkileşimi açıklayan temel bir mekanizma olup, bu süreçlerin anlaşılması spor yaralanmalarının önlenmesi ve tedavi stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Wang, 2006).

6. Tendon ve ligament yaralanmalarında ekstraselüler matris ve genetik etkileşimlerin klinik yansımaları

Spor yaralanmalarının klinik olarak en sık karşılaşılan formlarından ikisi olan Aşil tendinopatisi ve ön çapraz bağ yaralanmaları, ekstraselüler matris organizasyonu ile genetik düzenleyiciler arasındaki etkileşimin en somut şekilde gözlemlenebildiği patolojiler arasında yer almaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Bu yaralanmalar, yalnızca akut mekanik travmaların sonucu olarak ortaya çıkmamakta, aynı zamanda uzun süreli mikrotravmalar, matris bozulması ve genetik yatkınlıkların birleşimi ile gelişen kompleks süreçler olarak değerlendirilmektedir (Riley, 2004). Aşil tendon patolojileri, özellikle yüksek tekrarlı yüklenmelere maruz kalan sporcularda sık görülmekte ve bu durum tendon ECM'sinin adaptasyon kapasitesi ile doğrudan ilişkilendirilmektedir (Kjaer, 2004). Sağlıklı tendon dokusunda kollajen liflerin düzenli hizalanması, kuvvet iletimini optimize ederken, tendinopatik dokuda bu organizasyonun bozulduğu ve kollajen liflerin düzensiz hale geldiği gösterilmektedir (Sharma & Maffulli, 2005). Bu yapısal bozulmaya sıklıkla proteoglikan artışı, su içeriğinde yükselme ve neovaskülarizasyon gibi değişiklikler eşlik etmekte olup, bu durum ECM'nin biyomekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Riley, 2004). Genetik açıdan değerlendirildiğinde, özellikle COL5A1 genindeki varyasyonların Aşil tendinopatisi ile ilişkili olduğu ve bu genin kollajen fibril organizasyonu üzerinde belirleyici rol oynadığı gösterilmektedir (September et al., 2009). COL5A1 geninin rs12722 polimorfizmi, tendon esnekliği ve fibril çap dağılımı ile ilişkilendirilmiş olup, bazı genotiplerin tendinopati

riskini artırabileceği ileri sürülmektedir (Posthumus et al., 2009). Bu genetik farklılıklar, bazı bireylerin aynı antrenman yükü altında neden daha yüksek yaralanma riski taşıdığına açıklayan önemli bir biyolojik temel sunmaktadır (Collins & Posthumus, 2011). Ön çapraz bağ yaralanmaları ise daha çok ani yüklenmeler ve yön değişiklikleri ile ilişkilendirilmekle birlikte, ligament ECM kalitesinin bu yaralanmaların oluşumunda belirleyici olduğu giderek daha fazla kabul görmektedir (Griffin et al., 2006). ACL dokusunda kollajen lif organizasyonu, elastik lif katkısı ve proteoglikan dağılımı, ligamentin mekanik dayanıklılığını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Frank, 2004). Yaralanma sonrası dönemde ACL dokusunda kollajen tip I ve III oranlarının değiştiği, matriks metalloproteinaz aktivitesinin arttığı ve ECM organizasyonunun bozulduğu gösterilmektedir (Haslauer et al., 2014). Genetik düzeyde, COL1A1 ve COL5A1 genlerindeki varyasyonların ACL yaralanmaları ile ilişkilendirildiği ve bu genlerin ligament dayanıklılığı üzerinde etkili olduğu bildirilmektedir (Khoschnau et al., 2008). Ayrıca ECM remodeling süreçlerinde rol oynayan MMP3 genindeki polimorfizmlerin, ligament dokusunun yeniden yapılanma kapasitesini etkileyerek yaralanma riskini modüle edebileceği öne sürülmektedir (Raleigh et al., 2009). Bu genetik faktörlerin etkisi, tek başına belirleyici olmaktan ziyade, mekanik yüklenme, nöromüsküler kontrol ve anatomik faktörler ile birlikte değerlendirildiğinde anlam kazanmaktadır (Griffin et al., 2006). Bu nedenle ACL yaralanmaları, yalnızca “travmatik olaylar” olarak değil, aynı zamanda altta yatan biyolojik ve genetik zemin üzerinde gelişen multifaktöriyel patolojiler olarak ele alınmalıdır (Collins & Posthumus, 2011). Tendon ve ligament yaralanmalarında ECM ve genetik etkileşimlerin klinik önemi yalnızca yaralanma oluşumu ile sınırlı değildir, aynı zamanda iyileşme süreci ve yeniden yaralanma riski üzerinde de belirleyici rol oynamaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Özellikle genetik olarak farklı ECM remodeling kapasitesine sahip bireylerde, iyileşme sürecinin hızı ve kalitesi anlamlı şekilde değişebilmektedir (Pickering & Kiely, 2017). Bu durum, rehabilitasyon süreçlerinin bireyselleştirilmesi gerektiğini ve “tek tip” yaklaşımların her sporcu için uygun olmayabileceğini göstermektedir (Pickering & Kiely, 2017). Aşıl tendinopatisi ve ACL yaralanmaları gibi klinik örnekler, ekstraselüler matriks organizasyonu ile genetik düzenleyiciler arasındaki etkileşimin spor yaralanmalarının oluşumu, ilerleyişi ve iyileşme süreci üzerindeki belirleyici rolünü açık bir şekilde ortaya koymaktadır (Collins & Posthumus, 2011).

7. MikroRNA ve epigenetik düzenleme bağlamında ekstraselüler matriksin genetik kontrolü

Ekstraselüler matris organizasyonunun yalnızca genetik polimorfizmlerle değil, aynı zamanda gen ekspresyonunun epigenetik düzeyde düzenlenmesi ile de şekillendiği giderek daha fazla kabul görmektedir (Bird, 2007). Epigenetik mekanizmalar, DNA dizisinde herhangi bir değişiklik olmaksızın gen ekspresyonunun modülasyonunu sağlayarak hücresel yanıtların çevresel faktörlere adapte olmasına olanak tanımaktadır (Jaenisch & Bird, 2003). Bu mekanizmalar arasında DNA metilasyonu, histon modifikasyonları ve mikroRNA'lar (miRNA) en önemli düzenleyici unsurlar olarak öne çıkmaktadır (Goldberg et al., 2007). Özellikle mikroRNA'lar, hedef mRNA'ların translasyonunu baskılayarak veya degradasyonunu sağlayarak protein sentezini ince ayar düzeyinde kontrol eden kısa kodlamayan RNA molekülleri olarak tanımlanmaktadır (Bartel, 2004). Kas-iskelet sistemi dokularında mikroRNA'ların, ekstraselüler matris bileşenlerinin sentezi ve yıkımını düzenleyen genlerin ekspresyonunu etkilediği gösterilmiştir (McCarthy, 2008). Bu bağlamda belirli mikroRNA'ların kollajen sentezi, matris metalloproteinaz aktivitesi ve fibroblast fonksiyonları üzerinde doğrudan etkili olduğu bilinmektedir (Leung & Sharp, 2010). Örneğin, bazı mikroRNA'ların COL1A1 ve COL3A1 gibi kollajen genlerinin ekspresyonunu baskılayarak ECM sentezini azaltabildiği, buna karşılık bazı mikroRNA'ların ise fibroblast aktivasyonunu artırarak matris birikimini teşvik edebildiği bildirilmektedir (Leung & Sharp, 2010). Bu çift yönlü etki, ekstraselüler matrisin homeostazının korunmasında mikroRNA'ların hassas bir dengeleyici rol üstlendiğini göstermektedir (Bartel, 2004). MikroRNA'ların etkisi yalnızca normal fizyolojik süreçlerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda yaralanma sonrası iyileşme sürecinde de belirgin hale gelmektedir (McCarthy, 2008). Yaralanma sonrası dönemde mikroRNA ekspresyon profillerinde meydana gelen değişiklikler, inflamasyon, hücre proliferasyonu ve ECM remodeling süreçlerini doğrudan etkileyebilmektedir (Goldberg et al., 2007). Bu değişikliklerin bazı durumlarda iyileşmeyi desteklediği, ancak bazı durumlarda fibrotik süreçleri artırarak doku kalitesini olumsuz yönde etkilediği gösterilmektedir (Wynn & Ramalingam, 2012). Özellikle TGF- β sinyali ile mikroRNA'lar arasındaki etkileşim, fibrozis gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır (Leask & Abraham, 2004). TGF- β 'nın aşırı aktivasyonu, belirli mikroRNA'ların ekspresyonunu artırarak fibroblastların aşırı matris üretmesine ve fibrotik dokuların oluşmasına neden olabilmektedir (Wynn & Ramalingam, 2012). Bu durum, spor yaralanmaları sonrası gelişen sert ve fonksiyonel açıdan yetersiz iyileşme dokularının moleküler temelini açıklamaktadır (Sharma & Maffulli, 2005). Epigenetik düzenlemenin bir diğer önemli yönü, bu süreçlerin çevresel

faktörlere duyarlı olmasıdır (Jaenisch & Bird, 2003). Mekanik yüklenme, beslenme, hormonal durum ve inflamasyon gibi faktörler, mikroRNA ekspresyonunu değiştirerek ekstraselüler matriks organizasyonunu dolaylı olarak etkileyebilmektedir (Pickering & Kiely, 2017). Bu durum, genetik yatkınlık ile çevresel etkiler arasındaki etkileşimin epigenetik mekanizmalar aracılığıyla somutlaştığını göstermektedir (Bird, 2007). Dolayısıyla sporcularda gözlenen bireysel farklılıklar, yalnızca genetik varyasyonlarla değil, aynı zamanda epigenetik düzenleme süreçleri ile de açıklanmalıdır (Pickering & Kiely, 2017). Son yıllarda yapılan çalışmalar, belirli mikroRNA profillerinin tendon ve ligament yaralanmaları ile ilişkili olabileceğini ve bu moleküllerin potansiyel biyobelirteçler olarak kullanılabileceğini öne sürmektedir (McCarthy, 2008). Ancak bu alandaki araştırmaların henüz sınırlı olduğu ve klinik uygulamaya geçiş için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır (Pickering & Kiely, 2017). Bununla birlikte mikroRNA'lar ve epigenetik düzenleyiciler, gelecekte spor yaralanmalarının hem erken tanısında hem de hedefe yönelik tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabilecek potansiyele sahiptir (Bird, 2007). Ekstraselüler matriksin genetik kontrolü yalnızca DNA düzeyindeki varyasyonlarla açıklanamayacak kadar kompleks olup, epigenetik mekanizmalar bu sürecin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Jaenisch & Bird, 2003).

8. Klinik uygulamalar, bireyselleştirilmiş yaklaşımlar ve ekstraselüler matriks temelli geleceğe yönelik perspektifler

Ekstraselüler matriks organizasyonu ile genetik ve epigenetik düzenleyiciler arasındaki karmaşık etkileşimin anlaşılması, spor yaralanmalarının yalnızca tedavisinde değil, aynı zamanda önlenmesinde de yeni yaklaşımların geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Pickering & Kiely, 2017). Bu bağlamda, bireyler arası farklılıkların yalnızca antrenman düzeyi veya biyomekanik özelliklerle açıklanamayacağı, aynı zamanda genetik ve moleküler altyapının da bu farklılıkların önemli bir belirleyicisi olduğu giderek daha fazla kabul görmektedir (Collins & Posthumus, 2011). Geleneksel yaklaşımlar genellikle yaralanma sonrası tedaviye odaklanırken, güncel literatür risk belirleme ve önleyici stratejilerin geliştirilmesine doğru bir paradigma değişimini işaret etmektedir (Bahr & Krosshaug, 2005). Bu dönüşümün merkezinde ise genetik yatkınlık, ekstraselüler matriks kalitesi ve mekanik yüklenme arasındaki etkileşimin birlikte değerlendirilmesi yer almaktadır (Pickering & Kiely, 2017). Özellikle bağ dokusu ile ilişkili genetik varyasyonların belirlenmesi, sporcularda yaralanma riskinin öngörülmesine yönelik potansiyel bir araç olarak değerlendirilmektedir (September et al., 2007). Ancak mevcut kanıtlar, tek bir genin yaralanma riskini belirlemede yeterli olmadığını ve bu sürecin poligenik

bir yapı gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır (Collins & Posthumus, 2011). Bu nedenle genetik testlerin klinik uygulamaya entegrasyonu, dikkatli yorumlanması gereken ve henüz tam olarak standardize edilmemiş bir alan olarak değerlendirilmektedir (Pickering & Kiely, 2017). Bununla birlikte, genetik ve epigenetik verilerin antrenman planlaması ile birleştirilmesi, bireyselleştirilmiş yüklenme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Kjaer, 2004). Örneğin, ECM remodeling kapasitesi daha düşük olduğu düşünülen bireylerde yüklenme yoğunluğunun daha kontrollü artırılması, mikrotravma birikimini azaltarak yaralanma riskini düşürebilir (Kjaer, 2004). Benzer şekilde, iyileşme sürecinde genetik farklılıkların dikkate alınması, rehabilitasyon protokollerinin bireye özgü şekilde düzenlenmesine olanak tanıyabilir (Sharma & Maffulli, 2005). Bu yaklaşım, “tek tip rehabilitasyon” modelinden uzaklaşarak daha hedefe yönelik ve etkin tedavi stratejilerinin geliştirilmesini desteklemektedir (Sharma & Maffulli, 2005). Ekstraselüler matris temelli yeni tedavi yaklaşımları da son yıllarda dikkat çekici bir gelişim göstermektedir (Badylak et al., 2011). Deselülarize ekstraselüler matris (dECM) temelli biyomateryaller, doku mühendisliği alanında kullanılarak hasarlı dokuların yeniden yapılandırılmasında umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır (Badylak et al., 2011). Bu biyomateryaller, doğal ECM yapısını taklit ederek hücrel adezyon, proliferasyon ve diferansiyasyonu destekleyen uygun bir mikroçevre sağlamaktadır (Badylak et al., 2011). Ayrıca rejeneratif yaklaşımlar ve mekanobiyolojik temelli tedavi stratejileri, ECM ile etkileşime girerek doku onarım süreçlerini destekleme potansiyeli nedeniyle özellikle tendon ve ligament yaralanmalarında artan bir araştırma odağı haline gelmiştir (Wang et al., 2012; Badylak et al., 2011). Bununla birlikte, bu tedavi yöntemlerinin klinik etkinliğinin tam olarak ortaya konabilmesi için daha geniş ölçekli ve uzun dönemli çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Wang et al., 2012). Gelecekte spor yaralanmalarının yönetiminde, genetik profil, epigenetik düzenleyiciler, mekanik yüklenme geçmişi ve ekstraselüler matris özelliklerinin birlikte değerlendirildiği çok boyutlu yaklaşımların ön plana çıkması beklenmektedir (Pickering & Kiely, 2017). Bu bütüncül yaklaşım, yalnızca yaralanma riskinin azaltılmasına değil, aynı zamanda performans optimizasyonuna da katkı sağlayabilecek bir potansiyele sahiptir (Collins & Posthumus, 2011). Ancak bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, mevcut literatürün henüz tüm bu faktörleri klinik uygulamaya doğrudan aktarabilecek düzeyde kesinlik sunmadığıdır (Pickering & Kiely, 2017). Dolayısıyla bu alandaki gelişmeler umut verici olmakla birlikte, uygulamaya geçiş sürecinde bilimsel kanıtların dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir (Bahr & Krosshaug, 2005). Ekstraselüler matris ve genetik düzenleyiciler arasındaki etkileşimin derinlemesine anlaşılması, spor yaralanmalarına yaklaşımda daha öngörülebilir,

bireyselleştirilmiş ve etkili stratejilerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Pickering & Kiely, 2017). Bu perspektif, spor bilimleri ve spor hekimliğinde geleceğin yaklaşımının, moleküler biyoloji ile klinik uygulamaların entegrasyonu üzerine kurulacağını açıkça göstermektedir (Collins & Posthumus, 2011).

9. Sonuç

Bu bölümde ele alınan bulgular, ekstraselüler matriksin yalnızca yapısal bir bileşen olmadığını, aynı zamanda kas-iskelet sistemi dokularının mekanik dayanıklılığını, biyolojik yanıt kapasitesini ve iyileşme dinamiklerini belirleyen aktif bir düzenleyici sistem olduğunu göstermektedir (Hynes, 2009). Özellikle tendon ve ligament dokularında ECM organizasyonunun kollajen mimarisi, proteoglikan içeriği ve matriksin yeniden yapılanma kapasitesi üzerinden doku bütünlüğünü doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır (Screen et al., 2015). Bu çerçevede, matriks yapısındaki mikrodüzyey bozulmaların zamanla birikerek yaralanma gelişimine zemin hazırlayabildiği görülmektedir (Sharma & Maffulli, 2005).

Bununla birlikte, ekstraselüler matriks organizasyonu yalnızca mekanik yüklenmenin bir sonucu değildir; bu yapı aynı zamanda genetik ve epigenetik düzenleyiciler tarafından biçimlendirilen dinamik bir biyolojik süreçtir (Pickering & Kiely, 2017). Özellikle kollajen sentezi ve fibril organizasyonu ile ilişkili genlerdeki varyasyonların, bireyler arasında yaralanma yatkınlığını etkileyebildiği gösterilmiştir (Khoschnau et al., 2008). Ancak mevcut literatür, spor yaralanmalarının tek bir gen üzerinden açıklanamayacağını ve bu sürecin poligenik, multifaktöriyel ve çevresel etkilere açık bir yapı taşıdığını ortaya koymaktadır (September et al., 2007). Bu nedenle genetik yatkınlık, tek başına belirleyici bir unsurdan çok, mekanik yüklenmeye verilen biyolojik yanıtın sınırlarını etkileyen bir zemin olarak değerlendirilmelidir (Collins & Posthumus, 2011).

Mekanotransdüksiyon süreçleri, ekstraselüler matriks ile hücresele yanıt arasındaki ilişkiyi açıklayan temel biyolojik eksenlerden birini oluşturmaktadır (Humphrey et al., 2014). Uygun düzeydeki mekanik yüklenmenin adaptif matriks sentezini desteklediği, buna karşılık aşırı ya da düzensiz yüklenmenin ECM yıkımını artırarak dejeneratif süreçleri hızlandırabildiği bilinmektedir (Wang, 2006). Bu durum, spor yaralanmalarının yalnızca ani travmatik olaylar olarak değil, çoğu zaman uzun süreli mikroyapısal bozulmaların birikimi sonucu gelişen süreçler olarak değerlendirilmesi gerektiğini düşündürmektedir (Riley, 2004).

Yaralanma sonrası iyileşme süreci de benzer biçimde ekstraselüler matriks yeniden yapılanmasının niteliği ile yakından ilişkilidir (Voleti et al., 2012).

İnflamasyon, proliferasyon ve remodeling fazlarının dengeli ilerlemesi, dokunun nihai mekanik kalitesini belirlemekte; bu dengenin bozulduğu durumlarda ise fibrotik ve işlevsel açıdan yetersiz dokular gelişebilmektedir (Wynn & Ramalingam, 2012). Epigenetik düzenleyiciler ve mikroRNA'ların bu süreçte rol oynadığına ilişkin veriler, bireyler arası iyileşme farklılıklarını açıklamada yeni bir perspektif sunmaktadır (Bird, 2007).

Genel hatlarıyla değerlendirildiğinde, spor yaralanmalarının anlaşılması ve yönetimi için yalnızca mekanik yüklenmeye odaklanan geleneksel yaklaşımlar yeterli görünmemektedir. Ekstraselüler matriks biyolojisi, genetik yatkınlık ve çevresel etkiler birlikte ele alındığında, yaralanma riskinin ve iyileşme kapasitesinin daha doğru yorumlanabileceği anlaşılmaktadır. Bu bakış açısı, gelecekte bireyselleştirilmiş antrenman, rehabilitasyon ve koruyucu stratejilerin geliştirilmesi açısından önemli bir kuramsal ve klinik zemin sunmaktadır. Bununla birlikte, genetik ve epigenetik verilerin rutin klinik kullanıma aktarılabilmesi için daha kapsamlı, daha tutarlı ve translasyonel niteliği güçlü çalışmalara ihtiyaç vardır. Ekstraselüler matriks ile genetik düzenleyiciler arasındaki etkileşim, spor yaralanmalarının oluşumu, ilerleyişi ve iyileşme sürecini anlamada temel açıklayıcı çerçevelerden birini oluşturmaktadır. Bu alanın gelişimi, spor bilimleri ile spor hekimliğinde daha öngörülebilir, daha hedefe yönelik ve daha bireyselleştirilmiş yaklaşımların önünü açma potansiyeline sahiptir.

Kaynakça

- Aumailley, M. (2013). The laminin family. *Cell Adhesion & Migration*, 7(1), 48–55.
- Badylak, S. F., Taylor, D., & Uygun, K. (2011). Whole-organ tissue engineering: Decellularization and recellularization of three-dimensional matrix scaffolds. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 13, 27–53.
- Bahr, R., & Krosshaug, T. (2005). Understanding injury mechanisms: A key component of preventing injuries in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 39(6), 324–329.
- Bartel, D. P. (2004). MicroRNAs: Genomics, biogenesis, mechanism, and function. *Cell*, 116(2), 281–297.
- Bird, A. (2007). Perceptions of epigenetics. *Nature*, 447(7143), 396–398.
- Brew, K., & Nagase, H. (2010). The tissue inhibitors of metalloproteinases (TIMPs): An ancient family with structural and functional diversity. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1803(1), 55–71.
- Collins, M., & Posthumus, M. (2011). Type V collagen genotype and exercise-related phenotype relationships: A novel hypothesis. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 39(4), 191–197.
- Discher, D. E., Janmey, P., & Wang, Y. L. (2005). Tissue cells feel and respond to the stiffness of their substrate. *Science*, 310(5751), 1139–1143.
- Frank, C. B. (2004). Ligament structure, physiology and function. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 4(2), 199–201.
- Frantz, C., Stewart, K. M., & Weaver, V. M. (2010). The extracellular matrix at a glance. *Journal of Cell Science*, 123(24), 4195–4200.
- Goldberg, A. D., Allis, C. D., & Bernstein, E. (2007). Epigenetics: A landscape takes shape. *Cell*, 128(4), 635–638.
- Griffin, L. Y., Albohm, M. J., Arendt, E. A., Bahr, R., Beynonn, B. D., Demaio, M., Dick, R. W., Engebretsen, L., Garrett, W. E., Jr., Hannafin, J. A., Hewett, T. E., Huston, L., Ireland, M. L., Johnson, R. J., Lephart, S., Mandelbaum, B. R., Mann, B. J., Marks, P. H., Marshall, S. W., ... Yu, B. (2006). Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries: A review of the Hunt Valley II meeting, January 2005. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(9), 1512–1532.
- Haslauer, C. M., Proffen, B. L., Johnson, V. M., & Murray, M. M. (2014). Expression of modulators of extracellular matrix structure after anterior cruciate ligament injury. *Wound Repair and Regeneration*, 22(1), 103–110.
- Humphrey, J. D., Dufresne, E. R., & Schwartz, M. A. (2014). Mechanotransduction and extracellular matrix homeostasis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 15(12), 802–812.

- Humphries, J. D., Chastney, M. R., Askari, J. A., & Humphries, M. J. (2019). Signal transduction via integrin adhesion complexes. *Current Opinion in Cell Biology*, 56, 14–21.
- Hynes, R. O. (2002). Integrins: Bidirectional, allosteric signaling machines. *Cell*, 110(6), 673–687.
- Hynes, R. O. (2009). The extracellular matrix: Not just pretty fibrils. *Science*, 326(5957), 1216–1219.
- Iozzo, R. V., & Schaefer, L. (2015). Proteoglycan form and function: A comprehensive nomenclature of proteoglycans. *Matrix Biology*, 42, 11–55.
- Jaenisch, R., & Bird, A. (2003). Epigenetic regulation of gene expression: How the genome integrates intrinsic and environmental signals. *Nature Genetics*, 33(Suppl.), 245–254.
- Kannus, P. (2000). Structure of the tendon connective tissue. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 10(6), 312–320.
- Khoschnau, S., Melhus, H., Jacobson, A., Rahme, H., & Bengtsson, H. (2008). Type I collagen alpha 1 Sp1 polymorphism and the risk of cruciate ligament ruptures or shoulder dislocations. *The American Journal of Sports Medicine*, 36(12), 2432–2436.
- Kiani, C., Chen, L., Wu, Y. J., Yee, A. J., & Yang, B. B. (2002). Structure and function of aggrecan. *Cell Research*, 12(1), 19–32.
- Kjaer, M. (2004). Role of extracellular matrix in adaptation of tendon and skeletal muscle to mechanical loading. *Physiological Reviews*, 84(2), 649–698.
- Leask, A., & Abraham, D. J. (2004). TGF- β signaling and the fibrotic response. *The FASEB Journal*, 18(7), 816–827.
- Leung, A. K. L., & Sharp, P. A. (2010). MicroRNA functions in stress responses. *Molecular Cell*, 40(2), 205–215.
- Lu, P., Takai, K., Weaver, V. M., & Werb, Z. (2011). Extracellular matrix degradation and remodeling in development and disease. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 3(12), a005058.
- Marsolais, D., Côté, C. H., & Frenette, J. (2001). Neutrophils and macrophages accumulate sequentially following Achilles tendon injury. *Journal of Orthopaedic Research*, 19(6), 1203–1209.
- McCarthy, J. J. (2008). MicroRNA and skeletal muscle function: Novel potential roles in exercise, disease, and adaptation. *Journal of Applied Physiology*, 105(3), 1005–1010.
- Page-McCaw, A., Ewald, A. J., & Werb, Z. (2007). Matrix metalloproteinases and the regulation of tissue remodelling. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 8(3), 221–233.
- Pankov, R., & Yamada, K. M. (2002). Fibronectin at a glance. *Journal of Cell Science*, 115(20), 3861–3863.

- Pickering, C., & Kiely, J. (2017). Genetic and epigenetic influences on sports performance and injury risk: Future possibilities and practical applications. *Sports Medicine*, 47(8), 1471–1483.
- Posthumus, M., September, A. V., O’Cuiuneagain, D., van der Merwe, W., Schwellnus, M. P., & Collins, M. (2009). The COL5A1 gene is associated with increased risk of Achilles tendinopathy. *The American Journal of Sports Medicine*, 37(2), 409–414.
- Raleigh, S. M., van der Merwe, L., Ribbans, W. J., Smith, R. K. W., Schwellnus, M. P., & Collins, M. (2009). Variants within the MMP3 gene are associated with Achilles tendinopathy: Possible interaction with the COL5A1 gene. *Journal of Orthopaedic Research*, 27(11), 1531–1537.
- Ricard-Blum, S. (2011). The collagen family. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 3(1), a004978.
- Riley, G. (2004). The pathogenesis of tendinopathy. *British Journal of Sports Medicine*, 38(4), 399–404.
- Robinson, P. S., Lin, T. W., Reynolds, P. R., Derwin, K. A., Iozzo, R. V., & Soslowsky, L. J. (2004). Strain-rate sensitive mechanical properties of tendon fascicles from mice with genetically engineered alterations in collagen and decorin. *Journal of Biomechanical Engineering*, 126(2), 252–257.
- Screen, H. R. C., Berk, D. E., Kadler, K. E., Ramirez, F., & Young, M. F. (2015). Tendon functional extracellular matrix. *Journal of Orthopaedic Research*, 33(6), 793–799.
- September, A. V., Cook, J., Handley, C. J., van der Merwe, L., Schwellnus, M. P., & Collins, M. (2009). Variants within the COL5A1 gene are associated with Achilles tendinopathy in two populations. *British Journal of Sports Medicine*, 43(5), 357–365.
- September, A. V., Posthumus, M., & Collins, M. (2007). Tendon and ligament injuries: The genetic component. *British Journal of Sports Medicine*, 41(4), 241–246.
- Sharma, P., & Maffulli, N. (2005). Tendon injury and tendinopathy: Healing and repair. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 87(1), 187–202.
- Shoulders, M. D., & Raines, R. T. (2009). Collagen structure and stability. *Annual Review of Biochemistry*, 78, 929–958.
- Sherratt, M. J. (2009). Tissue elasticity and the ageing elastic fibre. *Age*, 31(4), 305–325.
- Theocharis, A. D., Skandalis, S. S., Gialeli, C., & Karamanos, N. K. (2016). Extracellular matrix structure. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 97, 4–27.
- Thorpe, C. T., Screen, H. R. C., Clegg, P. D., & Birch, H. L. (2015). Variations in tendon structure and composition with function in an energy storing versus a positional tendon. *Journal of Anatomy*, 226(2), 119–134.

- To, W. S., & Midwood, K. S. (2011). Plasma and cellular fibronectin: Distinct and independent functions during tissue repair. *Fibrogenesis & Tissue Repair*, 4, 21.
- Visse, R., & Nagase, H. (2003). Matrix metalloproteinases and tissue inhibitors of metalloproteinases: Structure, function, and biochemistry. *Circulation Research*, 92(8), 827–839.
- Voleti, P. B., Buckley, M. R., & Soslowky, L. J. (2012). Tendon healing: Repair and regeneration. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 14, 47–71.
- Wang, J. H.-C. (2006). Mechanobiology of tendon. *Journal of Biomechanics*, 39(9), 1563–1582.
- Wang, J. H.-C., Guo, Q., & Li, B. (2012). Tendon biomechanics and mechanobiology—A minireview of basic concepts and recent advancements. *Journal of Hand Therapy*, 25(2), 133–141.
- Wynn, T. A., & Ramalingam, T. R. (2012). Mechanisms of fibrosis: Therapeutic translation for fibrotic disease. *Nature Medicine*, 18(7), 1028–1040.
- Yurchenco, P. D. (2011). Basement membranes: Cell scaffoldings and signaling platforms. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 3(2), a004911.
- Zhang, G., Ezura, Y., Chervoneva, I., Robinson, P. S., Beason, D. P., Carine, E. T., Soslowky, L. J., Iozzo, R. V., & Birk, D. E. (2006). Decorin regulates assembly of collagen fibrils and acquisition of biomechanical properties during tendon development. *The Journal of Cell Biochemistry*, 98(6), 1436–1449.

Sporda Genetik, Performans ve Yaralanma: Moleküler Temellerden Uygulamaya Bütüncül Yaklaşım

Editörler:

Doç. Dr. Murat Tutar

Doç. Dr. Akan Bayrakdar