

**T.C.
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BEDEN EĞİTİMİ VE SPOR ANABİLİM DALI**

**ANAEROBİK ANTRENMANLARIN SANTRAL-PERİFERİK
YORGUNLUK VE TOPARLANMA SÜREÇLERİNE ETKİLERİ**

ZÜBEYDE ASLANKESER

DOKTORA TEZİ

**DANIŞMANI
Prof. Dr. S.SADİ KURDAK**

ADANA-2010

**T.C.
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BEDEN EĞİTİMİ VE SPOR ANABİLİM DALI**

**Anaerobik Antrenmanların Santral-Periferik Yorgunluk ve Toparlanma
Süreçlerine Etkileri**

ZÜBEYDE ASLANKESER

DOKTORA TEZİ

DANIŞMANI

Prof. Dr. S.SADİ KURDAK

**Bu tez, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
TF2007D7 no'lu proje ve Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü
tarafından 07202019 no'lu proje olarak desteklenmiştir.**

ADANA-2010

KABUL ONAY

Beden Eğitimi ve Spor Anabilim Dalı Doktora programı çerçevesinde yürütölmüş olan “Anaerobik Antrenmanların Santral-Periferik Yorgunluk ve Toparlanma Süreçlerine Etkileri” adlı çalışma, aşğıdaki jüri tarafından Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tarihi: 21/06/2010

TEZ SINAV JÜRİSİ

Prof. Dr. Sanlı Sani KURDAK

Çukurova Üniversitesi

Başkan

Prof. Dr. Behice DURGUN

Çukurova Üniversitesi

Üye

Prof.Dr. Hakkı GÖKBEL

Çukurova Üniversitesi

Üye

Yrd.Doç.Dr. Zeynep Filiz DİNÇ

Çukurova Üniversitesi

Üye

Yrd.Doç.Dr. Gonca İNCE

Çukurova Üniversitesi

Üye

Yukarıdaki tez, Yönetim Kurulununtarih ve.....sayılı kararı ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halil KASAP

Sağlık Bilimleri Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan **Ar.Gr. Selcen KORKMAZ, Uzm. Dr. Çiğdem Zeren** ve **Dr. Özlem Örnek**'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Doktora eğitimim süresince desteğini esirgemeyen **Öğr. Gör. Dr Kerem Tuncay Özgünen**'e, veri değerlendirmesinde yardımcı olan **Doç. Dr. Sami ARICA**'ya tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Doktora eğitimine başladığım günden bu yana bana destek olan **Prof. Dr. Hakkı GÖKBEL**'e içten teşekkür ederim. Tez çalışmama katılan bütün sporculara çalışmaya gösterdikleri ciddiyet, verdikleri önem ve yaptıkları fedakarlıklar için teşekkür ederim.

Desteklerini ve bana olan inançlarını her zaman hissettiğim aileme, hoşgörüsü ve desteğinden dolayı eşim **Levent ASLANKESER'e** teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1.Hareketin Motor Kontrolü.....	2
2.1.1. Korteks Ve Beyin Sapının Motor İşlevdeki Önemi.....	2
2.1.2. Motor İşlevlerde Serebellum ve Bazal Gangliyonların Rolü.....	4
2.1.3.Motor İşlevlerde Beyin Sapının Rolü.....	4
2.1.4.Motor İşlevlerde Omuriliğin Rolü.....	5
2.1.4.1. Motor Sinyallerin Korteksten Kaslara Taşınması.....	5
2.1.5.Motor İşlevler İçin Duysal Bilgiyi İçeren Periferik Sinir Sisteminin Önemi.....	6
2.2.İskelet Kası Aktivitesinin Kontrolü.....	7
2.2.1. Motor Ünitelerin Yapı Ve Özellikleri.....	8
2.2.2.Motor Ünite Aktivasyonu.....	9
2.2.2.1.Büyüklik Prensibi.....	9
2.3.İskelet Kas Yapısı ve Kasılma Mekanizması.....	10
2.3.1.Uyarılma-Kasılma İlişkisi ve Kas Kasılması.....	12
2.3.2. Kas Kasılmasında Enerji Sistemleri.....	13
2.4.Yorgunluk.....	14
2.4.1.Santral Yorgunluk.....	15
2.4.1.1.Uyarı Frekansına Göre Yorgunluk Çeşitleri.....	18
2.4.1.1.1Yüksek Frekanslı Yorgunluk.....	18
2.4.1.1.2.Düşük Frekanslı Yorgunluk.....	19
2.4.2.Yorgunlukta Afferent Inputlar.....	19
2.4.3.Kas Yorgunluğunda Motor Kortikal Ve Supraspinal Faktörler.....	20

2.4.3.1.Motor Unitelerin Etkinlik Örüntüsü.....	20
2.4.3.2.Yorgunlukta Motonöron Düzeyindeki Değişiklikler.....	21
2.4.3.2.1.Motor Nöronların Eksitasyonunun Azalması.....	22
2.5.Nöromusküler Kavşak ve Yorgunluk.....	23
2.6.Periferik Yorgunluk.....	24
2.6.1.Enerji Kaynakları ve Biyokimyasal Süreçlerdeki Değişimler.....	26
2.6.1.1.Glikojen.....	27
2.6.1.2.Laktat Ve Asidite.....	28
2.6.1.2.1.Laktat Ve pH Kontrol Mekanizmaları.....	30
2.6.2.Enzimler.....	33
2.6.2.1.LDH.....	33
2.6.2.2.CK.....	33
2.6.3.Yorgunlukta Elektrolit Değişiklikleri.....	34
2.6.3.1.Na-K Değişiklikleri.....	34
2.6.3.2.İnorganik Fosfat.....	35
2.6.3.3.Kalsiyum İyonları.....	36
2.7.Farklı Kas Liflerinde Yorgunluk.....	36
2.9.Yorgunlukta PO ₂ Etkisi.....	37
2.9.1.Düşük PO ₂ Ve Motor Performans.....	37
2.9.1.Egzersizde Serebral Oksijen Dağılımı.....	38
2.9.1.Reaktif Oksijen Türleri (ROS).....	38
2.10.Yorgunluğun Değerlendirilmesi.....	39
2.10.1.EMG Ölçümlerinin Yorgunluğun Değerlendirilmesinde Kullanımı.....	39
2.10.2.Maksimal İstemli Kasılmaların(MVC) Yorgunluğun Değerlendirilmesinde Kullanımı.....	41
2.10.3.Elektrik Uyarılarının Yorgunluğun Değerlendirilmesinde Kullanım.....	41
2.11. Farklı Egzersizlerde Yorgunluk Oluşumu.....	45
2.11.1.Anaerobik Yüklemeler ve Yorgunluk İlişkisi.....	45
2.11.2. Aerobik Yüklenmeler ve Yorgunluk İlişkisi.....	46
2.12.Antrenmanlarla Yorgunluğa Karşı Gelişen Adaptasyonlar.....	47
2.12.1.Antrenmanlara Aerobik Adaptasyonlar.....	48
2.12.2. Antrenmanlara Anaerobik Adaptasyonlar.....	49

3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	52
3.1. Deney Protokolü.....	52
3.1.1. Antrenman öncesi performans ölçümleri.....	52
3.1.2. Antrenman sonrası performans ölçümleri.....	53
3.1.3. Yorgunluk protokolü.....	53
3.1.4. Sporcuların Genel Performans Değerlendirmeleri.....	53
3.1.3. Sporcuların Genel Performans Değerlendirmeleri.....	54
3.2. Ölçülen değişkenler.....	54
3.2.1. Maksimum Oksijen Alımı (VO ₂ max ml/dak).....	54
3.2.2. Kas Kuvveti Ölçümü.....	55
3.2.3. Elektrik Uyarısı.....	56
3.2.4. 30m. Sürat Ölçümü.....	57
3.2.5. Kan Değişkenlerinin Ölçümü.....	58
3.3. Antrenman Programı.....	58
3.4.EMG Ölçümleri.....	60
3.5. Laktat Ölçümleri.....	63
3.6. İstatistiksel Analiz.....	63
4. BULGULAR.....	65
4.1. Demografik Özellikler.....	65
4.2.Sprint Performansı Sonuçları.....	65
4.3.VO ₂ max Ölçüm Sonuçları.....	66
4.4. Yorgunluk Testinde Dayanıklılık Süresi, Maksimal Yük ve Maksimal Kalp Atım Sayısı Ölçüm Sonuçları.....	68
4.5. Laktat Ölçüm Sonuçları.....	70
4.6. Kandan Ölçülen Enzim ve İyon Konsantrasyon Sonuçları.....	72
4.7. Kas Kuvveti Ölçüm Sonuçları.....	77
4.7.1.Maksimal İstemli Diz Ekstensiyonu Sırasında Kaydedilen Kuvvet Sonuçları.....	77
4.7.2. Yorgunluk Testi Sırasında Yüklemeler Arasında Yapılan Maksimal Kasılma Kuvveti Sonuçları.....	84
4.7.3.Elektrik Uyarısı İle Kaydedilen Kuvvet Ölçüm Sonuçları.....	86

4.7.3.1. Elektrik Uyarısının Maksimal İstemli İzometrik Kasılma Sırasında Uygulanması İle Kaydedilen Kuvvet Sonuçları.....	87
4.8. EMG Sonuçları.....	89
4.8.1.Ortalama Frekans Sonuçları.....	89
4.8.2.IEMG Sonuçları.....	99
4.8.3. RMS Sonuçları.....	107
5. TARTIŞMA.....	117
5.1. Sprint Antrenmanlarının Performansa Etkisi.....	118
5.2. Yorgunluk Bulgularının Değerlendirilmesi.....	120
5.2.1.Kandan Ölçülen Biyokimyasalların Yorgunluktaki Önemi.....	121
5.2.2.Antrenman ve Yorgunluk Süreçlerinin Laktat Değerlerine Etkisi.....	124
5.3. EMG Bulgularının Değerlendirilmesi.....	125
5.4.Elektrik Uyarısının Değerlendirmesi.....	127
5.4.1. İstemli Kasılma Olmadan Kasa Uygulanan Elektriksel Uyarının Etkisi.....	128
5.4.2.Maksimal İstemli Kasılma Sırasında Kasa Verilen Elektrik Uyarısının Etkisi.....	130
6.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	132

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Motor korteksin temel yapısı	3
Şekil 2.2: İstemli kasılma sırasındaki basamaklar.....	7
Şekil 2.3: Sarkomerde yer alan yapılar.....	12
Şekil 2.4: Aksiyon potansiyelinin hücrede yayılması.....	13
Şekil 2.5: Yorgunlukta motor nöronların ateşleme oranlarındaki olası değişiklikler.....	17
Şekil 2.6: Laktik asidin kimyasal yapısı	28
Şekil 2.7: Laktat anyonları ve H^+ nin hücre metabolizmasına etkileri	29
Şekil 2.8: Laktat ve hidrojenin hücreden taşınması.....	30
Şekil 2.9: Laktat metabolizmasında MCT ler.....	31
Şekil 2.10: Yorgunlukta P_i nin kas fonksiyonuna etkileri	35
Şekil 2.11: Yorgunlukla beraber dışarıdan verilen uyarı ile kuvvette artış grafiği.....	42
Şekil 2.12: Dışarıdan beklenmeyen bir uyarının kasılma kuvvetine etkisi	43
Şekil 3.1: Yorgunluk öncesi-sonrası ölçümlerin şematik gösterimi.....	53
Şekil 3.2: Yorgunluk testindeki ölçümlerin şematik gösterimi.....	54
Şekil 3.3: Maksimal izometrik diz ekstensiyon kuvveti ölçümü.....	56
Şekil 3.4. : Elektrik uyarısı elektrotlarının yerleşimi.....	57
Şekil 3.5: Maksimal izometrik kasılma sırasında EMG kaydı alımı.....	62
Şekil 3.6 : Maksimal izometrik diz ekstensiyonu sırasında ölçülen EMG kaydı örneği.....	62
Şekil 4.1: Antrenmanlardan sonra sprint koşu dereceleri.....	66
Şekil 4.2: Antrenmanlardan önce ve sonra VO_{2max} ölçüm sonuçları	67
Şekil 4.3 : Antrenmanlardan önce ve sonra VO_{2max} ölçüm testinde yükleme süresi	67
Şekil 4.4 : Antrenmanlardan önce ve sonra tükenme yükü ortalamaları	68
Şekil 4.5 : Antrenmandan önce-sonra yorgunluk testi sırasındaki tükenme süresi	69
Şekil 4.6: Antrenmanlardan önce-sonra yorgunluk testi sırasındaki maksimum kalp atım sayısı değişimi	69
Şekil 4.7: Antrenmandan önce ardışık laktat ölçümleri arasındaki farklılıklar	71

Şekil 4.8: Antrenmanlardan sonra ardışık ölçümler arası laktat ölçümleri	72
Şekil 4.9 : Antrenmanlardan önce-sonra yorgunlukla LDH değişimi	74
Şekil 4.10 : Antrenmanlardan önce-sonra yorgunlukla CK değişimi	74
Şekil 4.11: Antrenmandan önce-sonra yorgunlukla Na^+ konsantrasyon değişimi	76
Şekil 4.12: Antrenmanlarla ve yorgunlukla serum K^+ değişimi	76
Şekil 4.13: Antrenmanlardan önce ve sonra yorgunlukta Pi değişimi	77
Şekil 4.14: Antrenmanların dinlenim durumundaki istemli maksimal izometrik kasılma kuvvetine etkisi.....	79
Şekil 4.15: Antrenmanlardan önce yorgunlukla maksimal istemli kuvvet değişimi	79
Şekil 4.16: Antrenmanlardan sonra yorgunlukla maksimal istemli kuvvet değişimi	80
Şekil 4.17 : Antrenmanlarla yorgunluk sonrasındaki izometrik kuvvet değişimi	80
Şekil 4.18 : Antrenmanlardan sonra dinlenim kasılması sırasındaki normalize kuvvet değişimi	82
Şekil 4.19 : Antrenmanlardan önce dinlenim ve yorgunluk kasılmasındaki normalize kuvvet değişimleri	83
Şekil 4.20: Antrenmandan sonra yorgunlukla normalize kuvvet değişimi	83
Şekil 4.21: Antrenmanlardan önce ve sonra yorgunlukta ölçülen normalize kuvvet değişimi.....	84
Şekil 4.22: Şekil 4.22: Antrenmandan önce ve sonra bisiklet intervalleri arasında ölçülen maksimal izometrik kuvvet değerleri	86
Şekil 4.23: Maksimal istemli izometrik kasılma + elektriksel uyarının verildiği ölçümlerde kuvvet değişimi	89
Şekil 4.24: Vastus lateralis kasına ait ortalama frekans değerlerinin kasılma süresi boyunca azaldığını gösteren grafik.....	91
Şekil 4.25: Kuvvet ve vastus lateralis ortalama frekans değişim ilişkisini gösteren grafik	92
Şekil 4.26: Vastus medialis kasına ait ortalama frekans değerlerinin kasılma süresi boyunca azaldığını gösteren grafik	94
Şekil 4.27: Kuvvet ve vastus medialis ortalama frekans değişim ilişkisini gösteren grafik	95
Şekil 4.28: Rektus femoris kasına ait ortalama frekans değerlerinin kasılma süresi boyunca azaldığını gösteren grafik	97
Şekil 4.29: Kuvvet ve rektus femoris ortalama frekans değişim ilişkisini gösteren grafik	98

Şekil 4.30: Vastus lateralis kasına ait IEMG değerlerini gösteren grafik	100
Şekil 4.31: Vastus lateralis kasına ait IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik	101
Şekil 4.32: Vastus medialis kasına ait IEMG değerlerini gösteren grafik	103
Şekil 4.33: Vastus medialis kasına ait IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik.....	104
Şekil 4.34: Rektus femoris kasına ait IEMG değerlerini gösteren grafik.....	106
Şekil 4.35: Rektus femoris kasına ait IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik.....	107
Şekil 4.36: Vastus lateralis kasına ait RMS değerlerini gösteren grafik.....	109
Şekil 4.37: Vastus lateralis kasına ait RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik.....	110
Şekil 4.38: Vastus medialis kasına ait RMS değerlerini gösteren grafik.....	112
Şekil 4.39: Vastus medialis kasına ait RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik.....	113
Şekil 4.40 Rektus femoris kasına ait RMS değerlerini gösteren grafik.....	115
Şekil 4.41: Rektus femoris kasına ait RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik.....	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : İstemli kasılmalar ile elektriksel uyarı ile meydana gelen kasılma arasındaki farklılıklar.....	42
Çizelge 2.2: Elektrik uyarısı ve kas kuvvetini değerlendirmede kullanılan tanımlar.....	44
Çizelge 4.1: Çalışmaya katılan deneklerin demografik özellikleri.....	65
Çizelge 4.2: Antrenmandan önce ve sonra yorgunluk testi sırasında kaydedilen laktat değerleri	70
Çizelge 4.3: Antrenmanlardan önce ve sonra dinlenim ve yorgunlukta ölçülen enzim değerleri değişimi.....	73
Çizelge 4.4. Antrenman ve yorgunlukla serum iyon değişimler.....	75
Çizelge 4.5: Antrenmanlar ve yorgunlukla maksimum kasılma kuvveti değişimi	78
Çizelge 4.6: Antrenmanlarla ve yorgunluk testleri ile değişen normalize MVC değerleri.....	82
Çizelge 4.7: Antrenmandan önce-sonra yorgunluk testinde yüklemeler arasında yapılan MVC ortalamaları.....	85
Çizelge 4.8: Elektrik uyarısının kasta oluşturduğu istemsiz kuvvet değerleri	87
Çizelge 4.9: Vastus lateralis ortalama frekansı değişimi	90
Çizelge 4.10: Vastus medialis kasının ortalama frekans değişimi	93
Çizelge 4.11 : Rektus femoris ortalama frekans değişimi	96
Çizelge 4.12: Vastus lateralis kasına ait IEMG değerleri.....	99
Çizelge 4.13: Vastus medialis kasına ait IEMG değerleri	102
Çizelge 4.14 : Rektus kasına ait IEMG değerleri	105
Çizelge 4.15: Vastus lateralis kasına ait RMS değerleri	108
Çizelge 4.16: Vastus medialis kasına ait RMS değerleri	111
Çizelge 4.17: Rektus femoris kasına ait RMS değerleri	114

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SSS: Santral Sinir Sistemi

PFS: Periferal Sinir Sistemi

DHP: Dihidropridin

RYN: Riyanodin

SR: Sarkoplazmik Retikulum

Ca⁺⁺: Kalsiyum

CPr(PCr): Kreatin Fosfat(Fosfokreatin)

LA: Laktik asit

EMG: Elektromyografi

K⁺: Potasyum

Na⁺: Sodyum

ADP: Adenozin Trifosfat

AMP: Adenozin monofosfat

BCCA: Dallı zincirli aminoasitler

IMP: Inositol monofosfat

CK: Kreatin Kinaz

LDH: Laktat Dehidrogenaz

MVC: Maksimum istemli kasılma

ÖZET

Anaerobik Antrenmanların Santral-Periferik Yorgunluk ve Toparlanma Süreçlerine Etkileri

Yorgunluk “beklenen kuvvet veya güç çıktısının azalmasıdır”. Yorgunluk üst merkezler başta olmak üzere, kasa motor bilginin ulaşmasında, sinir- kas kavşağında ve kasın kendisinde gelişebilir. Sprint antrenmanları anaerobik performansı geliştirmesinin yanında yorgunluğa karşı dayanıklılığı da geliştirebilmektedir. Bu çalışmada sprint antrenmanlarının akut yorgunluk sürecine olası etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmaya Çukurova Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulunda okuyan yaş ortalaması 23 ± 3 , boy ortalaması 176 ± 4 cm, vücut ağırlıkları 70 ± 6 kg ve maksimum Oksijen tüketimleri $60,1\pm5,8$ ml/kg/dk olan rekreatif olarak aktif 16 gönüllü erkek öğrenci katılmıştır.

Sprint antrenmanları haftada 3 gün olmak üzere 5 hafta sürmüştür. Antrenmanlarda 30 metrelik parkur her hafta yüklenme şiddeti artacak şekilde koşturularak, son hafta 10 sprinti maksimal derecede yapmaları sağlanmıştır. Sprintler arasında 30 sn dinlenme verilmiştir.

Bu çalışmada antrenmanlara başlamadan önce ve sonra sporcuların maksimal 30 metre sprint dereceleri, maksimal izometrik diz ekstensiyon kuvvetleri, maksimal izometrik kasılmaya ait EMG ölçümü ve kasa dışarıdan verilen elektrik uyarısının etkileri yorgunluk testinden önce-sonra tekrarlanmıştır. Yorgunluk protokolü olarak 80 rpm’de 3 dakikalık yükleme paketlerini içeren bisiklet testi seçilmiştir. 60 W/dk yükleme ile başlanmış ve her 1 dakikada yük 10 W artırılmıştır. Yorgunluk protokolü sırasında laktat üretimleri ve yüklemelerden önce-sonra kan K^+ , Na^+ , P_i , CK ve LDH ölçülmüştür.

Yorgunluk testinden sonra sporcuların maksimal istemli kas kuvvetlerinin düştüğü, laktat üretim oranlarının arttığı, serum K^+ , Na^+ , P_i , CK ve LDH düzeylerinin yükseldiği görülmüştür. Kas kuvvetinin azalması ile EMG değerlendirmesinde ortalama frekans değerlerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Yorgunluktan önce kasa istemli kasılma olmaksızın verilen elektrik uyarısının ürettiği kuvvet değerlerinin yorgunluktan sonra önemli oranda düştüğü görülmüştür. İstemli kasılma sırasında verilen elektrik uyarısı yorgunluk

öncesinde ve sonrasında kuvvet artışına yol açmamıştır. EMG kayıtlarında rektus kasının etkin olduğu gözlenmiştir.

Antrenmanlardan sonra maksimal kas kuvvetinin arttığı, VO_{2max} 'ın arttığı, teste dayanıklılık sürelerinin uzadığı, sprint performansının geliştiği görülmüştür. Denekler antrenmandan sonra yorgunluk testinde daha fazla laktat üretmişlerdir. Dinlenim ve yorgunluk kan değerleri, elektrik uyarısına verilen yanıtlar, EMG yanıtları antrenmanlardan etkilenmemiştir.

Sonuç olarak sprint antrenmanlarının hem aerobik ve hem de anaerobik adaptasyonlar oluşturduğu görülmüştür. Kasa yorgunlukta dışarıdan verilen elektriksel uyarıya kasın yanıtsız kalması kasın hayatiyetinin korunmasında periferik sistemin önemini göstermektedir. Maksimal kasılma sırasında elektrik uyarısının kuvvet artışına neden olmaması sporcuların kaslarını tama yakın oranda aktive edebildiklerini düşündürmüştür.

Anahtar Kelimeler: santral yorgunluk, periferal yorgunluk, elektrik uyarısı, EMG, sprint antrenmanı

ABSTRACT

The Effects Of Anaerobic Training On Central-Peripheral Fatigue And Recovery Periods

Fatigue can be defined as “ the decrease to maintain the expected force or power”. Fatigue may occur at firstly supraspinal levels, neuromuscular junction and muscle itself. Sprint trainings can improve anaerobic and aerobic performance. In this study it was aimed to evaluate the effect of sprint training on acute fatigue. 16 male subjects (mean age 23 ± 3 , height 176 ± 4 cm, body mass 70 ± 6 kg and VO_{2max} $60,1\pm5,8$ ml/kg/min) volunteered for the study.

The sprint exercise comprised of 30 m running and continued 5 weeks (3 day per week) and 30 sec recovery was applied between sprints. Subjects achieved ten maximal sprint at the last week.

Before and after training, 30 m maximal sprint performance, maximal knee isometric voluntary contraction strength, EMG measure while maximal contraction and electrostimulation on muscle were measured before and after fatigue test. Fatigue test was applied on bicycle as 80 rpm and 3 min load. 3 min recovery were done inter 3 min load. Fatigue test was started 60 W/min and 10 W loaded every minute. After exhaustion lactate, K^+ , Na^+ , P_i , CK and LDH levels were measured.

After fatigue test maximal voluntary contraction (MVC) decreased, serum K^+ , Na^+ , P_i , CK and LDH levels increased. While maximal strength decreasing mean firing frequencies of quadriceps decreased. The strength of electric stimulation decreased after fatigue test. The electric stimulation during MVC did not lead to the increase in the muscle force before and after fatigue. EMG measurements showed that rectus femoris is the most effective muscle in this isometric contraction.

It was measured the increasing in MVC, VO_{2max} , exhaustion time and improve sprint performance. The subjects produced more lactate after sprint training. Resting and fatigue blood marker, responses to electric stimulation and EMG were not affected by training.

In summary it is suggested that sprint training resulted in aerobic and anaerobic adaptations. Any force increase by electric stimulation while MVC, suggested that the importance of peripheral factors in fatigue and that all subjects could activate all muscle fiber near fully.

Key Words: Central Fatigue, Peripheral Fatigue, Electrostimulation, EMG, Sprint Training

1. GİRİŞ

Maksimal bir aktivite sırasında yorgunluk gelişimi sporcunun performansının düşmesine yol açar. Literatürde yorgunluk kas kuvveti ve-veya kasılma hızının düşmesi sonucu performansın azalması olarak tanımlanmaktadır^{4,16,23,24,25,26}. Birçok deneysel araştırma ile yorgunluğun kaynağı yanında etkilediği organ ve sistemler sorgulanmıştır. Yorgunluğun kaynağına odaklanan çalışmalarda kas performansını kısıtlayan süreç incelenmektedir. Bu araştırmalarda yorgunluğun hem santral^{11,12,26} ve hem de periferik^{31,32,33} bileşenlerinin olabileceği gösterilmiştir.

Yorgunluk sürecinde santral sinir sisteminden kasa ulaşan motor uyarılar başta olmak üzere birçok aşamada, dinlenim durumuna göre bazı değişiklikler meydana gelir. Kas iskelet sistemi için bir stres oluşturan yüklenmeler vücudun bütünü düşünüldüğünde bazı organ ve sistemlerin aktivitelerini artırmasına yol açacaktır. Oluşan son ürünlerin kastan uzaklaştırılması, kasa ihtiyacı olan enerji kaynaklarının sağlanması ve bütün bunlar olurken de kasın performansının en üst düzeyde tutulması organ sistemlerinin etkin çalışmasını gerektirmektedir. Nitekim kuvvetin artması için kasa gelen motor yolakta uyarı frekansının arttığı bilinmektedir. Yorgunlukta üst merkezler, kastan gelen duysal bilgileri işleyerek performansı kısıtlayabilirken^{25,26}, kasın kendisinde ortaya çıkan değişiklikler de yorgunlukta etken olmaktadır^{31,32,33}. Bu bağlamda bazı araştırmalarda yorulan kasa dışarıdan uygun elektriksel uyarılar verildiğinde de kontraktıl elemanların oluşturduğu kuvvet yanıtının azalabileceği belirtilmektedir.

Yorgunluk sonucu kasın maksimal performansının azalması aslında kasın hayatiyetini sürdüren bir savunma sistemi olarak yorumlanabilir. Yorgunluğun başlangıç zamanı ve vücudun yorgunluğa verdiği yanıt tükenme zamanı açısından önemlidir. Sportif formu artırmak ve korumak için yapılan antrenmanların ana amacı yorgunluğa karşı dayanıklılığı geliştirmektir. Yüklenmelerde iskelet-kas sisteminin bütünlüğüne zarar vermeden performansı artırmak amaçlanır. Bu süreç antrenmanlarda uygun yüklenme ve dinlenme aralıklarının gözetilmesi ile mümkündür.

Son araştırmalarda kısa süreli maksimal yüklenmelerin daha uzun süreli ve yorucu yüklenmelere benzer adaptasyonlar sağladığı, kas kuvveti ve VO_{2max} gelişiminde benzer sonuçlar ortaya çıkardığı kaydedilmektedir^{88,89,96,124}. Sunulan çalışmada kısa süreli maksimal sprint antrenmanlarının akut yorgunluk üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede yorgunluğun santral ve periferik kaynakları, sportif formu ve antrenman süreçlerini nasıl etkilendiği irdelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Hareketin Motor Kontrolü

İnsan vücudu hareketlerin uygun hızda, uygun sıra ile arka arkaya gelmesi, hareketler sırasında vücut dengesinin korunması gibi birçok işlevi tek başına yerine getirmek üzere programlanmıştır. Bir basketbol maçı sırasında sporcunun top sürerken, hem koşu hızını ayarlaması, hem pas vereceği takım arkadaşlarının durumunu takip etmesi oldukça karmaşık işlemler olup, sporcu farkında olmadan temelde birçok etkileşimi içermektedir. İstemli kas hareketleri de dahil olmak üzere vücuttaki bütün işlemler **sinir sistemi** tarafından kontrol edilip yönetilmektedir¹.

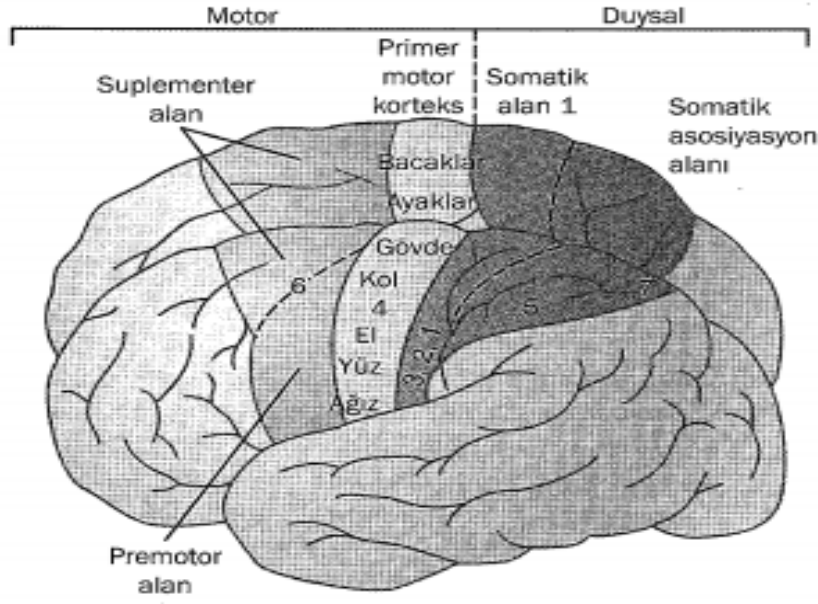
İnsan sinir sistemi temelde **santral sinir sistemi (SSS)** ve **periferal sinir sistemi (PNS)** olmak üzere iki temel kısımda incelenmektedir. SSS omurilik düzeyi, alt beyin (subkortikal) düzey ve üst beyin(kortikal) düzeyinden oluşmaktadır. Omurilik temelde deri, eklemler ve kas gibi PSS'den gelen bilgileri üst merkezlere iletmektedir¹.

Subkortikal düzeyde (yani medulla, pons, mezensefalon, hipotalamus, talamus, serebellum ve bazal gangliyonlar) bilinç dışı gerçekleşen aktivitelerin birçoğu kontrol edilir. Örneğin medulla, pons ve mezensefalonda denge kontrol edilir^{1,2}.

Üst beyin olarak da bilinen kortikal düzey ise aslında hiçbir zaman tek başına çalışmaz. Yukarıda geçen subkortikal düzeylerdeki işlevler korteks kontrolü olmadan tam ve doğru olarak gerçekleştirilemez. Korteks bütün işlevlerin amaca uygun, tam ve doğru olarak uygulanmasını sağlar. Kortekste uygun yanıtın sağlanması vücuttan üst merkezlere iletilen duysal bilginin bütünleştirilmesi sayesinde sağlanır¹.

2.1.1. Korteks Ve Beyin Sapının Motor İşlevdeki Önemi

İstemli hareketler kortekste daha alt beyin alanları olan omurilik, beyin sapı, bazal gangliyonlar ve serebellumda bulunan işlev kalıplarının kortikal aktivasyonu ile başlatılır. Motor korteks; primer motor korteks, premotor alan ve suplementer motor alan olmak üzere üç alt gruba ayrılır^{1,3}.



Şekil 2.1: Motor korteksin temel yapısı.

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi primer motor korteks santral sulkusun önünde frontal lobun ilk kıvrımında yer almaktadır. Primer motor korteksin yarısından fazlası el ve konuşma kaslarını temsil etmektedir. Tek bir motor korteks nöronunun uyarılması özel bir hareketin uyarılmasına yol açar¹.

Premotor alan ise primer korteksin hemen önünde yer almaktadır. Premotor alanın ön kısmı yapılacak hareketin motor şablonunu oluşturur ve arka premotor alan ise düşünüleni gerçekleştirmek üzere kas aktivitesinin aşamalarını uyarır. Burada primer motor korteksteği gibi hareket kalıbından ziyade daha kompleks hareket kalıpları söz konusudur. Premotor alanın arka kısmı sinyalleri ya doğrudan primer motor kortekse veya çoğunlukla bazal gangliyonlar ve talamus aracılığı ile primer motor kortekse göndererek, kas aktivitesi sağlayan kompleks sistemin önemli bir parçası niteliğini gösterir^{1,3}.

Suplementer motor alan ise premotor alanın hemen üzerinde yerleşmiştir. Bu alanın uyarılması ile çift taraflı kasılmalar elde edilir. Örneğin bu bölgenin uyarılması her iki elde de aynı harekete neden olur. Bu alan premotor alan ile uyumlu çalışarak vücudun duruş, farklı bölgeleri sabitleme, gözlerin ve başın pozisyona bağlı hareketleri, ellerin ve kolların hassas motor kontrolünü sağlamaktadır^{1,3}.

Hareketin istenen amaca yönelik ve istenen sırada gerçekleşmesi için serebellum-motor korteks, serebellum-bazal gangliyonlar, motor korteks-bazal gangliyonlar, serebellum-vestibuler sistem, bazal gangliyonlar- ekstrapiramidal sistem ve hepsiyle – retikler sistem arasında çok hızlı bir etkileşim sağlanarak, alt motor nöronlar devreye girmektedir^{1,2,3}.

Motor korteksin istemli hareket emrini verebilmesi, premotor kortekste çeşitli duyu modaliteleri ve güdüsel öğelerle oluşan komutun algılanması, basal gangliyonların durumunun saptanması ve önceden somatosensitif kortekse işlenmiş olan duyu modalitelerinin gereklilik göstermesi ile gerçekleşmektedir³.

2.1.2. Motor İşlevlerde Serebellum ve Bazal Gangliyonların Rolü

Serebellum ve bazal gangliyonlar tek başlarına kas aktivitesini düzenlemede etkili olmadıkları halde diğer merkezlerle ilişki kurarak hareketin düzenlenmesine katkıda bulunurlar. Serebellum hareketler arasında düzgün geçişte, motor aktivitelerin zamanlamasında, agonist- antagonist kas grupları arasında sağlıklı etkileşimin oluşmasında ve kas kasılmasının şiddetinin ayarlanmasında rol alır. Serebellum hareketin istenen noktada durdurulması için antagonist kasları tam zamanında ve uygun bir güçle uyarır. Serebellum olmadan amaca uygun hızlı hareketlerin yapılması kortikospinal sistem için zordur. Serebellum özellikle gerim refleksini artırmak için omurilikle birlikte görev yapar¹.

Bazal gangliyonlar nukleus kaudatus, putamen, globus pallidus, substantia nigra ve subtalamik çekirdeklerden oluşmuştur. Bazal gangliyonlar kortikospinal yolla birlikte motor hareketin kompleks modellerini kontrol eder, hareketlerin ardarda gelmesini sağlayarak karmaşık kas hareketlerinin planlanmasına yardımcı olurlar. Ayrıca hareketin hızında da bazal gangliyonların etkisi vardır. Bazal gangliyonlar hareketlerin bilinçaltı fakat öğrenilmiş modellerini uygulamada kortekse yardım ederler^{1,3}.

2.1.3. Motor İşlevlerde Beyin Sapının Rolü

Beyin sapındaki retiküler ve vestibüler çekirdekler vücudun istemli hareketlerinde ve dengede önemlidir. Vestibüler çekirdek antigravite kaslarının kontrolünde de etkilidir. Omurilik, pons ve mezensefalondan meydana gelen beyin sapı solunumun kontrolü, kalp

ve dolaşım sistemi, gastrointestinal sistemin kısmi kontrolü, denge kontrolü ve göz hareketlerinde düzenleyicidir¹.

2.1.4. Motor İşlevlerde Omuriliğin Rolü

Omurilik deriden, eklemlerden ve kas gibi PSS'den gelen bilgileri üst merkezlere iletmesinin yanısıra içerdii nörön devreleri yürümeye, yerçekime karşı bacakların tonusunu sağlayan reflekslere, vücudun ağrı uyarısından uzaklaşmasını sağlayan reflekslere ve diğör iç organların işlevlerini sağlayan reflekslere neden olmaktadır. Omuriliğin çıkan motor sistemi periferel durumlar hakkında beyine bilgi taşıırken; inen motor sistemi ise piramidal ve ekstrapiramidal yolu içermektedir¹.

2.1.4.1. Motor Sinyallerin Korteksten Kaslara Taşınması

Motor sinyaller korteksten omuriliğe ya doğrudan **kortikospinal yolla**, veya dolaylı olarak bazal gangliyonlar, beyincik ve beyin sapı çekirdeklerinin rol aldığı yol **ekstrapiramidal yolla** taşınır^{1,2}. Doğrudan yollar genelde kol ve bacakların uç kısımlarının özellikle de el parmaklarının hareketleri ile ilgilidir. Kortikospinal yol **pramidal yol** olarak da bilinmektedir . Kortikospinal yol korteksten çıktıktan sonra putamen ve nükleus kaudatus çekirdekleri arasından geçerek aşağıda medulla piramitlerini oluşturur. Bu yolu oluşturan liflerin çoğu karşı tarafa geçerek aşağı iner ve omurilik gri maddesinde sonlanır. Liflerin çok az bir kısmı da omurilikte karşı tarafa geçmez omuriliğin ventral kortikospinal yolu ile aşağı iner. Ve daha aşağıda boyun veya toraks bölgesinde karşı tarafa geçer.

Piramidal yolda motor kortekste ki dev piramidal hücrelerden kaynaklanan kalın miyelinli lifler yer alır. Bu hücreler beyinden omuriliğe sinyalin çok hızlı iletilmesini sağlar. Önce dikkat edilerek öğrenilmiş ve daha sonra otomatik yapılan sportif hareketlerde korteks sadece gerekli olduğu zaman bu hareketleri kontrol edip değiştirmektedir^{2,3}.

Motor kortekte yer alan hücreler dikey kolonlar şeklinde organize olmuştur. Her hücre sütunu tek bir kası veya çoğunlukla sinerjist kas grubunu uyarır. Her kolondaki nöronlar bu kolonun çıkış yanıtının takip edilmesi için çeşitli giriş kaynakları bilgilerini kullanarak çalışır. Kas kasılmasını sağlamak için genelde 50-100 piramidal hücrenin

eşzamanlı olarak uyarılması gerekmektedir. Kas kasılmasının başlaması ve devam etmesi için hücre sütunundaki dinamik motor nöronlar önce uyarılır ve hızlı bir güç yanıtı ortaya çıkar. Daha sonra statik nöronlar çok daha yavaş ve sürekli deşarjlar yaparak kasılmanın devam etmesini sağlarlar³.

2.1.5. Motor İşlevler İçin Duysal Bilgiyi İçeren Periferik Sinir Sisteminin Önemi

PSS vücut ile SSS arasında aracılık etmektedir. PSS bu işlevini duysal nöronlar (birincil affarentler), somatik motor nöronlar ve otonomik motor nöronlar ile yerine getirir².

Birincil affarent nöronlar çevredeki enerji değişimlerine duyarlanmış olan **duysal nöronlara** bağlıdır. Bu duysal almaçlar organizmaya iç ve dış çevresi hakkında bilgi sağlarken, birincil affarent nöronlar çoğunlukla bu bilgiyi SSS' ne iletirler. Duysal reseptörler özel (görme, işitme vb), yüzeyel (dokunma, sıcak, soğuk vb), derin (hareket, derin basınç vb) ve visseral (açlık, bulantı vb) olarak sınıflandırılmaktadır².

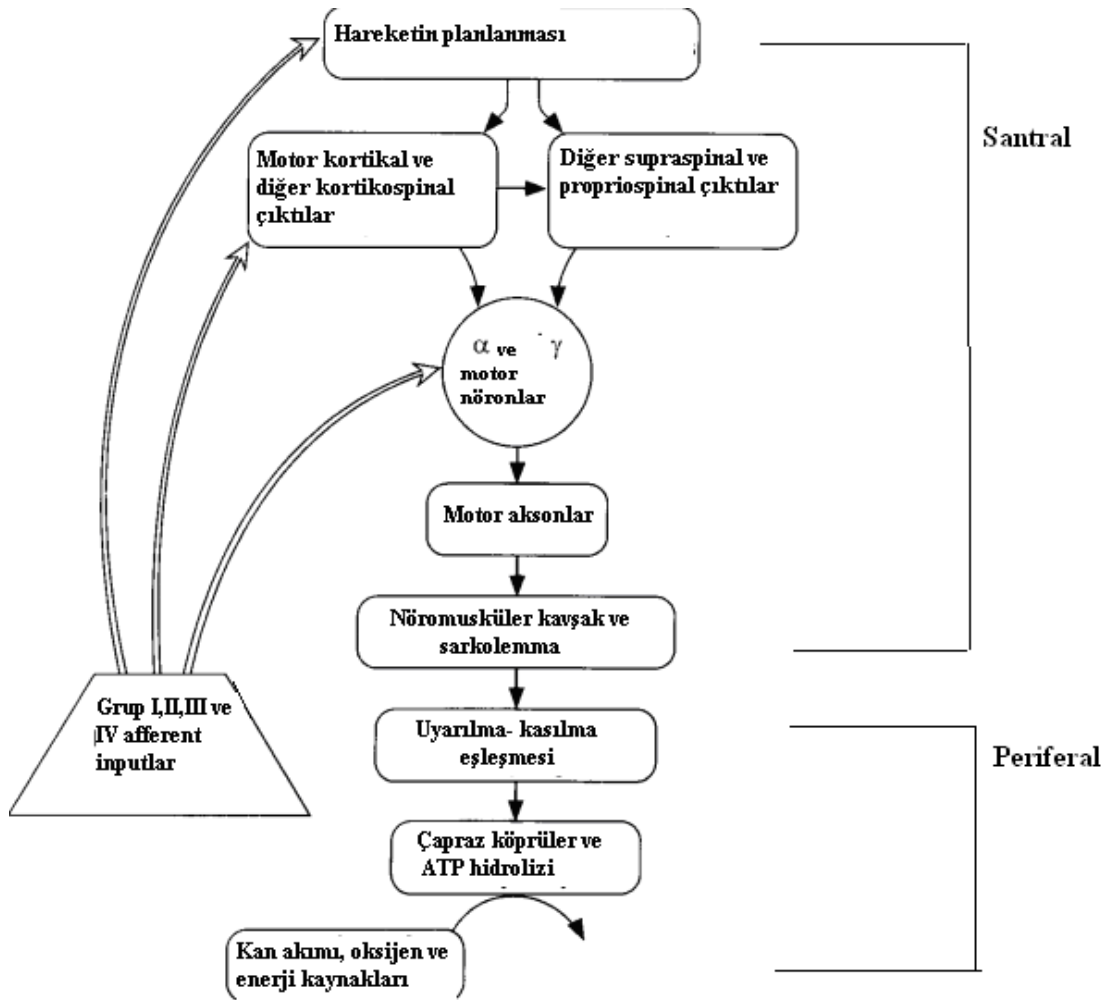
Duysal reseptörlerin belirgin özelliklerinden birisi **uyum sağlamalarıdır**. Uyarının çeşidine ve şiddetine göre yavaş ya da hızlı uyum sağlanmaktadır. SSS'deki duysal nöronlar her biri farklı algılayıcı alana sahip olan çok sayıda duysal reseptörlerden bilgi almaktadır. İskelet kasındaki **grup I affarent** lifleri miyelinli olup ileti hızları yüksektir. Kas içiği ve golgi tendon organına yerleşmiş olan grup I affarentler kas boyundaki değişime ve gerime duyarlıdır. **Grup II affarentler** birçok deri dokunma reseptörü ve kas içciklerinin ikinci sonlanmasından kaynaklanırken, **grup III affarentler** kasta yerleşmiş olup sıcaklık, kaba dokunma duyuları ve batıcı ağırları iletirler. **Grup IV affarentler** ise kas ve ciltteki ağrı, kaşınma, kaba dokunma hislerini algılayan reseptörlerden bilgi alarak iletirler².

Somatik motor nöronlar PSS'nin efferent görevini yerine getirmek üzere iskelet kasında bulunurlar ve kas kasılmasını sağlarlar. Bu nöronların hücre gövdeleri beyin sapı veya omurilikte yerleşmiştir. Bu nöronlardan büyük ve miyelinli olanları SSS'den ayrıldıktan sonra sinaps yapmadan direkt olarak kasa ulaşır ve sinir-kas kavşağında asetilkolin salgırlar. Somatik nöronlardaki aktivite iskelet kasının kasılmasına neden

olduğu için bu nöronlara motor nöron denmektedir. İskelet kasını inhibe eden motor nöron olmayıp, kas gevşemesi omurilikteki motor nöronların inhibisyonu ile gerçekleşmektedir³.

2.2. İskelet Kası Aktivitesinin Kontrolü

Kaslara üst merkezlerden gelen sinir uyarıları nöronlar arasındaki sinapslar sayesinde kasa kadar ulaşabilirler. Sinir sistemindeki sinapslar **kimyasal sinapslar** olup uyarı sinire ulaştığında sinaps bölgesinden **nörotransmitter madde** salgılanarak uyarının diğer sinire geçmesini sağlar.



Şekil 2.2: İstemli kasılma sırasındaki basamaklar⁴.

İskelet kasını innerve eden motor sinirler **asetilkolin** transmitterini salgırlar. Aksiyon potansiyeli bir sinir hücresinden diğerine geçerken duraklatılabilir, tekrarlayan impulslara dönüştürülebilir veya başka nöronlardan gelen bilgilerle entegre edilebilir^{1,2}. Kas kasılması sırasındaki basamaklar şekil 2.2’de görölmektedir.

2.2.1. Motor Ünitelerin Yapı Ve Özellikleri

Motor ünite, bir motor nöron ve onun aksonlarının ulaştığı bütün kas liflerin toplamından oluşan yapıdır. Aynı kas grubu için bireyler arasında farklı sayıda motor ünite olabildiği gibi, aynı bireyin farklı kas gruplarında farklı sayıda motor ünite bulunmaktadır. Medial gastroknemius kasında her bir üniteye ortalama 2000 kas lifi bulunurken, external rectusta ortalama sadece 9 kas lifi bulunması konuyla ilgili örnek olarak kabul edilebilir⁵.

Motor üniteler arasında kas lifinin metabolik, biyokimyasal ve fizyolojik özellikleri açısından farklılıklar bulunmaktadır. Bazı kas lifleri diğerlerine göre daha yavaş kasılırlar ve kırmızı renktedirler. Kırmızı renk, kasa oksijen ulaşmasını sağlayan myoglobin sebebiyledir. Bu fibriller aynı zamanda zengin kapillarizasyon içerirler. Mitokondrileri çok olmakla birlikte zengin oksidatif enzimler olan malat ve succinate dehidrogenaz içerirler. Bazı kaslar ise miyozin ATPaz ve fosforilaz gibi glikolitik enzimleri yüksek miktarda içerirler. Görünümleri beyazdır ve daha hızlı kasılırlar^{5,1,25,28}.

Memeli kasında tek motor üniteden sarsı ve tetanik kuvvet kaydedilebilmektedir. Bu ölçümlerde bazı liflerde kasılma süresi kısa iken bazılarında daha uzun bulunmaktadır. Yavaş kasılan liflerde kasılma süresi daha uzun bulunmaktadır. İnsan kasında bazı kas liflerinde kasılma süresi 20 ms gibi kısa sürerken, bazılarında 140 ms sürmektedir. Kasılma nitelikleri ve yapıları açısından motor üniteler yaygın olarak üç sınıfta incelenmektedir:

Yavaş oksidatif; yorgunluğa dayanıklıdır, kas lifleri yüksek mitokondri içerir, düşük glikojen içeriği, zengin kapillarizasyon gösterir, uzun süreli aktivitelerde dayanıklıdır. Yağları enerji kaynağı olarak kullanabilirler.

Hızlı glikolitik; düşük mitokondri içerikli, düşük kapillarizasyona sahip, zengin glikojen kaynaklı, anaerobik metabolizmanın kullanıldığı kısa kasılmalarda aktiftir.

Hızlı oksidatif- glikolitik; hızlı sarsı, yorgunluğa dayanıklı, yüksek glikojen içerikli, yüksek mitokondri enzim içerikli, hem aerobik ve hem de anaerobik olarak çalışabilen, uzun süreli eforlara dayanıklı motor ünitelerdir^{5,25}.

2.2.2.Motor Ünite Aktivasyonu

Herhangi bir kasılma sırasında bütün motor birimler göreve çağrılmazlar. Bunun nedeni motor ünitelerin devreye girmeleri (recruitment) için farklı eşiklere sahip olmasıdır. Bazı motor birimler zayıf eforlarda aktive olurken bazıları sadece güçlü eforlarda aktive olurlar. Ayrıca her ünite kendi ateşleme frekansını düzenleme yeteneğine sahiptir. En düşük frekanslı motor üniteler 8-12 Hz aralığında ve sadece zayıf eforlarda aktive olurlar^{1,28}.

Motor yolakta kas aktivitesini sağlayacak uyarının frekansı kasın aktivasyonunda önemli rol oynar. Frekans uyarının birim zamanda tekrarlama sıklığı olarak tanımlanmaktadır. Yaygın olarak saniyede tekrar sayısı (Hz) esas alınmaktadır. Uyarı frekansı kasılma şiddeti ile yakından ilgili olup en yüksek ateşleme frekansı maksimal kasılmalar sırasında kaydedilmektedir. Araştırmacılar arasında maksimal ateşleme frekansı değerleri arasında deney düzenekleri farklılığı nedeni ile farklı görüşler mevcuttur. Aktivasyonun ilk birkaç saniyesinde motor ünite ateşleme frekansı kasa ve bireye bağlı olarak düşer. Kasılma devam ettiğinde mekanik yorgunluk görülür ve ateşleme oranı daha da düşer ancak yorgun kas daha yavaş gevşediği için ateşleme oranı halen yüksektir. Yorgun kasta motor nöronların deşarj oranlarının azalmasında kastan kalkan inhibitör bir refleksin sorumlu olduğu belirtilmektedir^{5,25}.

Kuvvetin artması, uyarı frekansının artması ve ekstra motor ünitelerin aktive edilmesi ile sağlanır. Frekansın artması kuvveti 10 kat artırabilirken, ilave motor birimlerin göreve katılması kuvveti 100 kata kadar artırabilmektedir. Kaslar arasında ilave motor birimlerin göreve çağırılması farklılık göstermektedir. Bazı araştırmacılar küçük kaslarda kuvvetin artırılması için ateşleme oranının arttığını, büyük kaslarda ise ilave motor ünitelerin göreve çağırıldığını belirtmektedirler. Bir grup araştırmacı ise yeni motor birimlerin göreve katılmasının önceden aktif olan motor ünitelerin ateşleme oranları düştüğünde gerçekleştiğini belirtmişlerdir^{5,25}.

2.2.2.1. Büyüklük Prensibi

Spinal kortta tek bir kas lifini uyaran motor nöron grubuna “motor ünite havuzu” denir^{5,6}. Motor birimin niteliği hem motor nöronun ve hem de onun innerve ettiği kas lifinin özelliklerine bağlıdır^{5,7,28}. Bir motor nöron yapısına, uyarılabilirliğine ve uyarıyı iletme özelliklerine göre kategorize edilirken^{7,8,9,42}; bir kas lifi de kasılma hızı, kuvvet üretme kapasitesi ve yorgunluğa direncine göre sınıflandırılır^{1,2}. Motor nöronlarda en belirleyici özellik motor nöronun büyüklüğüdür. Yavaş kasılan yorgunluğa dirençli motor üniteler hızlı kasılan ve çabuk yorulan motor ünitelerden önce aktive olurlar. Motor ünitelerin aktive olmasındaki bu büyüklük prensibi izometrik ve dinamik kasılmalarda aynıdır⁵.

Tamamen gevşemiş bir kasta motor üniteler aktif değildir ve kas elektriksel olarak sessizdir ancak miyofibrillerin elastik özelliğinden dolayı kasın bir miktar tonusu vardır. Bir motor ünitenin aktive olması ile elde edilen gerimin büyüklüğü bu ünitekteki kas fibrillerinin sayısına bağlıdır. Düşük şiddetteki kuvvete ihtiyaç olduğunda daha az kas lifini uyaran düşük eşikli motor üniteler aktive olurlar. Daha fazla kuvvete ihtiyaç olduğunda yüksek eşikli motor üniteler göreve katılmaya başlarlar. Bu motor üniteler daha fazla kas lifini içerirler^{10,11,22,28}.

Yavaş twitch fibriller 5 Hz’den 20- 30 Hz’e kadar olan frekanslarda aktive olurken; hızlı twitch fibriller 30 dan 60-65 Hz’e kadar olan frekanslarda aktive olurlar. Bazı durumlarda yüksek frekanslı deşarjlar (80- 120 Hz) oldukça kısa süreler için (yaklaşık 100 msn) gerçekleşir⁵.

2.3. İskelet Kas Yapısı ve Kasılma Mekanizması

Yorgunlukta kasın ürettiği kuvvet ve gücün baskılanması nedeni ile kas performansı önemli oranda azalır. Yorgunluk sürecinde iskelet kasında meydana gelen bazı değişiklikler kas performansının azalmasından sorumlu tutulmaktadır. Bu bağlamda etkin sportif performans için sağlıklı bir iskelet kas yapısı gereklidir¹³.

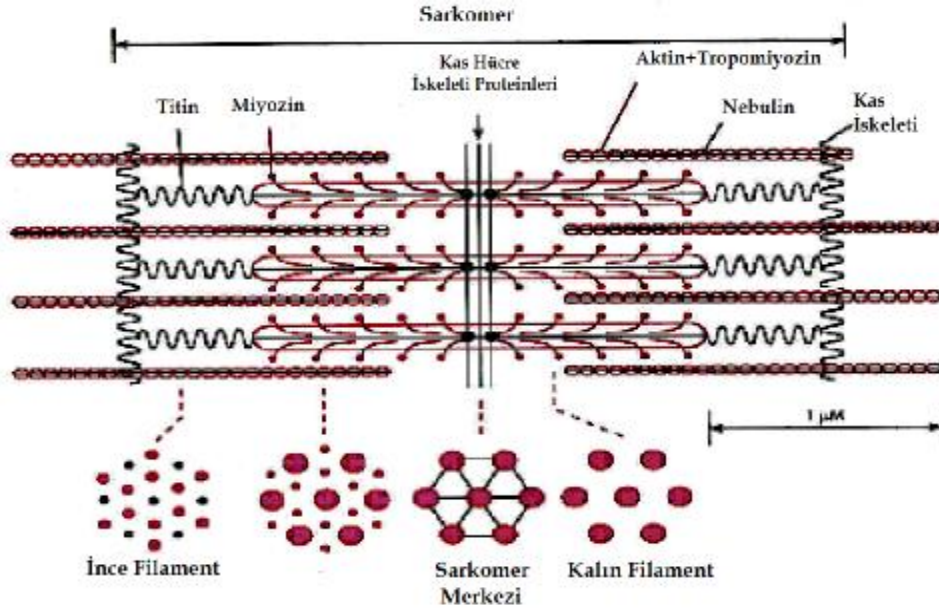
Hareketin temelinde yer alan iskelet kasının yapısına bakıldığında çok sayıdaki kas lifinden meydana geldiği görülmektedir. Kas lifleri bir araya gelerek kas

fasiküllerini, fasiküller bir araya gelerek kası meydana getirirler. Komşu kas lifleri endomisyum tabakası ile birbirlerinden ayrılır. Kas lifi demetleri tarafından oluşturulan yapılar perimisyum denilen bir bağ dokusuyla çevrilerek fasikülleri oluşturur. Fasiküllerin bir araya gelmesiyle oluşan iskelet kası epimisyum denilen bağ dokusu kılıfı ile sarılarak kemiğe bağlanır^{51,13,16}.

Kas hücreleri sayısı birkaç yüz ile birkaç bin arasında değişen miyofibrillerden meydana gelmiştir. Bu yapı sarkolemma adı verilen bir membran ile çevrelenmiştir ve sarkolemma ile dış kısımda yer alan bazal membran arasında, yeni kas hücrelerinin oluşumunu sağlayan **satelit (uydu)** hücreler yerleşmiştir. Miyofibrillerin yapısında ise kas kasılmasından sorumlu miyozin ve aktin filamentleri bulunmaktadır¹⁴. Miyofibriller uzunlamasına olarak sarkomerlere ayrılır ve her sarkomer ortalama olarak 2 µm uzunluğuna sahiptir. Sarkomerler z çizgisi ile ayrılırlar ve z çizgisinin her iki yanında aktin proteinlerini içeren ve ince olduğu için de açık renkli görülen I bandı yer alır.(Şekil 2.3)

Sarkomerdeki iki I bandı arası bölgede A bandı yer alır ve miyozin proteininden oluşan kalın filamentleri içerir. Sarkomerin ortasında H bandı denen bölge yer alır. Burası A bandının miyozin kalın filamentini içerir ancak ince aktin filamentini içermez. İnce aktin filamentleri z çizgisinden H bandının kenarına kadar uzanır ve A bandındaki kalın filamentlerin bir bölümüne geçer. Bu bölge M çizgisi olarak isimlendirilmektedir. Burası sarkomerin tam ortasıdır ve kalın filametlerin bir hizada dizilişlerinin organizasyonunda önemli proteinleri içerir¹.

Miyozin filamentleri z çizgisine titin proteini ile bağlanırlar. Aktin üzerinde ise miyozine bağlanma bölgelerini içeren tropomiyozin proteini bulunur. Miyozin filamentleri ise bir çift büyük ağır zincir ve iki hafif zincirli proteinden oluşur. İki ağır zincir bir çift sarmal oluşturarak miyozin başı denilen globüler polipeptid yapıyı meydana getirir. Bu yapı temelde aktin molekülüne bağlanan miyozin bileşkesi olması açısından önemlidir. Tropomiyozin dimeri üzerinde troponin-T, troponin-I ve troponin-C olmak üzere üç alt üniteden oluşan troponin kompleksi bulunur. İskelet kasında kontraksiyonlar sırasında miyozin başı ile aktin arasında meydana gelen bu yapıya klasik fizyolojide **çapraz köprü** adı verilmektedir^{1,2}.



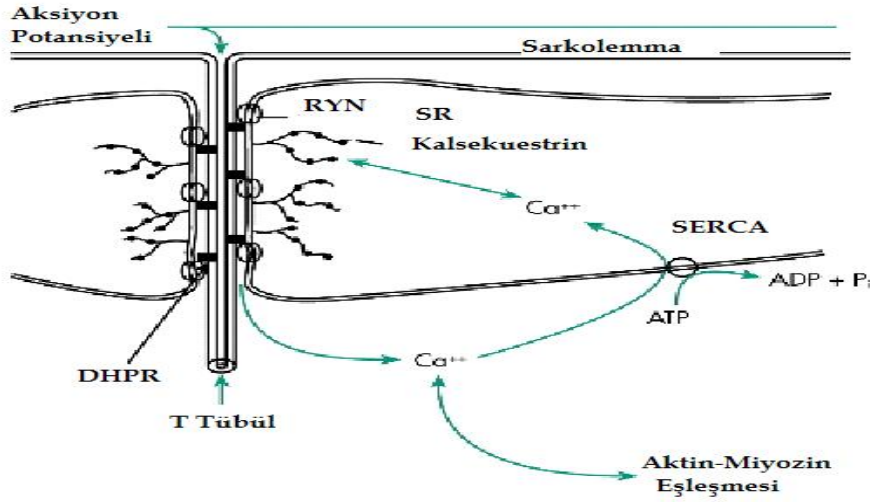
Şekil 2.3: Sarkomerde yer alan yapılar

2.3.1. Uyarılma-Kasılma İlişkisi ve Kas Kasılması

Kas hücresinde sarkolemma boyunca ilerleyen ve T tübüllerden aşağıya yayılan aksiyon potansiyeli hücre membranında potansiyel değişimine neden olarak dihidropiridin-riyanodin almaç grubunu (DHP-RYN) etkiler (Şekil 2.4). Bu olay SR'dan Ca^{+2} salınmasına neden olur. Hücre içi Ca^{+2} konsantrasyon artışı aktin-miyozin etkileşimine neden olur ve kas kasılmasını başlatır. Hücre içi Ca^{+2} tekrar SR'a, Ca^{+2} -ATPaz pompası vasıtasıyla depolandığında iskelet kası gevşer. Hücre içi kalsiyumun yüksek olması kasılma kuvvetinin de yüksek olmasını sağlamaktadır².

Dinlenim durumunda tropomiyozin molekülleri, aktin filamentlerinin aktif bölgelerini kapattığından aktin ile miyozin arasında kasılmaya neden olacak çekim engellenmektedir. AP yayılması ile SR'dan salgılanan Ca^{+2} , troponin-C'ye bağlanır. Troponin-C molekülleri Ca^{+2} ile birleştiğinde, troponin kompleksi biçim değişikliğine uğrar ve tropomiyozin molekülüne uyguladığı kuvvetle aktinin aktif bölgeleri açığa çıkar. Miyozin filamentinin ağır zincir yapısındaki çapraz köprü başları aktin filamentinin aktif bölgelerine bağlanır. Bu etkileşim miyozin başında yer alan miyozin ATPaz enzimini aktive ederek ATP'yi parçalar. Açığa çıkan enerji sayesinde miyozin

çapraz köprü başları, miyozin molekülünün geri kalan kısmı üzerinde bükülür. Aktin molekülün miyozin başından ayrılabilmesi için de ATP' ye ihtiyaç vardır^{15,42}.



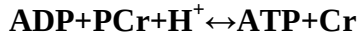
Şekil 2.4: Aksiyon potansiyelinin hücrede yayılması ile hücre içi Ca artışı ve sonra yeniden Ca-ATPaz (SERCA) tarafından SR a pompalanarak gevşeme olması².

2.3.2. Kas Kasılmasında Enerji Sistemleri

İskelet kasının performansının değerlendirilmesinde kasın kullandığı metabolik yolun büyük önemi vardır. Enerji kaynaklarının varlığı, ihtiyaca cevap verebilirliği, biriken son ürün varlığı ve bunların uzaklaştırılması performansı ve yorgunluk sürecini etkilemesi bakımından önemlidir.

ATP ve PCr kas için kısa süreli enerji kaynakları olup **fosfajen sistem** olarak adlandırılır. PCr, ATP' nin yeniden sentezini sağlar. Bu sistemin dezavantajı sınırlı bir kaynak olmasıdır. Eğer kasta ulaşılacak başka enerji kaynağı yoksa hızla yorgunluk gelişir. Yüksek şiddetli kasılmalarda PCr hızla azalır. 30 sn maksimal izometrik kasılma sırasında PCr yıkımı ilk 2 sn' de en yüksektir. 30 sn' lik kasılmanın son 10 saniyesinde bu oran oldukça düşüktür ve %2' ye kadar düşer. Bu da kuvvetin veya gücün azalması demektir¹⁶. Kas hücresinin sitoplazmasındaki PCr miktarı kas içi ATP derişiminin 3-4

katı kadardır. PCr hidrolizinden serbestlenen enerji ATP' nin hidrolizinden daha fazladır^{16,61}.



Yukarıdaki reaksiyon kreatin kinaz reaksiyonu olarak da isimlendirilmiştir çünkü burada **kreatin kinaz enzimi** rol alır. Bu reaksiyon çift yönlüdür ve toparlanma sırasında PCr yeniden sentezi için ters yönde çalışır.

Kas için kısa süreli kaynaklar olan ATP ve PCr depo kapasitesini aşan sürelerde aktiviteye devam edilmesi, enerji açısından zengin besin öğelerinin metabolizmaya katılmasını zorunlu kılar. Bu noktada anaerobik glikoliz ve sonrasında da oksidatif fosforilasyon enerji desteğini sağlayan metabolik yolaklardır. Hücre sitoplazmasında gerçekleşen anaerobik glikolizde glikojen, pirüvik asit ve laktik aside (LA) yıkılır ve açığa çıkan enerji ile ATP'nin yeniden sentezlenmesi sağlanır⁶¹. Glikolitik reaksiyonların gerçekleşebilmesi için oksijene gereksinim olmamasından dolayı, bu metabolik yolağa **anaerobik metabolizma** adı verilir. Glikolitik reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan son ürün olan LA ve biriken hidrojen iyonları hücre içi pH' sını asit tarafa kaydırarak, homeostatik denge koşullarının bozulmasına neden olur. Bu sebeple anaerobik yol uzun süreli bir yolak değildir. Ancak uzun süreli ve homeostaziyi bozmadan iş üretebilen **aerobik enerji yolu** ile mitokondirilerde oksijenin varlığı sayesinde daha uzun süre enerji elde edilebilmektedir. Aerobik metabolizmada glikojenin yanı sıra yağlar ve aminoasitler de enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır^{14,17,18}.

2.4. Yorgunluk

Yorgunluk kasılma kuvvetinin veya gücünün azalmasıdır^{19,20,21}. Spor disiplinleri tarafından bazı durumlarda yorgunluk farklı ifade edilebilmektedir. Mesela biyomekanikçiler kuvvet çıktısının azalması olarak tanımlarken, psikologlar tükenmişlik hissi olarak ve fizyologlar da fizyolojik sistemdeki baskılanma olarak ifade edebilmektedir¹⁹. Günlük hayatta yorgunluk terimi fiziksel veya mental performansın

azalması olarak kullanılmaktadır. Birçok sporcu tarafından yorgunluk “kasları zayıf, yavaş ve bazen de ağrılı hissetme” olarak tanımlanmaktadır²⁰. Yorgunlukta “ihtiyaç duyulan veya beklenen kuvvet devam ettirilemez”²¹. Kas yorgunluğu literatürde genel olarak “kasın maksimal kuvvet veya güç üretme kapasitesindeki azalma” olarak tanımlanmaktadır^{4,16,23,24,26}. Yorgunluk durumu tamamen tükenme durumu ile her zaman aynı değildir. Egzersiz her yorgunluk durumunda değil, tükenme durumunda sonlandırılır²², yani yorgunluk bir güven aralığıdır¹⁹.

Yorgunluğun hangi organda gerçekleştiği konusunda bir görüş birliği yoktur. Çünkü yorgunluk çok faktörlü bir süreçtir ve kişinin form durumuna ve yüklenmenin şiddetine göre algısı değişmektedir. İlk araştırmalar iyi motive olan bireylerde küçük kas gruplarını içeren kasılmalarda yorgunluğun tamamen periferik olduğunu belirtirken²³ daha sonraki araştırmalar santral aktivasyonda çok küçük bir baskılanmanın maksimal aktivasyonlarda çok sık görüldüğünü ve yorgunlukta bunun santral komponent olduğunu belirtmişlerdir²⁴. Kas yorgunluğu ile kas hasarı birbirine karıştırılmamalıdır. Kas yorgunluğu aktivite sırasındaki geri dönüşümlü azalmalardır ve toparlanma ilk birkaç saatte gerçekleşir. Kas hasarı geri dönüşümü uzun süren baskılanmalara neden olur. Kas hasarı sarkomerik hasarları, membran hasarlarını ve sitokin salınımını içeren inflamasyon süreçlerini içerir ve toparlanması günler sürer²⁵.

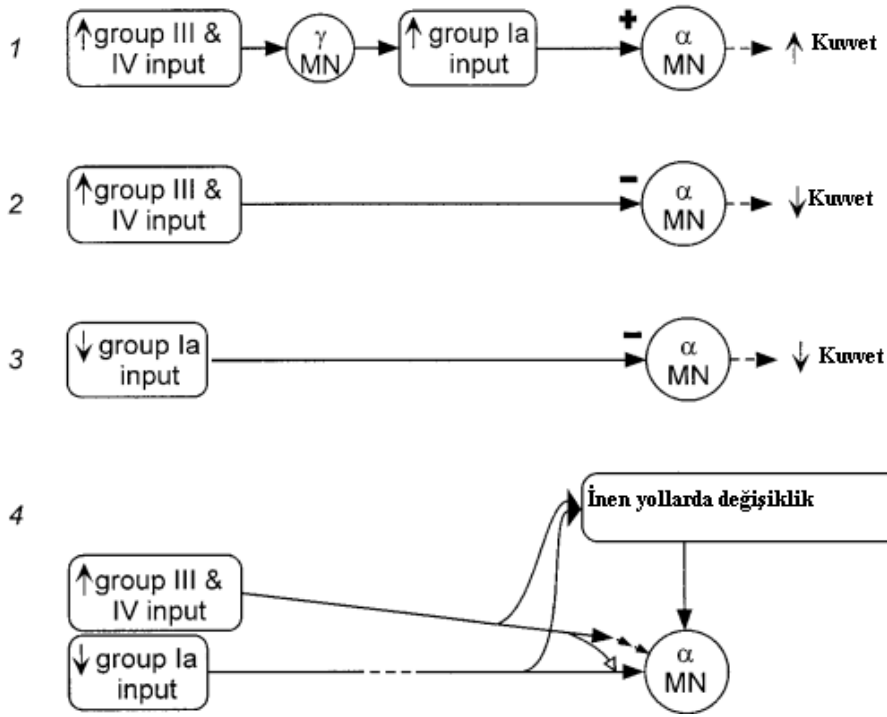
2.4.1. Santral Yorgunluk

Pek çok araştırma yorgunluğun kaynağının ne olduğunu sormaktadır. Çünkü bu soru yorgunluk kaynağının periferde (kasın kendisinde) mi yoksa santral düzeyde mi olması açısından önem taşımaktadır. Periferik yorgunluk nöromusküler kavşakta ve sonrasında veya bazı kaynaklarda sadece kasın kendisinde meydana gelen ve performansı düşüren bir süreç olarak tanımlanırken; santral yorgunluk ise bu kavşağın öncesinde oluşan süreçleri içerir⁵. Literatürde santral ve periferik yorgunluk ayırımı çok sık gidilmiş olsa da bunları birbirinden ayırmak oldukça zordur. Santral yorgunluk literatürde “aktif motor nöronların ateşleme frekanslarının azalması sonucu kuvvetin azalması” olarak ifade edilmektedir. Bu tanım motor nöronların bütün eksitator idaresinin azalmasını içerir⁵. Maksimal istemli kasılma sırasında kuvvetin azalması ile

görülen yorgunluk sürecinde aynı zamanda yüzeyel EMG ölçümünde de azalma kaydedilir. Bu bulgu kuvvet azalmasının yetersiz kas aktivasyonu neticesinde olduğunu göstermektedir. Bu aktivasyon azalmasının nedeni santral sinir sisteminde motor idarenin azalması veya periferdeki elektrik geçişinin azalmasıdır²⁶. Santral yorgunluk motor korteksteki motor yolların başlangıcında, impuls azalmasıyla ve α motor nöron aktivitesinin azalmasıyla veya motor sinir boyunca aksiyon potansiyeli iletiminin azalması nedeniyle gelişebilmektedir²⁵.

Bigland – Ritchie ve ark (1978) insanda santral yorgunluğu gösteren ilk çalışmayı yapmışlardır. Bu araştırmada maksimum istemli kasılma ile maksimum elektriksel kasılmada üretilen kuvvetler karşılaştırıldığında bazı bireylerin istemli kuvvetlerinin tekrarlayan yorucu kasılmalar neticesinde düştüğü görülmüş ve bu bireylerin artık bütün motor ünitelerini tamamen aktive edemedikleri, santral olarak yoruldukları sonucuna varılmıştır⁴. Ayrıca maksimal istemli kasılma sırasında verilen elektrik uyarısı ile kuvvette ilave bir artış olmaması durumunda motor ünitelerin tamamen aktive olduğu sonucuna varılmış, ilave bir kuvvet artışı olduğunda ise motor ünitelerin tam olarak devreye girmediği çıkarımı yapılmıştır. Yani bu durumda basit olarak santral yorak kasın kuvvetini devam ettirebilmesi için gerekli olan desteği sağlayamamıştır. Korteks transcranial magnetic stimulyasyon tekniği ile uyarıldığında kas kuvvetinde ilave artış görülmüştür. İzometrik kasılmalarda yorgunluk sırasında α motor nöronun refleks inhibisyonu gösterilmiştir⁴.

Şekil 2.5'te yorgunlukta motor nöronlardaki olası değişiklikler gösterilmiştir. Eğer istemli kasılmalar birkaç saniyeden fazla devam ederse deşarj oranı azalır ve bir süre sonra da platoya ulaşır⁷⁵. Motor ünitelerin deşarj oranlarının azalması “muscle wisdom (kasın bilgeliği)” olarak isimlendirilmiştir ve bunun bir sonuç değil aksine motor nöronların düşük kuvvet üretecek şekilde ateşleme frekansının düşmesini içeren, kası yorgunluğa karşı koruma faktörü olduğu ifade edilmektedir^{25,75}. Ateşleme frekanslarının azalmasında kasta biriken metabolitler sonucu kastan kalkan grup III ve IV afferentlerin etkili olduğu belirtilmektedir. α motor nöron deşarjındaki azalma büyüktür ve bu durum kuvvetin azalmasına neden olur. Bu sırada twitch interpolasyon tekniği uygulandığında kuvvetin arttığı görülür²⁶.



Şekil 2.5: Yorgunlukta motor nöronların ateşleme oranlarındaki olası değişiklikler. 1: kas içciklerindeki grup III-IV afferentlerin refleks kolaylaşması 2: grup III-IV afferentlerin refleks inhibisyonu 3: motor nöronların ateşleme oranlarının azalması 4: grup III-IV supraspinal idareyi etkileyerek presnaptik ve postsinaptik hareketleri kompleks olarak etkiler²⁷.

Santral sinir sistemindeki afferent bilgiler ile santral sinir sisteminin kendi içinde yorgunlukta bazı değişimler meydana gelir. Periferik yorgunlukla karşılaştırıldığında santral yorgunluk kişilerin motivasyon durumu ve egzersizin şiddetinin her zamanki aktivitelerine göre olan zorluk derecesi ile ilgilidir. İyi motive sporcularda santral yorgunluğun performansı sınırlayıcı olmadığı belirtilmektedir²⁶.

2.4.1.1. Uyarı Frekansına Göre Yorgunluk Çeşitleri

2.4.1.1.1. Yüksek Frekanslı Yorgunluk

İnsan kası yüksek frekanslarla uyarıldığında (mesela 100 Hz) kas uyarılabilirliği hızla azalır. Bu koşullarda kuvvet de hızla düşer ve uyarının kesilmesiyle saniyeler içinde hızla yeniden toparlar^{28,29,37}. Bu durum “yüksek frekanslı yorgunluk” olarak isimlendirilmiştir. Bu tip yorgunluğun tekrarlı aksiyon potansiyelleri nedeniyle T tübül lümeninde progresif depolarizasyon artışı ve K^+ artması ve Na^+ azalması ile meydana geldiği belirtilmektedir. Bu progresif depolarizasyon sonucunda voltaja bağlı Na^+ kanalları inaktif kalmakta ve aksiyon potansiyelinin T tübülden içeri geçişini engellemektedir³¹. Yüksek frekanslı yorgunlukta ana faktör T tübüllere uyarı geçişinin baskılanmasıdır. Bu baskılanma şu faktörlere bağlıdır: 1- Uyarı frekansı 2- T tübüldeki Na-K pompa yoğunluğu ve aktivitesi 3- T tübül sistemin miktarı 4- Yüzeyel membranda T tübül açıklık boyutu²⁸. Eğer bir fibril yüksek frekanslı uyarıda uzun süre yüksek gerim üretebiliyorsa metabolik sistemden yüksek gereksinimi olacaktır. Sonuç olarak yüksek frekanslı yorgunlukta baskın neden aksiyon potansiyelinin T tübüle geçişinin baskılanmasıdır ve bu da hücre içi Ca^{+2} miktarının azalmasına neden olur^{28,30,37}.

İstemli maksimal kasılmada ise gerim yüksek frekanslı uyarıdakinden daha yavaş azalır. Bunun nedeni istemli kasılmada α motor nöron ateşleme frekansının kademeli olarak azalmasıdır, böylece gevşeme de progresif olarak yavaşlar. Ancak yüksek frekanslı uyarı normal aktivitelerde gerçekleşmez, yüksek frekanslı yorgunluk modeli iyonik değişimlere dayanan bir yöntemdir²⁸.

Yüksek şiddetli aktiviteler tekrarlanıyorsa ve bu aktiviteler büyük kas gruplarını içeriyorsa nöral, kas ve metabolik sistem büyük oranda baskı altında kalır ve bu koşullarda yorgunluk hızlı gelişir. Bu durumda nöromüsküler sistemin bir veya daha fazla bölgesindeki yetmezlik nedeni ile kuvvet azalır. Periferal düzeyde maksimal veya maksimale yakın kuvvet üretmede gereken yüksek frekanslı aksiyon potansiyeli üretememe eksitasyonun aksamasına neden olur veya nöral sinyalin kasa geçişinin tamamen aksamasına yol açar^{25,31}. Bu koşullarda Na^+ ve K^+ gradientleri bir sonraki nöral impuls için hazır duruma geçememektedir³⁸. Sonuç olarak hücre dışında K^+ birikmesi hücrenin dinlenim membran potansiyelini düşürerek eksitabilitenin

azalmasına neden olur. Bu durumda ayrıca su da interstisyel aralıktan hücre içine sızar. Membran eksitabilitesindeki bu problem EMG ölçümlerine de integre EMG azalması olarak yansır^{30,31}.

2.4.1.1.2. Düşük Frekanslı Yorgunluk

Kas düşük frekanslarda ve çok uzun süre ile uyarılırsa kuvvetin yeniden toparlaması günler alabilir. Bu tarz yorgunluğa “düşük frekanslı yorgunluk” denmektedir. Diğer bir adı da “uzun süreli yorgunluk” tur. Bu yorgunluğun nedeni tam bilinmemekle beraber toparlanmanın çok uzun sürmesi bu yorgunluğun kaynağının metabolik ürünler olmadığını düşündürmektedir. Nitekim metabolik toparlanma saatler içinde gerçekleşebilmektedir. Olası sebeplerden birisi hücre içi Ca^{+2} derişimindeki uzun süreli artıştır. Buradaki mekanizmanın SR’a Ca^{+2} geçişi ve bu süreçteki proteinler olduğu düşünülmektedir²⁶. Bunlardan en önemlisi olan kalmodulin SR’a Ca^{+2} geçişinde önemli bir rol alır. Kalmodulin düşük sitoplazmik Ca^{+2} koşullarında aktive olurken, yüksek Ca^{+2} koşullarında inhibe olur. Yorgun olmayan bir kasta aktivasyon-inaktivasyon durumu döngüsel olarak devam eder. Ancak yorgunlukta sitoplazmik Ca^{+2} artar ve bu durumda kalmodulinin aktive olması zorlaşır^{26,30,37}.

Bir diğer olası faktör serbest oksijen radikalleridir. Oksidasyon pek çok protein için zararlı etkiler gösterir. Bu zararlı etkilerden birisi de voltaj sensörlerini etkilemesidir³⁰.

2.4.2. Yorgunlukta Afferent İntutlar

Kasılmalar sırasında kastan gelen bildirimler şu şekilde değişmektedir:

a) Kas İğciği Afferentleri: İzometrik kasılmalar sırasında kasılma 1-2 sn den uzun sürüyorsa kas iğcik deşarj frekansı azalır ve yorgunluk gelişir. Konsantrik kasılmalarda iğcik afferentleri kas boyundaki değişimlerden dolayı daha sessiz kalır. Eksantrik kasılmalarda gerime bağlı olarak kas iğcik afferentleri artar³².

b) Golgi Tendon Organ Afferentleri: Golgi tendon organı deşarjı kuvvet üretiminin ilk birkaç saniyesinde adapte olur. Gerime duyarlılığı yorgunlukla değişir. Kas

iğcik ve tendon organının etkileri grup III-IV afferentlerle karşılaştırıldığında daha azdır³².

c) İğcik Olmayan Grup II-III ve IV Kas Afferentleri: Yorgunluk sırasında grup III-IV kas afferentlerinin deşarjı sonlandıkları noktadaki sıcaklığa, kimyasal ve mekanik çevreye göre artar. Yorgunluğu takiben iğcik olmayan grup II kas afferentlerinin ve grup III mekanosensitif afferentlerin deşarj oranları artar. Gerime ve dokunmaya duyarlılık artarken kasılmaya cevap verebilirliği azalır. Grup III afferentler deşarjlarını ilk 10 sn içinde 1 Hz kadar artırır. Kasılmalar sonucunda kasta oluşan metabolitler grup III ve IV afferentlerin uyarılma eşliğini düşürürler³².

2.4.3. Kas Yorgunluğunda Motor Kortikal Ve Supraspinal Faktörler

Yorucu egzersizlerin santral sinir sisteminde enkefalinergik, dopaminerjik ve serotonergik yolları etkileyebileceği gösterilmiştir³². Bu değişiklikler uyanıklık, motivasyon ve ağrının toleransı açısından önem taşır. Öte yandan yorgunluk sırasında ortaya çıkan diğer nöroendokrin yanıt bütünü (sempatik aktivasyon artışı, insulin konsantrasyonunda meydana gelen değişimler) ise kasa kasılması sırasında gerekecek substratların ulaşılabilirliğini etkiler³².

Yapılan çalışmalarda kas yorgunluğunda ağrı, tükenmişlik hissi gibi subjektif algıların ortaya çıktığı ve sporcular tarafından bu hissin yorgunluk nedeni olarak ifade edildiği bilinmektedir. Buna karşın supraspinal düzeydeki elektrofizyolojik çalışmalar yanında bir takım biyokimyasal değişkenlerin de bir arada değerlendirilmesi, yorgunluğun objektif olarak yorumlanmasına anlamlı katkılar sağlamıştır. Deney hayvanlarında yorgunluğa yol açan bir fiziksel aktivitenin kortikomotor nöron hücrelerinin deşarjlarında değişiklikliğe neden olması, yorgunlukta santral sinir sisteminin katkısını vurgulama açısından önemlidir³².

2.4.3.1. Motor Ünitelerin Etkinlik Örüntüsü

Basit düşünce sistematığı esas alınacak olursa, egzersiz şiddeti ve türü ne olursa olsun tükenme sırasında, ilgili kas grubundaki motor birimlerin tümünün etkinleştiği kabul edilir. Ancak yapılan çalışmalarda yorgunluk anında aktive olması beklenen

motor nöronların bazılarının etkinleşmediği gösterilmiştir³³. Bu bulgu yorgunluğun tek başına periferik mekanizmalar ile açıklanmasını da olanaksız kılmıştır. Özellikle rekreasyonel amaçla spor yapan kişilerde uzun süreli egzersiz sırasında etkinleşen motor birim sayısının bütüne oranı yaklaşık % 30 olarak hesaplanmıştır³³. Buna karşın üst düzey elit sporcularda bu oranın daha yüksek olduğu tespit edilmiş olmakla beraber hiçbir zaman tümüyle etkinleşmediği gösterilmiştir^{33,34}. Ancak tartışılması gereken esas konu dinlenim halinde daha yüksek sayıda motor sinir etkinleştirebilen bir bireyin yorgunluk anında bu yeteneğini kaybediyor olmasıdır. Bu noktada sorulması gereken esas soru, santral sinir sisteminin söz konusu ince ayarlamayı hangi nedenle yaptığıdır. Yorgunluk sırasında meydana gelen stres koşullarının belirli bir noktadan sonra vücudun bütünü için zarar verme potansiyeli olabilmesi, motor birim aktivasyonundaki azalmanın bir savunma sistemi olarak yorumlanabileceğini düşündürmektedir⁷⁵.

Motor birimlerin etkinliğini düzenleyen mekanizmaların başında bireyin yorgunluk algısının temel sinyali olarak yorumlanabilen ağrı duyusu gelmektedir. Subjektif bir duygu olan ağrı, bireyin daha fazla kas lifini etkinleştirememesinin bir nedeni olarak kabul edilebilir. Ağrıya karşın sportif aktiviteye devam edebilen bireylerde (elit sporcular) yapılan EMG kayıtları, süreç içinde etkinleşen motor lif sayısında artma olduğunu göstermiştir. Buna karşın ağrıyı tolere edemeyen bireylerin, yedek motor lifleri etkinleştiremeden egzersizi bıraktıkları ortaya konmuştur. Ancak her iki gözlemden de bireylerin sportif form durumu ne olursa olsun, motor yolakları bütünü ile etkinleştirmemiş olmaları ortak özellikleri olarak ön plana çıkmaktadır³⁴. Bu bilgilerin ışığı altında iskelet kasının kontraktıl özelliklerindeki azalmayı periferik ve santral bileşenleri ile bir arada değerlendirmek gerekir.

2.4.3.2. Yorgunlukta Motonöron Düzeyindeki Değişiklikler

Yapılan çalışmalarda uzun süreli egzersiz sonrası ortaya çıkan yorgunluğun intrinsik motor nöron özelliklerini etkileyerek refleks inhibisyona yol açtığı, beraberinde de renshaw hücrelerini baskıladığı gösterilmiştir. Supraspinal merkezlerden kaynaklanan motor nöron uyarılarının frekansında azalma olduğu tespit edilmiştir. Uyarı frekansındaki azalmanın özellikle hızlı kasılan kas liflerini öncelikli olarak

etkilediği gözlemlenmiştir. Bu süreçte motor yolakta devreye giren sinir sistemi yanında, serotonerjik sinir ağının da etkin olabileceği belirtilmiştir³³.

2.4.3.2.1. Motor Nöronların Eksitasyonunun Azalması

Yorgunluk mekanizmalarının öncelikli olarak araştırıldığı çalışmalarda elde edilen bulgular, spinal motor nöronların eksitasyonunda bir azalmanın olduğuna işaret etmektedir⁷⁵. Santral yorgunluk konusundaki araştırmalarda özellikle değerlendirilen bir değişken de sporcunun motivasyonu ile ilgilidir. Nesnel olarak tanımlanması zor olan bu duygulanım ile santral sinir sisteminin çalışmasını doğrudan etkileyen biyokimyasal veya nörofizyolojik değişkenlerin olası ilişkisini göstermek teknik olarak günümüzde mümkün olamamıştır. Öte yandan yapılan çalışmalardan elde edilen veriler, dallı zincirli aminoasitlerin önemi olabileceğini düşündürmektedir. Santral sinir sisteminde serotonin konsantrasyonundaki artışın uyku ve yorgunluğa neden olduğu görüşü bu hipotezin temel dayanak noktasını oluşturmaktadır. Dallı zincirli aminoasitler (BCAA) ile triptofanın santral sinir sistemine aynı aminoasit taşıyıcısıyla girdiği bilinmektedir. Egzersiz sırasında BCAA'lerin iskelet kası tarafından kullanılması santral sinir sistemine triptofan girişinin artmasına neden olmaktadır. Serotonin ön maddesi olan bu amino asitin santral sinir sistemindeki artışı ise beraberinde serotonin konsantrasyonunun beklenilenden daha fazla yükselmesine neden olabilmektedir³³.

İskelet kas kuvvetinde azalmaya neden olan egzersizler sonrasında gözlemlenen bir diğer önemli bulgu kasın elektriksel aktivitesinde meydana gelen değişimlerdir⁷². Yorucu istemli maksimal kasılmalar sonrasında kuvvetin azalması EMG aktivitesini de baskılar. İskelet kasının elektriksel etkinliğindeki azalma motor nöron havuzunun refleks inhibisyonu ile ilişkilendirilmektedir. İskelet kasından kaynaklanan grup III ve IV afferent nöronların deşarj frekansındaki artma, motor yolağın medulla spinalis seviyesinde refleks baskılanmasına yol açabilmektedir. Bütün bu etkileşime ek olarak, kas kasılma hızı ve geriminde meydana gelen değişiklikler kas içcik aktivitesinde de baskılanmaya yol açabilmektedir. Kas içciklerinden kaynaklanan afferent uyarıların frekansındaki azalma motor nöron uyarılarının oranını azaltabilir³⁰.

Normal dinlenim şartlarında motor nöronlardan kaynaklanan uyarılar kasa ulaştığında hedef dokuda aksiyon potansiyeli ve sonrasında da sarsıların ortaya çıkmasına yol açar. Ancak iskelet kasının yorulduğu durumlarda gözlemlenen yanıt

dinlenme koşullarından farklı olabilmektedir. İskelet kasının motor uyarılara yanıt verememesinin olası nedenlerinden bir tanesi motor son plak işlevlerinde meydana gelen bozulma olarak yorumlanmaktadır. Nöral uyarının sinir kas kavşağında yayılımıyla ilgili sorundan kas hücresindeki iyon dengesinde meydana gelen uzaysal dengesizliğin sorumlu olduğu düşünülmektedir^{25,30,72}.

2.5. Nöromusküler Kavşak ve Yorgunluk

Ardışık uyarılar sırasında nöromusküler kavşakta meydana gelen bazı değişiklikler iskelet kasının kontraktıl özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir. Motor sinir son ucundan asetilkolin salınımının azalması, sinir kas kavşağında asetilkolinesteraz enzim aktivitesindeki artma ya da tam tersine azalma, kas lifi membran potansiyelinde meydana gelen değişiklikler ile iyon dengesindeki bozulmalar iskelet kasının uyarı örüntüsünü doğrudan etkileyebilmektedir^{1,29}.

Yukarıda ifade edilen değişiklikler nöromusküler hastalıkların fizyopatolojik temellerini oluşturma yanında, normal bireylerde yorgunluk sırasında geçici olarak da olsa ortaya çıkabilmektedir. Yukarı motor nöronların uyarı frekansındaki azalmaya ek olarak sinir kas kavşağında meydana gelen değişiklikler egzersiz sırasında gözlemlenen yorgunluğun santral bileşenini oluşturur. Buna karşın maksimal egzersiz sonrası yapılan elektriksel ya da verbal uyarıların kas kuvvetinde artışa neden olabileceğinin gösterilmiş olması, iskelet kasının yorgunluk anında tam kapasitesinin tükenmemiş olduğuna işaret eder. Aslında bu bulgu santral yorgunluğun normal bireylerde görülen kas kuvvet azalmasının önemli bir unsuru olduğuna da işaret etmektedir. Mekanizması tam olarak anlaşılamamış bu yorgunluk etkeninin ortadan kaldırılmasına ya da daha geç ortaya çıkmasına yardımcı olacak girişimlerin sporcuların performansında artışa neden olabileceği bilinmektedir. Bu amaçla sporculara psikolojik destek verilmesi ve hatta ağrıyı tolere edebilmelerini sağlayacak antrenman örüntülerinin çalışma programına eklenmesi, uzun dönemde sporcuların ağrı ya da isteksizlik nedeniyle sportif aktiviteyi bırakmamalarını sağlayacak uygulamalar olarak kullanılmaktadır. Bu antrenmanlardan beklenen temel kazanım, sporcunun santral yorgunluğunu engelleyebilmektir^{21,25,29,30,72}.

2.6. Periferik Yorgunluk

İskelet kasının performansını sınırlayan temel değişkenin belirlenmesi spor fizyolojisi konusunda yapılan çalışmaların ana konu başlıklarından bir tanesini oluşturmaktadır. Özellikle aerobik egzersizlerde enerji için gereken oksijen ve besin öğelerinin dokuya ulaştırılmasını sağlayacak sürecin bütünü performans anlamında ön plana çıkar. Buna karşın anaerobik egzersizlerde kuvvetin sürdürülebilmesinde kasın kontraktıl özelliklerini kısa süre içinde belirleyebilecek metabolik tepkime bütünü değerlendirmek gerekir^{37,41,51,60}.

Maksimal şiddette yapılan egzersizlerde, iskelet kasının enerji gereksinimi, egzersizin şiddetine göre onlarca kat artar^{25,35}. İskelet kasının artan egzersiz sırasında enerji dengesinin sağlanamıyor olması ya da iskelet kasının elde ettiği enerjiyi kontraktıl makineyi etkinleştirmede kullanamaması periferik yorgunlukla ilgili tartışmaların ana başlığını oluşturmaktadır³⁵. Periferik yorgunluk kendi içinde metabolik ve metabolik olmayan mekanizmaları ile ayrı ayrı tartışılmaktadır. Metabolik yorgunlukta kontraksiyonlar için gereken enerjinin sağlanmasıyla ilgili tepkime bütünü değerlendirilir²⁶. Düşük şiddette yapılan fiziksel aktivitelerde teorik olarak tepkimler sonrası elde edilen ATP gereksinim duyulan enerjiyi sağlamak için yeterlidir. Ancak egzersiz şiddetinin arttığı durumlarda metabolik süreç ATP sağlayabilmede yeterli hıza ulaşamayabilir. Bu durumda aerobik tepkimeler yerini ATP sentez hızı daha yüksek olan anaerobik tepkimelere bırakmak durumunda kalır. Anaerobik tepkimeler ATP sentez hızı yüksek olmakla beraber, ortaya çıkan son ürünler ve substrat düzeyindeki azalmalar nedeniyle kontraktıl mekanizmanın işleyişinde olumsuzluklara yol açabilir. Nitekim PCr konsantrasyonundaki azalma yanında P_i , kreatin, ADP, AMP, IMP NH_4^+ ve laktik asit konsantrasyonunda gözlemlenen artışlar metabolik yorgunluk etkenleri olarak tartışılmaktadır^{25,29,30,35,51}. Öte yandan kas içi depo glikojen miktarındaki azalmanın da kas kontraktıl özelliklerini olumsuz yönde etkileyen faktörlerden bir tanesi olabileceği bildirilmektedir^{30,35}.

Periferik yorgunluğa neden olan etkenlerden bir diğeri de iskelet kasının ardışık kontraksiyonları sonrasında yapısında meydana hasarlanmayla bir arada tartışılmaktadır. Yapılan çalışmalar kontraksiyon modalitesinin haraplanmayla doğrudan ilişkilendirilebileceğini, öte yandan eksantrik kasılmalar sonrasında daha belirgin olduğunu göstermiştir Sarkolemmanın bütünlüğünün bozulması, z bandı

yırtıkları, miyofibriler yapı proteinlerinde harabiyet yanında makrofaj infiltrasyonu yorgunluğa ikincil doku düzeyinde meydana gelen hasarlanmalar arasında sayılabilir³⁰.

Periferal yorgunluğu santral yorgunluktan ayıran en önemli özellik, tanımdan da anlaşılacağı üzere, iskelet kasının motor ünite deşarjındaki artışa karşın yeterli yanıtı oluşturamamasıdır. Yorgunlukta kas lifi membranı boyunca uyarının sağlıklı yayılım gösteremediği ve sonucunda da ileti hızının yavaşladığı bilinmektedir. T tübül lümeninde K^+ iyonlarının birikmesinin ileti hızının yavaşlamasından sorumlu mekanizma olduğu düşünülmektedir²⁵. Lümen yapısının dar olması ve özellikle de bu bölgedeki membranda Na-K ATPaz pompasının kısıtlı sayıda olması iyon derişimindeki değişikliklerin etkisini belirginleştirir. Ekstraselüler K^+ iyon konsantrasyonundaki artma uyarılabilirliği olumsuz yönde etkileyerek, uyarılma – kasılma eşleşmesinin kinetiğini bozar. Na-K ATPaz pompasının etkin çalışmaması sonucunda hücre dışı K^+ konsantrasyonu artarken, Na^+ konsantrasyonunda bir azalma gözlemlenir. Yorgunluğa neden olan fiziksel aktivitelerde Na-K ATPaz pompasının etkinliği K^+ ve Na^+ taşınımı için gereken hıza ulaşamayabilir ve iyon dengesi bozulur. Hücre dışı K^+ ile hücre içi Na^+ konsantrasyonlarındaki artma hücre zar potansiyelinin bozulmasına, sonucunda da uyarılabilirliğinde olumsuz etkilere neden olur²⁶. T tübül sistemi içindeki iyon miktarının bölgesel artışı, T tübül sisteminin toplam hacmi düşünüldüğünde, çoğu kez plazma K^+ derişiminde önemli değişikliklere neden olmaz. Ancak çok üst düzeydeki sporcularda meydana gelen aşırı yorgunluk hallerinde plazma K^+ yoğunluğunda anlamlı artışların olduğu bildirilmiştir^{25,29,30,36,37,41}.

İskelet kasında gözlemlenen performans azalmasında etkin olan unsurlardan bir tanesi de kontraktıl proteinlerin ardışık uyaranlara beklenen yanıtı verememesidir. Düzgün iletilmiş bir uyarı sonrası sitozolde kalsiyum miktarının yükselmesine karşın, kas liflerinin beklenen yanıtı oluşturamadığı bu tablo “miyofibriler yorgunluk” olarak isimlendirilmektedir. Normal koşullar altında, dinlenim durumundaki bir kas yapısında birim sarkomerin oluşturduğu kuvvetin çapraz köprü sayısı ile orantılı olduğu belirtilmektedir. Teorik olarak sabit bir sitozolik kalsiyum konsantrasyonunda oluşturulan kuvvetin değişkenlik göstermesi kontraktıl elemanların işleyişiyle ilgili bir olumsuzluğu düşündürmektedir^{5,29,30}.

2.6.1. Enerji Kaynakları ve Biyokimyasal Süreçlerdeki Değişimler

Yoğun egzersizde bir yandan hücre içi P_i , ADP, H^+ ve laktat iyon konsantrasyonları artarken bir yandan da tepkimeler için gereken enerjetiklerde azalma söz konusu olabilir⁶⁰. İskelet kas sisteminin temel fizyolojik kurgusu, hücre içi ATP düzeyini sabit tutmaktır. Nitekim enerjiden zengin bu molekül sadece kontraktıl proteinlerin etkinliği açısından değil, aynı zamanda hücre iyon dengesinin kurulmasında da hayati önem taşımaktadır. Hücre zarındaki sodyum-potasyum pompa aktivitesi yanında SR'a Ca^{+2} un yeniden geçmesi aktif enerji gerektiren süreçler olup, ATP'ye sürekli gereksinim duyar. Öte yandan yoğun egzersizlerde hücre içi ATP konsantrasyonundaki azalma, hücrenin bu tepkimeler bütününe kullanarak homeostatik koşullarını koruyabilmesini engeller^{16,25,29,30,37,41}.

İskelet kasının kontraksiyonlar sırasında kullandığı acil enerji kaynaklarından biri de PCr'dir. Ancak bu iki molekülün de hücre içi konsantrasyonlarının sınırlı olması, yeniden sentezlenmelerinin mümkün olmadığı durumlarda egzersizin yorgunluk nedeniyle kısa sürede sonlandırılmasına neden olur. Hücre içi PCr konsantrasyonunun hızlı kasılan kas liflerinde, yavaş kasılanlara oranla %15-20 daha fazla olduğu tespit edilmiştir³⁵. Buna karşın hücre içi sınırlı konsantrasyonları nedeniyle maksimal şiddetteki kasılmalar sırasında depoların birkaç saniye içinde azalacağı ve buna bağlı olarak da kuvvette azalma olacağı gösterilmiştir^{25,29,35}. Öte yandan PCr azalmasının ATP senteziyle eşleştiği hatırlanacak olursa, ATP konsantrasyonunda ortaya çıkabilecek önemli değişiklikleri önleyen bir savunma mekanizması olarak da yorumlanabilir^{37,39,40,51}.

Depo ATP ve PCr miktarının sınırlı olması, hücrelerin devam eden fiziksel etkinliklerde ATP sentezi için diğer enerji yollarına gereksinim duyulmasını zorunlu kılar. İzleyen dönemde anaerobik glikolitik yolağın etkinliğinde görülen artış bu süreçte devreye giren üçüncü tepkime dizisini ifade eder²⁸. Bütün bu sürecin biyokimyasal karşılığı hücre içi bazı son ürünlerin konsantrasyonunda görülen artmadır. Özellikle ADP, AMP, Cr, H^+ ve laktat molekülünün birikmesi bu konuyla ilgili süreci değerlendirmede kullanılan temel biyokimyasal değişkenlerdir^{25,29,30,34}.

Anaerobik tepkimeler sonrası biriken son ürünlerle glikolitik süreç baskılanmaya başlar. Bu temel özellik canlı sisteminin artmış metabolik aktivitesini uzun süre devam ettirebilmesi için aerobik tepkimeler sonrasında elde edilecek ATP'yi zorunlu kılar.

Aerobik metabolizmanın önemli bir diğer avantajı glikoz molekülü yanında yağ asitleri ve proteinlerin de tepkimeye katılıyor olmasıdır³⁴. Bu tepkimeler sırasında metabolik son ürün olarak ortaya CO₂ ve su molekülünün çıkıyor olması ve bu son ürünlerin ortamdan uzaklaştırılmasının vücut açısından ciddi bir sorun teşkil etmemesi, aerobik metabolizmayı anaerobik metabolizmadan ayıran bir diğer önemli farklılıktır. Enerji kaynağı olarak kullanılacak maddelerin vücutta ciddi anlamda depolanmış olması yanında son ürünlerin rahatlıkla hücre dışına atılıyor olması, aerobik egzersizlerin anaerobik egzersizlere oranla çok daha uzun süre devam etmesine olanak sağlar. Aerobik egzersizin yüklenmeler sırasında etkinlik kazanmasını sağlayan unsurların başında bireyin aerobik kapasitesinin yanında egzersizin süre ve şiddeti gelir. Genel olarak düşük şiddetli egzersizler sırasında aerobik metabolik yolak kullanılırken anaerobik metabolik yolakta daha yüksek şiddetteki fiziksel etkinlikler ön plana çıkar. Buna karşın aerobik egzersiz sırasında görülen performans kaybından sorumlu mekanizmalar anaerobik egzersizlere oranla farklılık gösterir^{28,29,30,34,41,51}.

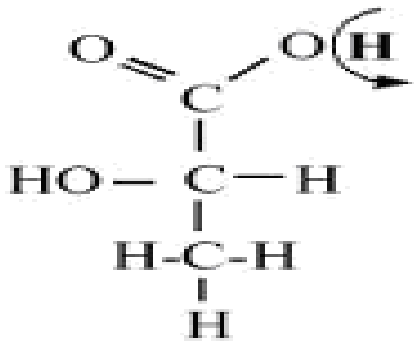
2.6.1.1. Glikojen

Glikoz kasta ve karaciğerde depo glikojen halinde bulunmaktadır. Kas glikojen depo miktarı ile dayanıklılık arasında ilişki belirtilmektedir. Submaksimal uzun süreli egzersizlerde glikojen azalması görülür. Ancak aynı iş yükünde yavaş hızda çevrilen pedalda glikojen azalması hızlı liflerde görülmezken, yüksek hızda çevrilen pedal hızında hızlı liflerde azalma görülür. Kısa süreli yüksek şiddetli egzersizlerde hepatik glikojenoliz uyarıldığı için kan glikoz düzeyi dinlenimin üstüne çıkar. Glikozun bu yüksek kalma düzeyi glikojen deposu ve glikojenolitik ve glikoneojenik enzim aktivitesi ile sınırlıdır. Uzun süreli egzersizlerde hepatik glikojen eksikliğinden dolayı glikoneogenez ile sınırlı olduğundan glikoz üretimi çalışan kasların ihtiyaç duyduğundan daha az olabilir²⁶. Uzun süreli egzersizlerde glikoneojenik ön maddeler olan laktat, pirüvat ve alanin artar ve hepatik glikoz üretimi azalır⁵². Kan glikoz düzeyindeki bu düşme nedeni ile egzersiz düzeyi subjektif olarak daha zor olarak algılanır^{29,30,40}.

2.6.1.2. Laktat ve Asidite

Dinlenim halinde ve hafif egzersiz sırasında ATP gereksinimi aerobik yoldan karşılanır. Ancak egzersizin şiddeti arttıkça anaerobik yoldan enerji ihtiyacı önem kazanır. Kısa süreli yüksek şiddetli aktivitelerde kastan laktat uzaklaştırılması yavaş olmasına rağmen üretimi oldukça hızlıdır^{25,30,41}. Bu nedenle uzaklaştırılamayan laktat hızla kasta birikir ve kas içi laktatın artmasına neden olur ve kana laktat geçişi meydana gelir. Egzersiz yapan kasta zaten artmış olan kas kan akımı da laktatın kastan uzaklaştırılmasında yardımcı bir etkidir^{31,51}.

Laktik asidin karaciğer ve kas hücreleri tarafından metabolize edildiği gösterilmesine rağmen laktik asit halen bir son ürün olarak geçmektedir⁴³. İlk kez 1907’de Fletcher&Hopkins tarafından varlığı dile getirilen laktik asitin 1920 ve 1930’larda pasif dinlenmeye göre hafif egzersiz sırasında daha hızlı uzaklaştırıldığı gösterilmiştir⁴². Daha sonraki yıllarda laktatın diğer kas hücrelerine geçebildiği anlaşılmıştır. Farklı test düzenekleri ile kasların sadece laktat üretmekle kalmayıp aynı zamanda laktat döngüsünde laktatın üretildiği kastan uzaklaştırılıp metabolize edilmesinde de önemli rol oynadığı gösterilmiştir⁴³.



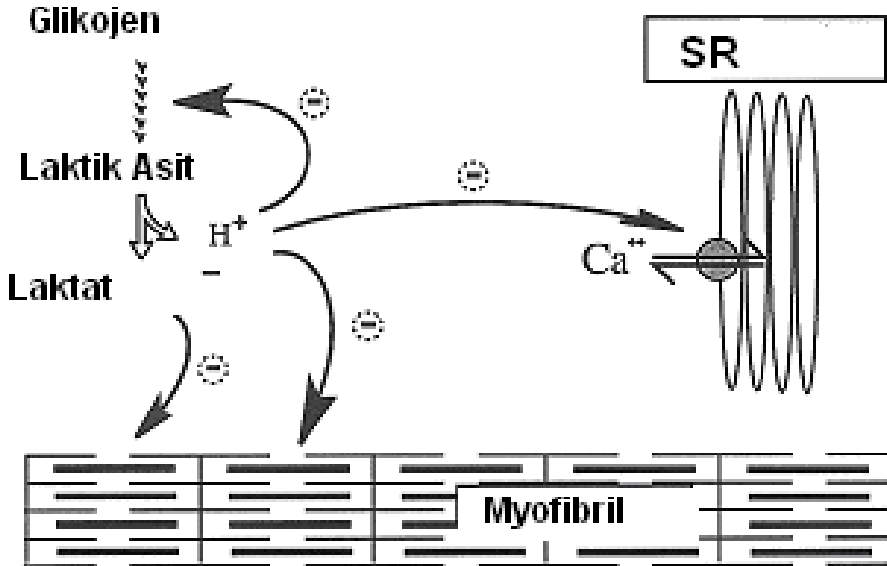
Laktik Asit Molekülü

Şekil 2.6: Laktik asidin kimyasal yapısı: $\text{COO}^- + \text{H}^+$

Laktatın kan ve kas arasında taşınmasında teorik olarak iki bariyer vardır: kapiller membran ve sarkolemma. Bunlardan kapiller membran direkt bir bariyer olarak

görülmeyip laktat, endotelial hücreler tarafından alınarak diğer tarafa difüze olmaktadır. Ancak sarkolemma laktatın hem hücreden dışarı atılması ve hem de hücreye alınması için bir bariyerdir⁴⁴. Uzun yıllar laktatın sarkolemmadan basit difüzyon ile geçtiği sanılıyordu ancak 1997’de Juel bu taşınımın membrana bağlı taşıyıcı proteinlerle gerçekleştiğini öne sürdü⁴³. Membrandaki bu proteinler “laktat taşıyıcı proteinler (MCT)” olarak adlandırıldı. Bu taşıyıcı proteinler ilerleyen bölümde anlatılacaktır.

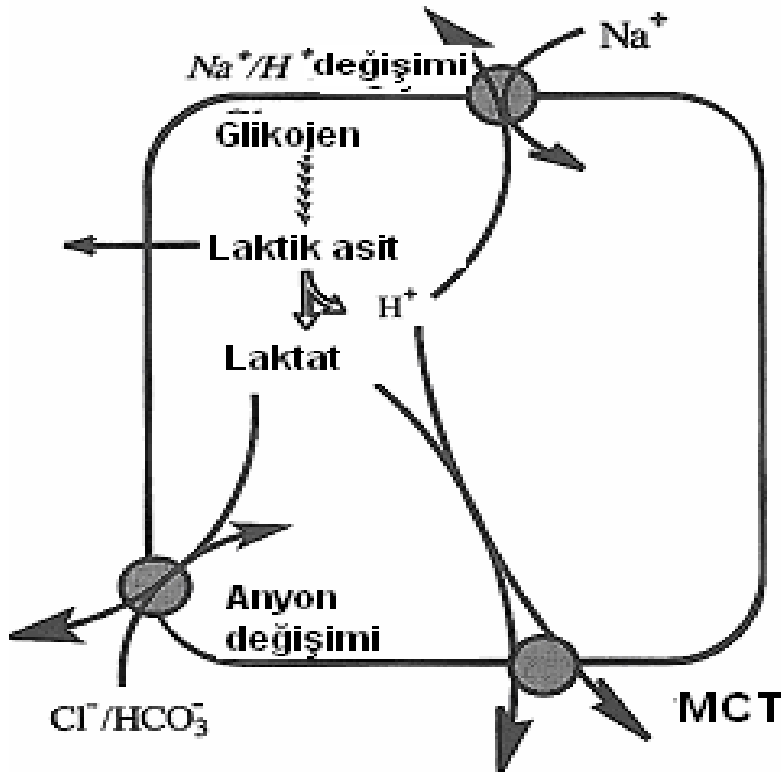
Anaerobik metabolizma sonucu oluşan laktik asit kas hücresinin osmotik basıncını artırarak ekstraselüler suyun kas içine geçmesine ve böylece hücre volümünün artmasına neden olur^{44,5,31}. Laktik asit güçlü bir asit olduğu için hücre pHsında laktat anyonu ve H^+ iyonlarına ayrılır. Laktik asidin kendisinin glikolizi baskılayan bir etken olduğu, ayrıca H^+ iyonlarının miyozin ATPaz üzerine baskılayıcı etki yaptığı belirtilmektedir. Bazı araştırmalarda⁴⁵ laktat iyonlarının kas kasılması üzerine çok az etkisi olduğu belirtilmesine rağmen, bazı çalışmalara göre laktat anyonlarının kendisi de sarkomer fonksiyonları üzerine baskılayıcı etki yapar^{30,31,44}. Şekil 2.8’de laktat anyonlarının ve hidrojen iyonlarının baskılayıcı etkileri özetlenmiştir⁴⁴.



Şekil 2.7: Laktat anyonları ve H^+ ’nin hücre metabolizmasına etkileri (- işaretleri baskılayıcı niteliği göstermektedir).

2.6.1.2.1. Laktat Ve pH Kontrol Mekanizmaları

Egzersiz şiddetinin artması ile glikolizin artmasına bağlı olarak, sitoplazmada biriken pirüvat konsantrasyonu mitokondrinin metabolize etme kapasitesini aştığında hücre içinde laktik asit birikmeye başlar²⁵. Anaerobik glikoliz sonrası son ürün olarak kasta artan laktik asit, laktat ve hidrojen iyonlarına ayrışır. Artan hidrojen iyonları kas pH'ının düşmesine neden olur. Hücre içinde pH'ının fizyolojik sınırlar içinde tutulması yaşamın devamı açısından hayati öneme sahiptir. Bu anlamda hücre içinde fosfat başta olmak üzere protein ve bikarbonat tampon sistemleri pH değişikliklerine karşı hücreyi koruyucu özellik gösterir^{30,31,44,50,51}.



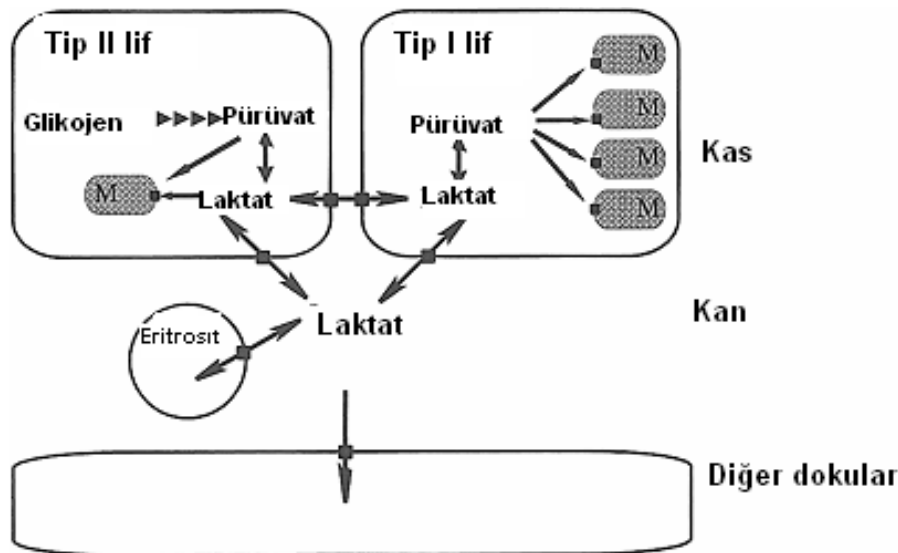
Şekil 2.8: Laktat ve hidrojenin hücreden taşınması⁴⁰.

Hidrojen iyonları Na-H değişim proteinleri ile hücre dışına pompalanırken, laktat, taşıyıcı proteinler olan MCT'ler ile hücreden uzaklaştırılır. Laktat taşıyıcı proteinler olarak bilinen MCT'lerin insan kasında MCT1 ve MCT2 formları tanımlanmıştır. MCT1'in mitokondri membranında yer aldığı ve laktatın metabolize edilmesinde

önemli rol aldığı ifade edilmektedir. Kanda laktat eritrositler ile başta karaciğer olmak üzere glikoneogenezin etkin olduğu dokulara taşınır. Bu tepkimeler bütününün sonrasında laktat karaciğerde glikoza dönüştürülür^{31,41,44}.

Kas hücresinde artan laktat molekülünün metabolizmasındaki seçeneklerden birisi mitokondride krebs döngüsüne katılmasıdır. Laktat molekülü mitokondride konumlanan MCT1 taşıyıcısı aracılığı ile mitokondriye taşınmaktadır. Mitokondri içinde LDH enzimi aracılığı ile pürüvata dönüştürülerek metabolik sürece katılmaktadır^{46,25}.

İnsan kasında yapılan araştırmalarda yavaş tip lif miktarı ile laktat taşıma kapasitesi arasında ilişki bulunması bu liflerin laktat metabolizmasındaki önemini göstermektedir. Hem insan ve hem de hayvan çalışmalarında düşük şiddette yapılan antrenmanların laktat taşıma kapasitesi üzerine etkisi olmadığı halde, orta ve yüksek şiddetli antrenmanların laktat metabolizmasını geliştirdiği görülmüştür. Uygun şiddetteki yüklemeleri içeren birkaç günlük antrenman periyodunda kalpte ve oksidatif kas liflerinde MCT1 artışı olduğu ifade edilmektedir^{31,47}.



Şekil 2.9: Laktat metabolizmasında MCT ler⁴⁴(siyah noktalar MCT ler M=mitokondri).

Bireyin form durumuna bağılı olarak değişmekle beraber maksimal aerobik kapasitenin % 50-60'ına karşılık gelen yüklemelerde laktik asit seviyesinin artmaya başladığı bilinmektedir. Kısa süreli maksimal yüklemelerde 10-20 mM laktat seviyelerine ulaşıldığı, tekrarlayan yüklemelerde ise laktat seviyesinin diğer egzersiz yüklemelerine oranla daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Yapılan alışmalarda^{29,31} kas laktat seviyesinin kandaki değerlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Glikolitik süreci içeren yüksek şiddetteki fiziksel aktivitelerde kuvvet azalması laktat artışı ile ilişkili bulunmuştur. Ancak son araştırmalarda pH azalmasının yorgunluğu oluşturan esas etken olduğu ifade edilmektedir⁵¹. Nitekim hücre içi pH'sının asit tarafa doğru kayması iskelet kas fizyolojisini olumsuz yönde etkilemektedir³¹. Düşük pH değerlerinde birçok protein aktivitesi baskılanmaktadır. Nitekim pH düşmesi Ca-ATPaz aktivitesini baskılayarak sitozolde kalsiyum miktarının artmasına ve gevşemenin yavaşlamasına neden olmaktadır^{5,29,31,39,48}.

Kas pH'sının düzenlenmesinde etkin rol oynayan sistemleri proton taşıyıcı pompalar ve tampon sistemleri ile açıklamak mümkündür. Membranda yerleşmiş bulunan Laktat ve hidrojeni birlikte taşıyan proteinler, Na^+/H^+ değiştirici pompalar ve HCO_3^- bağlı taşıma sistemleri örnek olarak verilebilir. Bu taşıyıcı sistemlerden laktat-hidrojen taşıyıcılarıyla hidrojen iyonları artan laktat iyonları ile birlikte hücre dışına taşınırken; Na^+/H^+ değiştirici pompalar ise dinlenim pH sınırın düzenlenmesinde etkin rol alır^{25,31}. Ayrıca histidin aminoasidinin de pH düzenlenmesinde rol aldığı ifade edilmektedir²⁵.

En belirgin kas içi pH azalmasının 1-10 dk'lık yüksek şiddetli egzersizler ile maksimal şiddetteki interval yüklenmelerde oluştuğu belirtilmektedir⁴⁹. İnsan kas çalışmalarında da kuvvet azalması ile pH arasında yakın ilişki bulunmuştur. Ayrıca soyulmuş kas lifi çalışmalarında asiditenin hem izometrik kuvveti hem de kısalma hızını azalttığı gösterilmiřtir²⁵. pH'nın asit tarafa doğru kayması iskelet kasının kontraktıl özelliklerini de dolaylı olarak etkilemektedir. Nitekim hücre dışı pH'nın asit tarafa kayması grup III-IV afferent nöronları aktive ederek yorgunluk algısına neden olmaktadır⁴⁵. Ancak bu bulgular pH'daki düşüşün kuvvetteki azalma ile olan ilişkisini doğrudan aıklayamamaktadır^{30,45}. Nitekim yorgunluk sonrası kuvvetteki toparlanmanın pH'daki toparlanmadan daha önce olduğu gösterilmiştir^{30,45}.

Artan hidrojen iyonlarının kalsiyum iyonlarını troponinden ayırarak kas kasılmasını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir⁵⁰. Troponin molekülünün serbest kalması sonucu çapraz köprü oluşumu baskılandığından kas kuvveti de azalmaktadır. Artan hidrojen iyonları neticesinde kan pH'sının asit tarafa kayması santral sinir sistemi etkileyerek, ağrı hissinin yanı sıra bulantı ve koordinasyon kaybı gibi duylara neden olabilmektedir^{41,50}. Düşük pH O₂-Hb disosiasyon ilişkisini etkileyerek doku oksijenasyonunu da değiştirebilmektedir.

2.6.2. Enzimler

2.6.2.1. LDH

Laktat dehidrogenaz enzimi (LDH) pirüvik asit ile laktat moleküllerinin birbirlerine dönüşümünü sağlayan bir proteindir⁴³. LDH iki temel formu bulunur: LDH (M) kasta ve LDH (H) ise kalpte bulunur. Farklı beş izotipi tanımlanan LDH enzimlerinden LDH4 ve LDH5 kas ve karaciğer dokusunda yer almaktadır⁴³. Kas hücresindeki alt tipleri sitoplazmada, SR'da ve mitokondri yapısında bulunmaktadır. Son araştırmalarda LDH alt tiplerinin iskelet kası lif tiplerine göre farklılık gösterdiği ifade edilmiştir. Total LDH aktivitesi tip'II lerde tip I liflerden daha yüksek bulunmaktadır. Ayrıca kısa mesafe koşan atletlerde LDH enzim aktivitesinin uzun mesafe koşan atletlerden daha yüksek olduğu belirtilmektedir⁴³.

Kas hasarının oluştuğu yüklemelerde LDH enziminin kandaki konsantrasyonu artmaya başlamaktadır. Kas dokusundaki yıkımın fazla olduğu egzersizlerden 48-72 saat sonra LDH seviyesinin bazal seviyeye döndüğü bilinmektedir⁵¹.

2.6.2.2. CK

Kreatin kinaz enzimi PCr'in hidrolizini sağlayarak ADP'den yeniden ATP sentezlenmesini sağlayan bir enzimdir. Bu işlevi nedeni ile hücre içi ATP konsantrasyonunun sabit tutulmasında hayati önemi vardır. Bulunduğu dokulara göre **CK-MM** (iskelet kası), **CK-MB** (miyokard), **CK-BB** (beyin) olmak üzere üç farklı izoformu bulunmaktadır. İskelet kasındaki CK aktivitesinin % 99'unu CK-MM

izoenzimi oluşturur. Yorgunluk sürecinde kasta oluşan hasara bağlı olarak kas hücresi dışına CK enziminin çıktığı düşünülmektedir. Ortaya çıkan CK miktarı bireyin ırk, cinsiyet, yaş, egzersiz tipi ve form durumuna bağlı olarak değişebilmektedir. Kandan uzaklaştırılma hızı ise bireyin lenf akımına ve hasarın şiddetine göre değişebilmektedir. Egzersizi izleyen 24 saatlik sürenin sonunda en yüksek değerine ulaşan CK konsantrasyonu, 48 saatte düşmeye başlar ve 72 saat sonra egzersizden önceki bazal seviyesine geri döner^{52,53}. Kas hücrelerinin enzimlere ait geçirgenliğinin bireyler arası farklılık göstermesi, egzersiz sonrası elde edilen CK seviyeleri arasındaki değişikliklerin açıklayıcısı olabilir⁵⁴. Vücut kitle indeksi, kas lifi tipi ve kas kitlesi gibi unsurların CK seviyesi üzerinde belirleyici olabileceği de araştırma konularından bir tanesini oluşturmaktadır^{55,56}. Öte yandan tip II kas liflerinde meydana gelen kas hasarının tip I liflerine oranla daha fazla olduğunun gösterilmesi, CK artışının kişinin kas lifi dağılımıyla da ilgili olabileceğini düşündürmektedir⁵⁷.

Kreatin kinazın izoenzimlere sahip olduğu ve bu izoenzimlerin farklı hücre içi lokalizasyonlarda bulunduğu belirtilmektedir. Örneğin MM-CK çapraz köprülere yakın konumlanırken, Mi-CK ise mitokondri membranında bulunmaktadır. Kreatin kinazın farklı izoenzimlerinin hücrenin farklı yerlerinde konumlanması, PCr'in iskelet kası hücresinde farklı fonksiyonları olduğunu göstermektedir. Bu fonksiyonlardan en önemlisi ATP konsantrasyonunun devam etmesini sağlamasıdır. Ayrıca enerji aktarımı ve mitokondride oluşan ATP'nin miyofibrillere taşınmasında da etkisi olduğu bilinmektedir¹⁶.

2.6.3. Yorgunlukta Elektrolit Değişiklikleri

2.6.3.1. Na-K Değişiklikleri

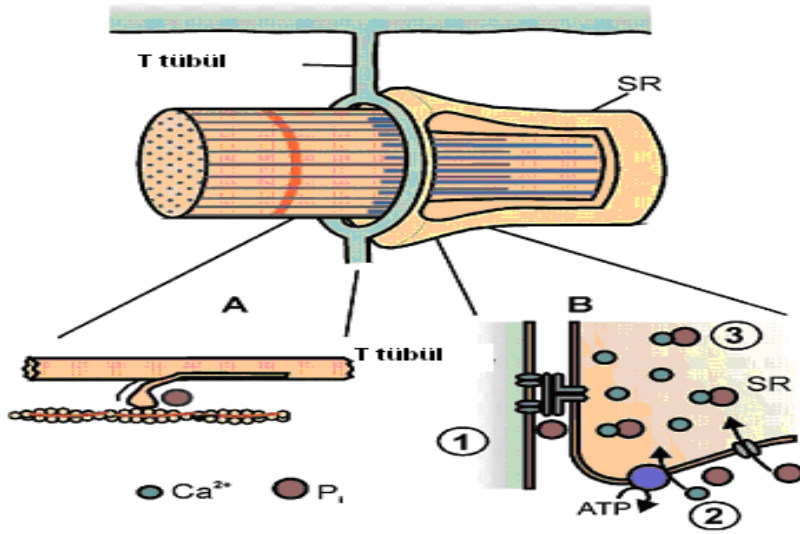
Tekrarlayan ardışık uyarılarda iskelet kasında iyon konsantrasyonlarında bazı değişimler meydana gelmektedir. Yüksek şiddetli ve uzun süreli aktivitelerde Na-K pompasının aktivitesi iyon dengesini koruyabilmede yetersiz kalmaktadır^{28,58}.

Yüksek frekanslı sürekli uyarılarda T tübüllerde K^+ birikmesi ve Na^+ azalması görülür. K^+ konsantrasyonundaki artma depolarizasyonu yavaşlatır ve Na^+ kanallarını inaktive eder. Bu nedenle K^+ konsantrasyonundaki değişiklikler eş zamanlı olarak

kuvvette azalmaya neden olur. Öte yandan Na^+ konsantrasyonunun azalması da aksiyon potansiyelinin genliğini azaltır ve ilerleyen süreçte SRdan Ca^{+2} salınımı baskılanır²⁸.

2.6.3.2. İnorganik Fosfat

P_i hem ATP'nin hidrolizi ve hem de PCr yıkımı sonrasında ortaya çıkan bir son üründür³⁵. Egzersiz sırasında P_i artışının meydana gelmesi beklenen bir sonuç olarak yorumlanabilir. Öte yandan soyulmuş kas çalışmalarında P_i artışının kuvveti azalttığı görülmüştür. P_i artışı myofibrillerin Ca^{+2} 'a karşı duyarlılığını azaltarak, SR'dan Ca^{+2} salınımını baskılamakta ve miyofibrillerin kuvvet üretimini azaltmaktadır^{38,39,46}. P_i artışının Ca^{+2} üzerine etkileri en çok araştırılan konulardan biridir.



Şekil 2.10: Yorgunlukta P_i nin kas fonksiyonuna etkileri. A: miyofibrillere direkt etki ederek çapraz köprü oluşumunu ve miyofibrillerin Ca^{+2} duyarlılığını azaltması B: SR üzerine olan etkileri 1: Yorgunluğun başlarında P_i artışı SR'dan Ca çıkışını artırabilir 2: ATP bağlı SR'a Ca^{+2} geri alımı azalabilir 3: Yorgunluğun sonlarına doğru SR'a giren Ca^{+2} miktarı azalabilir⁴⁷.

Şekil 2.10'da P_i 'ın kasılma üzerindeki etkileri görülmektedir. Literatür bilgilerine göre P_i SR Ca^{+2} kanallarına doğrudan etki ederek hücre içi Ca^{+2}

konsantrasyonunun artmasına neden olmaktadır. Ayrıca SR'a Ca^{+2} 'un yeniden alımını baskılayarak mitokondri gibi organellerde Ca^{+2} birikmesine yol açmaktadır.

P_i 'ın SR'a girerek burada Ca^{+2} - P_i çöküşüne yol açtığı ve bu sayede gevşeme için gereken Ca^{+2} iyonlarının azalmasına neden olduğu da ifade edilmektedir⁴⁵. İn vitro deney düzeneklerinden elde edilen bilgilere göre P_i , miyozin başının aktin molekülüne bağlanmasını zayıflatmaktadır. Ancak bu bulgunun in vivo koşullardaki yansımasının ne oranda olduğu ayrıntılarıyla anlaşılmış değildir^{38,39,45,49,60}.

2.6.3.3. Kalsiyum İyonları

Yapılan çalışmalar iskelet kasında yorgunluktan sorumlu etkenlerden birinin de kalsiyum iyon dengesindeki değişimlerin olduğunu göstermektedir. Yorgunlukta artan P_i SR'a girerek Ca^{+2} salınımını baskılamasının yanında, enerji desteğinin azaldığı durumlarda Ca^{+2} 'un yeniden SR'a pompalanması azaldığından serbestlenen Ca^{+2} miktarı da azalmaktadır. Yorgunluk sürecinde Ca^{+2} 'u tamponlayan mekanizmaların doygunlaşması da görülebilmektedir. Miyoplazmada Ca^{+2} bağlayan troponin ve parvalbumin molekülleri tetaniler sırasında yüksek oranda Ca^{+2} bağladığı için SR'dan salınan Ca^{+2} iyonları miyoplazmada birikmeye başlar. Ancak bu tablo hücre içi Ca^{+2} artışını açıklamalarına rağmen gerimin azalmasını tek başına açıklamaz. Hücre içi pH değişikliklerinin Ca^{+2} 'un troponin C'ye bağlanmasını azalttığı, yorgunlukta artan P_i iyonlarının da miyofilamentlerin Ca^{+2} 'a duyarlılığı azalttığı hatırlanmalıdır. Son olarak yorgunlukta Ca^{+2} iyonlarının yeniden SR'a pompalayan pompa aktivitesi azaldığından gevşeme süresi uzamakta ve SR'da depo Ca^{+2} miktarının azalmasına neden olmaktadır^{25,30,30,38}.

2.7. Farklı Kas Liflerinde Yorgunluk

Tip I lifler aerobik lifler olup yağları da metabolize edebilirken, tip II lifler anaerobik olarak glikojenolizi gerçekleştirirler. Kas lifi tipleri arasında metabolik süreçleri yanında yorgunluk açısından da farklılıklar vardır. Tip I lifler yorgunluğa dayanıklı iken tip II lifler daha çabuk yorulabilir niteliktedir. Egzersizin şiddeti

anaerobik metabolizmanın baskın olduğu tip II liflerin aktiviteye katılımını gerektirmeyecek şiddette olduğunda birey yorulmadan daha uzun süre aktiviteye devam edebilmektedir^{5,28}. Ancak egzersiz şiddetinin artmasına bağlı olarak anaerobik metabolizmanın da etkinleşmesi nedeni ile yorgunluk daha erken ortaya çıkmaktadır²⁸.

Anaerobik liflerde yorgunluk nedenleri arasında şimdiye kadar sıralanan faktörlerden metabolit birikimleri (LA, H⁺, P_i, ADP) ve enerji kaynak sınırlaması (ATP, PCr, glikoz, glikojen) etkindir. Aerobik liflerde ise reaktif oksijen türlerinin yanı sıra uzun süreli devam eden kasılmaların uzun süreli yorgunluğa neden olan kas hasarının baskın yorgunluk nedeni olduğu bilinmektedir⁵¹.

2.8. Yorgunlukta PO₂ Etkisi

Aerobik metabolizmanın en önemli unsurlarından birisi dokunun oksijen (O₂) ihtiyacı olup, O₂ azaldığı durumlarda tepkimeler yavaşlar veya durur. Kan akımı doku O₂ desteğini sağlaması nedeni ile özel bir öneme sahiptir⁵¹. Yapılan çalışmalarda kasılmalar sırasında kan akımının yavaşladığı ve gevşeme sırasında ise arttığı gösterilmiştir^{25,65}. Dinlenimde ve ılımlı egzersizlerde beynin perfüzyonu tamdır ve serebral oksijenlenme yeterlidir. Ancak yüksek şiddetli egzersizlerde hiperventilasyon sayesinde perfüzyon artmasına rağmen arteriyel oksijen açığı tam olarak kompanse edilemez^{51,65}.

2.8.1. Düşük PO₂ ve Motor Performans

Herhangi bir nedenle iskelet kas dokusunun oksijenlenmesinde meydana gelen aksamalar beraberinde kas performansını da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumda üretilen iş miktarı düşer. Kaslara O₂ desteğinin azalması metabolitlerin birikmesini hızlandırarak bir yandan metabolik süreci baskılar ve diğer yandan da merkezi sinir sisteminde inhibitör yanıtın oluşmasını sağlar^{25,51,65}.

Birçok çalışmada uzun süreli egzersizlerde (1-2 saat) santral yorgunluk görülmesi ile beynin oksijenlenmesi ilişkilendirilmektedir.

2.8.2. Egzersizde Serebral Oksijen Dağılımı

Uzun süre devam eden statik veya dinamik kasılmalar sırasında SSS'deki motor alanda kasılmayı sağlayan nöral deşarjda artış meydana gelmektedir⁶⁷. Her koşulda (hem dinlenim ve hem de egzersiz sırasında) hipoksiye duyarlı olan santral sinir sisteminin egzersiz sırasında aktivitesi arttığı için O₂'ye olan gereksinimi de artar. Nitekim artan O₂ ve glikoz ihtiyacını karşılamak için egzersiz sırasında beyin kan akımı da artar. Bu artışın egzersizin şiddeti ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir. Ancak maksimal yüklenmeler sırasında birçok farklı yöntemle (ultrasound dopler gibi) beyin kan akımının baskılandığı gösterilmiştir^{22,25,51,66,67}. Maksimal O₂ tüketiminin %60 ının üstünde yapılan yüklemelerde beyin kan akımının azalmaya başladığı ifade edilmektedir²². Özellikle de hipertermik koşullarda yapılan egzersizlerde görülen kan akımının azalmasına bağlı olarak da maksimal egzersizlerde beyin dokularında hipoksi gelişebildiği belirtilmektedir^{65,67,22}. Söz konusu bu değişikliklerin SSS işlevlerini olumsuz etkilediği ifade edilmektedir^{25,66}.

2.8.3. Reaktif Oksijen Türleri (ROS)

Reaktif oksijen türleri ile ilgili çalışmalar hızla artmaktadır. Ancak bunların yorgunlukla ilişkilerinin hangi mekanizmalarla olduğu kesin değildir. Oksijen tüketimi arttığında vücutta artan reaktif oksijen türlerinden en önemlileri süperoksit (O₂⁻), hidrojen peroksit (H₂O₂) ve hidroksil radikalleridir (OH⁻). Ayrıca nitrik oksit süperoksit ile etkileşime girerek peroksinitrit (ONOO⁻) reaktif nitrojen türlerine neden olmaktadır. Süperoksit mitokondride oksidatif fosforilasyon sonucu oluşmaktadır. Süperoksit hızla süperoksit dismutaz (SOD) tarafından hidrojen perokside yıkılır. Süperoksit negatif yüküne rağmen membrandan kolayca geçemez ve anyon kanallarından veya voltaja bağlı anyon kanallarından geçer²⁵.

Reaktif oksijen türlerinin hücrenin biyokimyasal bileşenleri olan protein, lipid ve DNA yapılarında değişimlere neden olabileceği, hücrede başlıca potasyum olmak üzere taşıma sistemlerini etkileyerek yorgunlukta etkili olduğu ifade edilmektedir⁶⁷.

2.9. Yorgunluğun Değerlendirilmesi

Yorgunluk bireyin form durumuna ve yüklenmenin şiddetine göre değişkenlik gösteren bir niteliğe sahip olup, nesnelleştirilmesi için farklı ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Yorgunluğun niceliğini anlamak için biriken son ürünler, tükenen maddeler, kas yapısında meydana gelen değişikliklerin mikroskobik incelenmesi, beyin ve kasın farklı görüntüleme metodları ile görüntülenmesi gibi pek çok yöntem kullanılmaktadır. Ancak en yaygın ölçümler arasında maksimal kasılma kaydı alarak yorgunluğun gözlenmesi, maksimal kasılma sırasında EMG değişimlerinin gözlenmesi ve kasa dışarıdan elektriksel uyarı verilmesi bulunmaktadır.

2.9.1. EMG Ölçümlerinin Yorgunluğun Değerlendirilmesinde Kullanımı

EMG (elektromyografi) kasın elektriksel aktivitesini kaydeden bir yöntem olup, bu sayede kasa gelen motor yoldaki değişikliklerin kasın elektriksel aktivitesine yansımaları yorumlamak mümkün olabilmektedir. Yüzeyel veya iğne elektrotları kullanıldığı bu yöntemde, bir (monopolar) veya iki (bipolar) elektrot kullanılır. Bipolar EMG kaydında iki elektrot arasındaki potansiyel farkı kaydedildiğinden daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Kas kasılması sırasında EMG kaydında gözlenen potansiyellere motor ünite aksiyon potansiyeli (MUAP) adı verilir. MUAP, motor sinir, sinir-kas kavşağı ve kastan oluşan motor birimin bütünü hakkında bilgi verir⁶⁸. α motor nöronlarla kasa ulaşan aksiyon potansiyeli, depolarizasyon eşiğini aştığında kasta kasılma meydana gelir. Bu sırada kaydedilen elektriksel potansiyel tek bir motor birimdeki bütün kas fibrillerine ait aksiyon potansiyellerinin uzamsal ve uzaysal olarak cebirsel toplamını ifade eder⁶⁹.

EMG kaydındaki sinyaller kas lifinin çapına, adipoz dokunun miktarına, elektrot ve amplifier özelliklerine, gürültüye, elektrotlar arası mesafeye ve filtreleme özelliklerine göre değişmektedir⁶⁹.

Kasılmanın devam edebilmesi motor ünitelerin ardışık olarak aktive edilmesini gerektirir. Bu da literatürde motor ünite aksiyon potansiyelleri treni (MUAPT) olarak isimlendirilmektedir⁶⁸. Kasılma sırasında alınan EMG kayıtlarında, bu trenlere ait oldukça karmaşık veri sözkonusudur. Bu yüzden kasılma sırasında alınan verilerin bazı

işlemlere tabi tutularak amaca uygun hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalardan ilki kasılma sırasında binlerce sayıdaki dalganın kasılma frekansını elde etmek için hızlı Fourier dönüşümü yapmaktır. Bu analiz yöntemi ile bütün kasılma süresi sırasındaki dalgaların frekansı zamana bağlı olarak elde edilebilmektedir.

EMG analizinde kullanılan yöntemlerden birisi de integrasyondur. İntegre EMG (IEMG) kasın elektriksel aktivitesinin büyüklüğünü göstermesi açısından önemli olup, EMG sinyalinin altında kalan alanı hesaplamaktadır. Nitekim submaksimal kasılmalarda IEMG maksimal kasılmalardan daha düşük kaydedilmektedir. Kasa ulaşan elektriksel akım EMG kaydını alan elektrota yaklaştığında pozitif, uzaklaştığında ise negatif dalgalar kaydedilir. İntegre EMG hesaplamasında dalgaların bu vektöryel farklılığını ortadan kaldırmak için elektriksel sinyalin hem pozitif ve hem de negatif dalgalarda katettiği toplam alan hesaplanır. EMG analizinde kullanılan bir diğer parametre de RMS (Root Mean Square) yani karelerin ortalamasıdır. EMG sırasında kaydedilen pozitif ve negatif dalgaların karelerinin karekökünü alarak hesaplanan ve yine integré EMG gibi toplam EMG aktivitesi hakkında bilgi veren bir işlemdir. Bazı araştırmalar EMG aktivitesinin büyüklüğünü değerlendirmek için IEMG hesaplamasını kullanırken bazıları da RMS değerlerini esas almaktadır.

Bir kasın kasılma sırasındaki EMG kaydı yorgunlukta bazı değişimler gösterir. Bu değişikliklerin başında ateşleme frekansındaki azalma göze çarpar. Nitekim izometrik kasılmaların ilerleyen dönemlerinde mean veya median frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda kas biyokimyasında meydana gelen değişikliklerin EMG örüntüsünü etkilediği gösterilmiştir. Yorulan kaslarda EMG kaydında genliğin azaldığı ve median frekansın düştüğü görülmüştür^{69,70,126}. Yapılan çalışmalarda ortalama frekanstaki azalmanın iki aşamada olduğu görülmüştür. Birinci aşamada doğrusal bir azalma göze çarpmaktadır. İkinci aşamada frekanstaki azalmanın platoda kaldığı ve bir süre bu ateşleme frekansında devam ettiği görülmektedir. Nitekim mean frekanstaki bu iki faz farklı araştırmacılar tarafından izometrik, izokinetik, dinamik, yokuş yukarı koşu ve bisiklet egzersizlerinde gösterilmiştir⁷⁰.

Mean veya median frekansın azalması kasta AP iletim hızının azaldığını gösterir ve bunun da kasta biriken metabolitleri yansıttığı düşünülmektedir. EMG aktivitesindeki değişiklikler yorgunluğa oldukça duyarlıdır ve yorgunlukta en belirgin EMG değişikliği frekansın azalmasıdır^{69,126}.

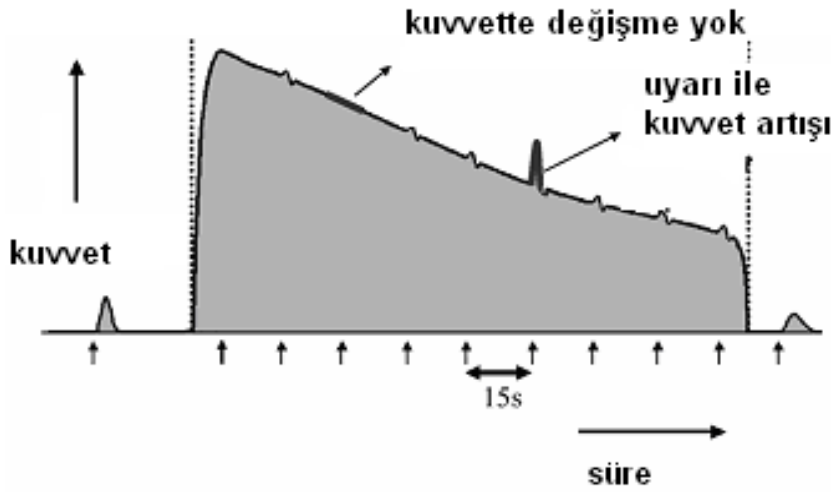
Maksimal kasılma sırasında kişinin motor idareyi artırmak gibi bir şansı yoktur ancak submaksimal kasılma sırasında kuvvetteki periferik nedenlerle olan azalma değişim oranının artması ile veya yeni motor ünitelerin aktifleşmesi ile baskılanabilmektedir⁷¹.

2.9.2. Maksimal İstemli Kasılmaların (MVC) Yorgunluğun Değerlendirilmesinde Kullanımı

Kasın üretebildiği maksimal kuvvet, tanımı gereği maksimal istemli kasılma (maximal voluntary contraction=MVC) sırasında kaydedilen en büyük kuvvet değeri ile nesnelleştirilir. Çapraz köprülerin etkileşimi sırasında kas boyunda değişikliğin olmadığı izometrik kasılmalar MVC ölçümü için ideal kasılmalardır. Bu nedenle MVC ölçümleri genelde izometrik kasılma sırasında ölçülmektedir. MVC’de elde edilen kas kuvvetini kas lifinin kuvvet üretebilme kapasitesi ile motor birimin aktivasyon özellikleri belirler³⁴. Antrenmanlar sonrası MVC artışı kontraktıl elemanlardaki adaptasyonların yanı sıra motor birimlerin aktivasyonunda da gelişme olduğunu göstermektedir. Motor birimlerdeki değişiklikleri EMG, interpol sarsıları ve tetanik kuvvetin MVC’ye oranları ile gözlemlemek mümkün olabilmektedir.

2.10.3. Elektrik Uyarılarının Yorgunluğun Değerlendirilmesinde Kullanımı

Yorgunluktaki farklı mekanizmaları anlamak için kullanılan yaygın tekniklerden bir tanesi de, kişiye dışarıdan supramaksimal elektrik uyarısı verilerek elde edilen kuvvet değerini istemli maksimal kasılma sırasında kaydedilen kuvvetle karşılaştırmaktır. İstemli maksimal kasılmalar sırasında elektrik uyarısı verilirken bazı noktalara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunların başında katılımcıların çok iyi motive olmaları gelmektedir. Motivasyon eksikliği maksimal yanıtı almayı engelleyebilmektedir. Ayrıca kasılmayı yapacak olan kişilere hem maksimal izometrik kasılma ve hem de elektrik uyarısı tanıtılmalı, ölçümden günler önce denemeler yapılmalıdır.



Şekil 2.11: 2 dk süren izometrik sarsı uyarısı verildiğinde, kas yorgun değilken kuvvette herhangi bir değişme olmaz. Ancak yorgunlukla beraber dışarıdan verilen uyarı ile kuvvette artış kaydedilir⁷².

Dışarıdan verilen elektrik uyarısı ya tek bir sarsı veya kısa tetaniler meydana getirmektedir. MVC elektrik uyarısına rağmen kas kuvvetinde bir artış olmaması, kas kuvvetindeki artışın periferik etkenlerle ortaya çıktığına işaret etmektedir^{33,71}. Buna karşın santral yorgunlukta yetersiz bir nöral aktivasyon söz konusu olduğundan dışarıdan verilen herhangi bir uyarı kasta kuvvet artışına yol açar. Periferik yorgunluk ise sinir sistemi tarafından optimal uyarı sağlandığı halde kuvvet veya gücün azalmasıdır⁵.

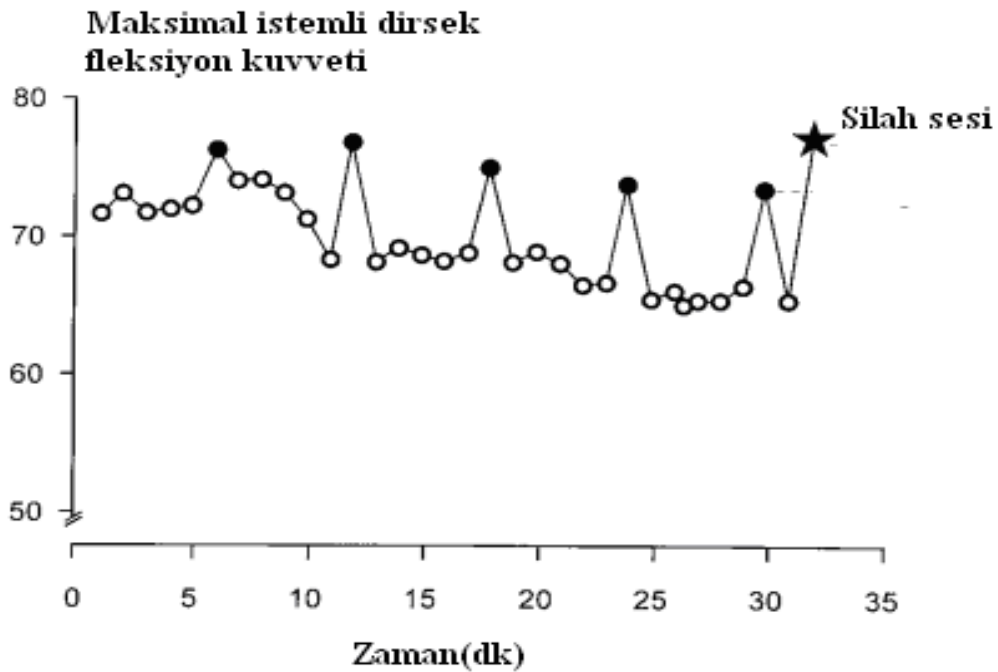
Çizelge 2.1: İstemli kasılmalar ile elektriksel uyarı ile meydana gelen kasılma arasındaki farklılıklar⁷³.

İstemli Kasılma	Elektriksel uyarı ile elde edilen kasılma
Etkinleşmede büyüklük prensibi var. Önce tip I sonra II aktive olur.	Tip II lifler daha önce aktive olur.
Asenkron depolarizasyon vardır.	Senkron depolarizasyon vardır.
Aralıklı ve daha düşük frekanslı uyarılar gözlemlenir.	Sürekli ve yüksek frekanslı uyarılar oluşturulabilir (stimulatorün uyarı frekansına bağlı olarak)

Tartışılması gereken bir konu da istemli kasılma ve elektriksel uyarı sonrası meydana gelen kontraktıl yanıtlar arasındaki farklılıklardır. Bu konuda araştırmacıların

deney düzeneklerinde farklı protokoller kullanmalarından dolayı tek bir yanıt vermek mümkün olmamıştır. Ancak bu iki kasılma arasındaki farklılıkları Çizelge 2.1'deki gibi özetlemek mümkündür⁷³.

Santral yorgunluk savını öne süren araştırmacılar, yorgunluğun oluşabilmesi için motor yolaktaki bir aksamın yeterli olabileceğine odaklanmaktadır. Bu çerçevede kastaki reseptörler, SSS'deki motor yolakla ilgili nöral şebeke, duysal korteks, spinal kord, α motor nöronlar, motor son plak ve serebellumun ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekir. Ancak egzersiz sırasında SSS işleyişini bütün bu basamaklar açısından doğrudan gözlemlemek mümkün olmamaktadır. Bu nedenler bazı araştırmacılar yorgunluğu incelerken kasın kendisine odaklanmışlardır. Yorgunluğun periferik kaynaklı olabileceği görüşüne göre tamamen motive olan kişilerde ölçülen kas kuvvetindeki azalmanın kaynağı kasın kendisidir. Ancak kastan ve eklemlerden kalkan ağrı duyusu kişinin egzersizi tolere etmesini etkilediğinden yorgunluk algısında SSS önemi tartışmasıdır. Bazı araştırmalarda kasın veya sinirin dışarıdan elektrik uyarısı ile uyarıldığında kuvvetin artabileceği gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Dışarıdan beklenmeyen bir uyarının kasılma kuvvetine etkisi. Boş daireler kontrol kasılmaları, dolu daireler beklenmeyen uyarıyı işaret etmektedir, yıldızla işaretli noktada silah sesi ile sözel motivasyon eş zamanlı olarak verilmiştir⁷⁴.

Daha da ilginç aralıklarla maksimal kasılma kuvveti alınan ve zaman içinde kas kuvvetinin yorgunlukla azaldığı gözlemlenen bir araştırmada (Şekil 2.12) kişiye işitsel güçlü uyarı verildiğinde, kasılma kuvvetinde kaydedilen artış SSS'nin yorgunluk sürecinde önemli işlevleri olabildiğine işaret etmektedir^{72,74}.

Literatürde geçen tüm bu bilgiler ışığında herhangi bir nedenle kası tama yakın aktive edemeyen bireylerde, dışarıdan verilen uyarılarla kasılma kuvvetinde bir artış kaydedilebileceğini söylemek mümkündür. Ancak aktivasyondaki yetersizliğin nedeni, her koşulda motivasyon eksikliği olmayabilir. Bu durum kasın kendisini aşırı yükleme sonrası koruyabilmesi için gerekli bir savunma sistemi olarak da yorumlanabilir⁷².

Santral yorgunluk başlığı altında tartışılan terimlerle ilgili liste çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Elektrik uyarısı ve kas kuvvetini değerlendirmede kullanılan tanımlar⁴.

Terim	Tanım
Maksimal istemli kasılma (MVC)	Deneğin üst düzey motivasyon ile üretebildiği en yüksek kuvvet değeri
Maksimal aktive edilebilir kuvvet	Bir kas veya kas grubu tarafından üretilen ve dışarıdan elektrik uyarısı verildiğinde kuvvet artışın olmaması
Maksimal güç çıktısı	Deneğin üst düzey motivasyon ile maksimal kasılma yaparken ürettiği en yüksek güç çıktısı
Kas yorgunluğu	Egzersiz sırasında ya da sonrasında kuvvet veya güç kaybı gözlemlenmesi
Santral yorgunluk	MVC kuvvetindeki azalmanın elektriksel uyarı ile toparlayabilmesi

2.11. Farklı Egzersizlerde Yorgunluk Oluşumu

Yorgunluk bireyin form durumunun yanı sıra uyguladığı yüklenmenin çeşidine ve şiddetine göre değişebilmektedir. Bir 100 metre yarışı ile maraton koşusunda meydana gelen yorgunluk bulguları farklılık göstermektedir. Bu açıdan kullanılan metabolik yol (aerobik-anaerobik), biriken son ürünler, tükenen enerji kaynakları, kasta meydana gelen hasar gibi yorgunluk bulgularına farklı yansımaktadır.

2.11.1. Anaerobik Yüklemeler ve Yorgunluk İlişkisi

Anaerobik yolun etkin olduğu aktiviteler kısa süreli maksimal yüklemelerin yanısıra daha uzun süreli anaerobik glikolizin kullanıldığı yüklemelerden oluşur. Her iki durumda da yorgunluğun tanımından da anlaşıldığı üzere maksimal kuvvet veya güç çıktısı sürdürülemeyip zaman içinde azalma gösterir. Elit bisiklet sprinterlerinde bisiklette yapılan çalışmalarda sporcuların maksimum güce 3-4 sn içinde ulaşabildikleri ve daha sonra gücün azaldığı görülmüştür. Sprint koşucularında ise yaklaşık 4-5 sn sonra sprint hızının azalmaya başladığı görülmüştür¹⁶.

Bazı spor dallarında yüksek yoğunluklu aktiviteler birkaç dakikadan uzun sürebilmektedir¹⁶. Bu türdeki yüklemelerde anaerobik metabolizmanın son ürünü olan LA konsantrasyonu da artmaktadır. Dolayısı ile orta mesafe koşuları gibi anaerobik yolağın etkin olduğu yüklemelerde, yorgunluğu glikolizin son ürünü olan laktik asit birikiminin artması ile tartışmak mümkündür. Pek çok egzersiz koşulunda PCr deposunun tamamen boşalmadığı, örneğin 6 sn süren bir sprint sırasında kas PCr konsantrasyonunun başlangıça oranla yaklaşık olarak % 57 kadar, ATP miktarının ise % 13 kadar azaldığı bulunmuştur^{16,17}. Hipotetik olarak aynı şiddetteki egzersizin devamı durumunda PCr depolarının 10 saniyede, ATP depolarının ise 46 saniyede tamamen tükenmesi gerekir. Ancak 30 saniyelik maksimal bir sprintte ATP konsantrasyonun % 40, PCr konsantrasyonun ise % 70 oranında azaldığı kaydedilmiştir²¹. Bu durumda daha sonraki aşamalarda devreye giren anaerobik glikolizin ATP desteğini sağlayıcı etkisi ön plana çıkmaktadır. Nitekim 6 sn'lik maksimal sprint yüklemesi sırasında dahi kas glikojenin yaklaşık olarak %14 oranında azaldığı gösterilmiştir²¹. Futbol, basketbol gibi

ara dinlenmeli sporlarda fosfajen sistemin anaerobik glikoliz yanında ATP desteğini sağlamada önemli role sahip olduğunu söylemek mümkündür²¹.

Enerji kaynaklarındaki azalmanın yanında biriken son ürünlerin de yorgunluk sürecinde kuvvet veya güç üretiminde baskılayıcı etkilerinin olduğu bilinmektedir. ATP ve PCr hidrolizi ile artan P_i , uyarılma-kasılma eşleşmesini olumsuz etkilemektedir. 1-5 dk süren yüksek yoğunluklu egzersizlerde pH'nın asit tarafa kayması yorgunlukla ilişkilendirilmektedir¹⁶. pH'nın düşmesi Ca^{+2} 'un SR dan salınımını azaltmakta ve Ca^{+2} 'un yeniden SR'a alınımını baskılamaktadır. Artan aksiyon potansiyelleri sonucu hücrenin dinlenim membran potansiyelinin değişmesine neden olan ekstraselüler K^+ artışının da yorgunlukta kuvvet üretimini baskılayıcı etkilerinin olduğu gösterilmiştir¹⁶.

Anaerobik metabolizmanın etkin olduğu maksimal şiddetli kısa veya daha uzun süreli yüklemelerde lif tipleri de önem taşımaktadır. Anaerobik lifler olarak bilinen tip II liflerde fosfajen azalmasının daha yüksek olduğu belirtilmiştir¹⁶. Nitekim toparlanma sırasında da kas liflerinin PCr yeniden sentezi bu liflerde daha fazla olmaktadır.

2.11.2. Aerobik Yüklenmeler ve Yorgunluk İlişkisi

Sporcular maksimal şiddetlerine yakın egzersiz yoğunluğundaki aktiviteye birkaç dakikadan fazla devam edemez. Ancak anaerobik eşik noktasının daha yüksek O_2 alım değerlerine yaklaştığı üst düzey atletler 5000 metre yarışını VO_{2max} 'a yakın şiddette koşarlar¹⁶.

Yüksek egzersiz şiddetinde yağlar değil karbonhidratlar etkin metabolizma kaynağı olduğundan uzun süreli ve yüksek şiddetli yüklenmelerde depo glikojen azalması yorgunlukta önemli rol oynar. Ayrıca maraton gibi uzun süreli yüklenmelerden sonra oluşan yorgunlukta iskelet kas bütünlüğünün bozulmasını içeren kas hasarının olduğu ve bazı inflamasyon bulgularının arttığı ifade edilmektedir. Reaktif oksijen türleri de aerobik yüklenmelerle görülen yorgunlukla ilişkilendirilmektedir.

Maraton koşucularının önemli bir özelliği sprint koşucularına oranla daha düşük izometrik kuvvete sahip olmalarıdır. Bunun olası nedeni kas kitlesi ve lif tipleri arasındaki farklılıklardır. Fiziksel aktivite örüntüsünün yüksek ve düşük şiddetteki yüklenmeleri içerdiği sportif branşlarında hem aerobik ve hem de anaerobik metabolizmanın üst düzeyde olması beklenir. Dolayısıyla bu tür aktivitelere katılan

sporcuların yorgunluğu söz konusu metabolik süreçleri bir arada değerlendirilerek yorumlanmalıdır.

2.12.Antrenmanlarla Yorgunluğa Karşı Gelişen Adaptasyonlar

Antrenman, organizmada fonksiyonel ve/veya morfolojik değişimler sağlayan ve bireyin sportif veriminin yükseltilmesi amacıyla belirli zaman aralıkları ile uygulanan yüklenmelerin bütünüdür⁷⁷. Bir diğer genel tanımlamada ise antrenman; “sportif performansın gelişmesi için sistematik ve düzenli aralıklarla yapılan egzersizlerin bütünü” olarak kabul edilmektedir⁷⁸. Antrenmanlara uyumun sağlanması vücudun ilgili organ sistemlerinin gelişmesi ile mümkündür. Bu fizyolojik sürecin açılımını vücudun gelişmesi olarak da ifade etmek mümkündür. Doğru uyaran örüntüsünün yaratacağı sonuç sportif performansın gelişmesidir. Bireyler arasındaki farklılıklar esas alındığında, antrenmanın bileşenleri olan kapsam, şiddet ve sıklık ile ilgili değişiklikler, sporcunun fizyolojik kapasitesine göre değiştirilmelidir^{77,79,80}.

Performansı geliştirebilmek için antrenmanlarla pozitif adaptasyonlar sağlanmalıdır. Ancak bunlar antrenman unsurlarının düzenli ayarlanması ile mümkün olabilir. Antrenmanın frekansı, süresi veya şiddetinin aşırı artırılması işlevsel bozulmalara yol açarak performansın gelişimini engeller⁸¹. Nitekim antrenmanların amacı uygun uyaranlarla (egzersiz de vücut için bir stres uyaranıdır) uyum sürecini tetiklemektir. Egzersiz vücudun normalde alışkın olduğu yükten daha fazlasını içeren yüklenmelerle homeostaziyi bozar ve yorgunluk yaratır. Bu yüklenmelere verilen uyum yanıtı vücudun daha şiddetli yüklenmelere yanıt verebilmesini sağlayan fizyolojik değişimleri tetikleyerek performansı geliştirir. Yapılan çalışmalarda form seviyesi düşük sporcuların performanslarının hızlı geliştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yüklenmelere verilen yanıtta antrenman yaşı, fiziksel, psikolojik ve genetik özellikleri yanında yüklenmeyi tolere edebilme kapasitesi bireyler arasındaki farklılığın temel nedenleri arasında sayılabilir⁸¹. Bu nedenle iki ayrı birey aynı antrenman uyarısına farklı yanıtlar verebilmektedir.

Antrenmanın şiddetini fiziksel aktivitenin düzeyi, süresi ve uygulama sıklığı belirler. Şiddet birim zamanda gerçekleştirilen motor sinir deşarjı ile doğrudan ilintili olup, yük, hız ve tekrarlar arası dinlenme süresine bağlı olarak değişir^{77,79,80,81}. Antrenmanlarda

kullanılan ağırlık, hız, sıçrama yüksekliği, kat edilen mesafe gibi değişkenlerin değerlendirildiği antrenman modaliteleri, antrenmanın şiddetini belirlemede kullanılan referans değişkenlerinden bazılarıdır^{77,81}. Spor dalına özgü temel beklentiler yaptırılacak antrenmanın şiddeti üzerinde belirleyici olur.

Antrenmanın kapsamını ise antrenmanın bir evresi boyunca yapılan işin toplamı oluşturur. Kat edilen mesafe, ağırlık kaldırma ve tekrar sayısı gibi değişkenler bu bileşenin unsurları olarak kabul edilir^{77,79,81}. Antrenman programlarının başlangıç aşamasında bireylerden istenilen temel özellik, belirli bir iş yükünü gerçekleştirebilecek yeteneği kazandırmaktır. Bu amaçla öncelikli olarak antrenmanın kapsamı artırılarak sporcunun belirli bir işi yapabilir hale gelmesi sağlanır. İlerleyen aşamada ise antrenman şiddeti değiştirilerek sporcuların birim zamanda daha verimli iş yapabilmelerini sağlamak ve bu anlamdaki yeteneklerin geliştirmek amaçlanır. Antrenmanın kapsam ve şiddeti, spor dalına özgü genel karakteristikler ve sportif performans beklentileriyle uyumlu olacak şekilde ayarlanır. Genel özellik olarak sporcular yüksek şiddetli, düşük kapsamlı yüklenmeleri ancak kısa süreler için tolere edilebilir. Bu tür antrenmanlar performans anlamında daha çok anaerobik kapasitenin ön planda olduğu spor branşlarında, direnç ve hızı geliştirmek amacıyla yaptırılır. Aksine şiddeti düşük kapsamı geniş antrenmanların yaptırılması aerobik kapasiteyi geliştirirken, özellikle dayanıklılık gerektiren spor branşlarında performans beklentilerini karşılamak anlamında önem taşır^{78,80,81}. Antrenman bütünlüğü içerisinde kaliteyi artırabilmek için antrenman şiddeti ve kapsamını bir bütün olarak değerlendirmek gerekir. Genel prensip olarak antrenmanın şiddeti ve kapsamı ters orantılıdır. Yarışma döneminin yaklaşmasıyla beraber kapsam kademeli olarak azaltılırken, yüklenme şiddeti arttırılır^{77,80,81,82}.

2.12.1. Antrenmanlara Aerobik Adaptasyonlar

Ancak uygun antrenman yöntemi ile üst düzey atletik performans sahibi sporcular maksimal veya submaksimal yoğunluktaki yüklenmelere diğer yarışmacılardan daha uzun süre devam edebilirler. Bu sporcularda gözlenen yorgunluğun ortaya çıkma zamanı yüklenme çeşidine göre değişir ve dayanıklılık performansını etkiler. Yorgunluk algısını daha geç hisseden sporcu daha uzun süre yüksek performans

sergileyebilecektir⁸¹. Bu sporcularda aerobik metabolizma geliştiğinden anaerobik eşik daha geçtir²².

Uzun süreli fiziksel aktivitelerin yapıldığı sportif branşlarda başarılı olabilmek için oksidatif kapasitenin yüksek olması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda dayanıklılık performansı ile VO_{2max} arasında ilişki olduğu gösterilmiştir. Bu anlamda oksidatif süreçten sorumlu tüm organ sistemlerinin en üst düzeyde etkinlik kazanması gerekir. Aerobik yüklenmelerin oksidatif lif miktarını artırdığı, liflerin mitokondri konsantrasyonunu artırdığı ve oksidatif metabolizmada etkin enzim aktiviteleri üzerinde pozitif etkilerinin olduğu ifade edilmektedir.

2.12.2. Antrenmanlara Anaerobik Adaptasyonlar

Genelde sprint ve direnç yüklemeleri gibi anaerobik antrenmanlardan sonra pik güç ve anaerobik kapasitede artış kaydedilmektedir. Bu gelişme kas hücrelerinin uyum yanıtını açıklayabilecek metabolik değişiklikler yanında, motor yolaktaki değişimlerle de açıklanabilir. Bu tarzdaki yüklenmeler sırasında ağırlıklı olarak tip II lifleri göreve çağırırlar. Antrenman dönemi sonunda tip II liflerin kesit alanında artış görülmesi metabolik uyumun bir sonucu olarak yorumlanabilir. Öte yandan bu yüklemelerden sonra tip I liflerin kesit alanında artış kaydedilmez. Bu nedenle hızlı/yavaş lif oranında artış meydana gelir. Bazı araştırmalar²² sprint antrenmanlarından sonra tip II liflerinin oranında artış yanında tip I liflerde azalma ifade etmişlerdir.

Anaerobik antrenmanlardan sonra ATP-PCr ve anaerobik glikolitik enerji sisteminde anaerobik performansın gelişimiyle uyumlu olarak artış gözlemlenir. Kısa süreli yüksek şiddetli yüklemelerin ağırlıklı olarak ATP-PCr sistemini etkinleştirdiği bilinmektedir. 6 sn'yi geçmeyen maksimal eforlarda enerji ihtiyacı ATP ve PCr yıkımından elde edilir. Bir bacağa 6 sn süre ile maksimal diz ekstensiyonu yaptırıldığında ATP-PCr sistemin geliştiği, diğer bacağa 30 sn maksimal ekstensiyon yaptırıldığında ise glikolitik sistemin geliştiği görülmüştür. Her iki antrenman modalitesinde de kuvvetin benzer oranda arttığı ve yorgunluğa direncin aynı düzeyde olduğu belirtilmiştir²².

30 saniyelik yüklenmelerden oluşan anaerobik antrenmanlar glikolitik enzimlerin aktivitelerini artırır. En çok çalışılan glikolitik enzimler fosforilaz, fosfofruktokinaz ve

laktat dehidrogenazdır. 30 saniyelik tekrarlı yüklenmelerde bu enzimlerin miktarında % 10'dan % 25'e kadar artış olurken, daha ziyade ATP-PCr sistemin kullanıldığı 6 sn'lik yüklenmelerde bu enzimlerde çok az değişiklik olduğu rapor edilmiştir²². Fosfofruktokinaz ve fosforilaz enzimleri ATP nin anaerobik olarak elde edilmesinde hayati öneme sahip enzimler oldukları için bu yüklenmeler glikolitik kapasiteyi geliştirmekte ve kasın daha uzun süre daha büyük gerim üretebilmesini sağlamaktadır²².

Anaerobik yüklenmeler sonrasında laktik asit eşliğinde yükselme olduğu ifade edilmektedir. Bu kazanım anaerobik yüklenmeler sonrasında gelişen adaptasyonlar sayesinde laktatın daha iyi tamponlanması, anaerobik enzim aktivitesinin artması ile ilişkilendirilmektedir²².

Yüksek hızdaki hareketler beceri ve koordinasyonu geliştirir ve hareketin daha ekonomik yapılmasını sağlarlar. Tekrarlı maksimal sprintlerde kasın aerobik kapasitesi de gelişir. Bu değişme az miktarda olsa da kastaki anaerobik metabolizmanın gelişmesine de yardım eder. 30 sn süresindeki maksimal sprint antrenmanlarının oksidatif enzimleri de artırdığı belirtilmiştir. Anaerobik antrenmanlar anaerobik glikoliz sonucu ortaya çıkan düşük pH'yı tolere etme kapasitesini geliştirir. Bikarbonat ve kas fosfatları gibi tamponlar hidrojenle birleşerek fibrillerdeki asiditeyi azaltır ve sonuç olarak yorgunluk algısını ötelemeye yardım eder. 8 hafta anaerobik antrenmanlarda tampon kapasitesinin % 12-50 arasında arttığı belirtilmektedir. Aerobik antrenmanlar tampon kapasitesini geliştirmez; bu sadece anaerobik antrenmanlara özgüdür. Tampon kapasitesinin artması ile sprint antrenmanlı kişiler tükenme noktasında antrenmansızlara göre kanlarında ve kaslarında daha fazla laktat biriktirebilirler. Çünkü laktik asidin hidrojeni tamponlanmakta ve laktat iyonları ise kasta ve kanda artmaktadır. Ancak pH 6.9'un altına düştüğünde glikolitik enzimler artık çalışamazlar ve glikojen yıkımı mümkün olmaz²².

İnterval antrenman modaliteleri de anaerobik antrenman yüklemeleridir ve ara dinlenmeli yüksek şiddetli yüklemelerden oluşur⁸³. İnterval antrenmanın diğer antrenman modellerinden en önemli farkı iş/dinlenme oranını içermesidir⁸³. İlk kez 1959 yılında Riendell ve Roskamm tarafından tanımlanmış ve daha sonraki yıllarda orta ve uzun mesafe koşucuları da bu antrenman metodunu kullanmışlardır⁷⁸. 1960'lerde İsveçli fizyolog Åstrand tarafından VO_{2max} 'ın % 90-95'lerinde interval uygulamasının performans gelişimi üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir⁷⁸. Amerikalı bilim adamı Fox

ise sürekli ve interval antrenmanlardaki metabolik yolaktaki değişikleri incelemiştir. Yapılan araştırmalarda önceki bulgularla uyumlu olarak daha az laktik asit biriktiği ve antrenmanlardan sonra daha az yorgunluk oluştuğu ifade edilmiřtir⁷⁸. İnterval antrenmanlar sürekli yüklenmelerin yapıldığı antrenmanlara göre organizmaya toparlanması için bir miktar süre tanır. Bu sayede bir sonraki yüklenmenin de yüksek şiddette yapılabilmesine olanak tanır. Özellikle fosfajen depolarının yenilenmesi için interval yüklenmelerin uygun bir model olduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışmalarda 30 sn lik bir dinlenme süresinde ATP-CP %50'sinin yenilenebildiği gösterilmiřtir⁸⁴.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışmaya Çukurova Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu'nda okuyan, 23± 3 yaş arası rekreatif olarak aktif 16 gönüllü erkek öğrenci katılmıştır. Araştırmanın başlangıcında katılımcılardan antrenman ve test düzeneklerini anlatan bilgi ve onam formu imzalatılarak onayları alınmıştır. Çalışmaya Çukurova Üniversitesi Etik Kurul'u onayı alındıktan sonra başlanmıştır.

Araştırmanın standardizasyonu için katılımcıların çalışmamızda uygulanan antrenman programı dışında hiçbir fiziksel aktiviteye katılmamaları sağlanmıştır. Bu süre içinde denekler herhangi bir ilaç kullanmamıştır. Test ve antrenmanlar sırasında, vücut sıvı dengesini korumak amacıyla miktarı kişisel isteğe bağlı olarak değişmekle beraber deneklerin en az 500 ml su içmeleri sağlanmıştır. Katılımcılar yüklenmeler ve testlerden sonraki öğünlerde karbonhidrat içeriği zengin gıdalarla beslenmeleri konusunda uyarılmıştır. Çalışma kapsamında antrenmanlar Sakıp Sabancı Spor ve Sergi Sarayı'nda, performans değerlendirmeleri ise Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Fizyoloji Anabilim Dalı, Spor Fizyolojisi Bilim Dalı'ndaki Spor Fizyolojisi Laboratuvarında klimatize ortamda yapılmıştır.

3.1. Deney Protokolü

Araştırma temelde üç aşamada gerçekleştirilmiştir:

3.1.1. Antrenman Öncesi Performans Ölçümleri

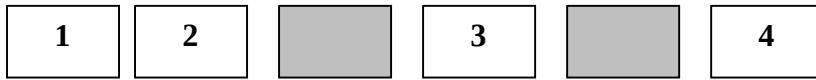
Bu çerçevede sporcuların sprint performansını değerlendirmek amacı ile maksimal 30 metre sprint dereceleri, kuvvet performansını incelemek amacı ile maksimal istemli izometrik diz ekstensiyon kuvveti ölçümleri yapılmıştır. Kasılmaya katılan kasların elektriksel aktivitesini gözlemlemek amacı ile quadriceps kaslarına ait EMG ölçümü uygulanmıştır. Santral sinir sistemi bileşenlerinin dışarıdan gözlemlenmesi için quadriceps kaslarına dinlenim durumunda iken elektrik uyarısı verilerek üretilen kuvvet kaydedilmiştir. Aynı uyarılar maksimal istemli kasılma sırasında da verilen uyarının istemli kasılma sırasında üretilen kuvvete eksternal etkileri incelenmiştir.

3.1.2. Antrenman sonrası performans ölçümleri

Antrenman öncesinde yapılan bütün performans ölçümleri antrenmanlardan sonra da tekrarlanmıştır.

3.1.3. Yorgunluk protokolü

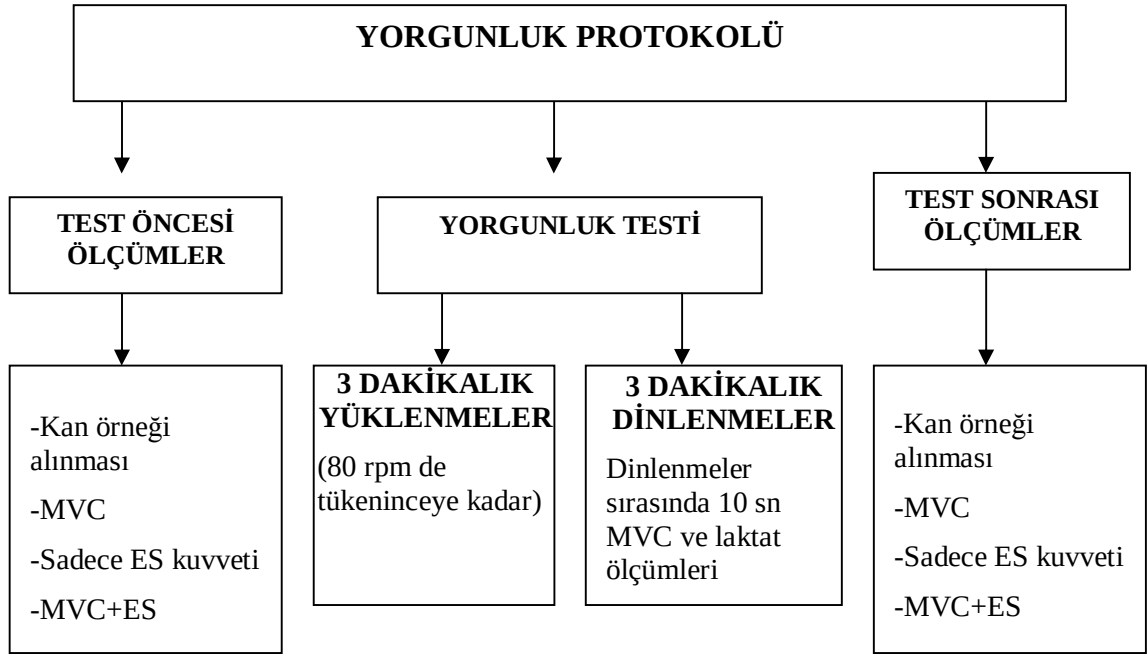
Çalışma kapsamında deneklerde yorgunluk oluşturmak amacı ile özel planlanmış bir bisiklet testi uygulanmıştır. Teste başlamadan önce deneklerin 50 W ile dakikada 60 pedal hızında 5 dk süre ile ısınmaları sağlanmıştır. Bacaklara yönelik esneme-germe hareketlerinin ardından teste 60 W ve 80/dk pedal hızında başlanmış ve her 1 dakikada yük 10 W artırılmıştır. 3 dakikalık yükleme paketleri arasında 3 dk dinlenme aralıkları verilmiştir. Bu dinlenme aralıklarında deneklerin 10 sn maksimal istemli kasılma kuvvetleri ve kulaktan kılcal kan örneği alınarak laktat değerleri ölçülmüştür. 3 dk dinlenme süresinin bitiminde denekler bisiklet testine kaldıkları yerden devam etmişler ve bu test denekler tükeninceye kadar devam etmiştir. Tükenme kriteri olarak bütün sözel teşviklere rağmen sporcunun istenen yükü çevirememesi kabul edilmiştir.



Şekil 3.1: Yorgunluk öncesi-sonrası ölçümlerin şematik gösterimi

- 1: Kan örneği alınması (CK, LDH, Na^+ , K^+ , P_i , Laktat)
- 2: 30 sn süren maksimal istemli kasılma kuvveti (MVC)
- 3: Sadece elektriksel uyarının ürettiği kasılma kuvveti ölçümü
- 4: Maksimal istemli kasılma sırasında elektrik uyarısı verilmesi (MVC+ES)

 :2 dk dinlenme aralığı



Şekil 3.2: Yorgunluk testindeki ölçümlerin şematik gösterimi (MVC: Maksimal istemli kasılma kuvveti, ES: Elektriksel uyarı)

3.1.4. Sporcuların Genel Performans Değerlendirmeleri

Bu çalışmada performans kriteri olarak maksimal istemli izometrik kasılma kuvveti, 30 m sprint zamanı, yorgunluk testinde ulaşılan maksimal güç(bisiklet yükü) ve yorgunluk testi süresi esas alınmıştır. Bu değerler antrenmandan önce ve sonra karşılaştırılması ile performansın değerlendirilmesi ortaya konmuştur.

3.2. Ölçülen değişkenler

3.2.1. Maksimum Oksijen Alımı (VO_{2max} ml/dk)

Çalışmaya başlamadan yaklaşık bir hafta önce sporcuların VO_{2max} değerleri her soluktaki hava değişimi esasına dayanan kardiopulmoner egzersiz test düzeneği ile tespit edilmiştir (Cosmed b²). Testten önce sporculara yapılacak olan ölçümler ayrıntılarıyla anlatılmış ve egzersiz sırasında uygulanacak test protokolü açıklanmıştır. Her testten önce standardizasyonu sağlayabilmek için hacim ve gaz analizör bileşenleri ayrı ayrı kalibre

edilmiştir. Gaz kalibrasyonu solunum havası ile içeriği %5 CO₂, %16 O₂ ve % 79 N₂'dan oluşan kalibrasyon havası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm test süresince kalp atım sayısı göğse takılan özel bantlar aracılığı ile kaydedilmiştir (Polar). Test sonrası veri değerlendirmesinde sporcuların beşer saniyelik ortalama değerleri alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Kardiyopulmoner egzersiz testi sırasında deneklerden % 5 eğimde 5 km/saat'lik koşu hızı ile koşmaları istenmiş ve hız dakikada 1 km/saat artırılmıştır (Cosmed 150). Sporcuların test sırasında maksimal kalp atım hızına ulaşmaları, ekspire edilen CO₂ ile alınan O₂'nin anlık oranı olarak ifade edilen solunumsal equivalent değerinin 1.10 veya daha yüksek değerlere çıkması ve egzersiz yoğunluğu artmasına karşın oksijen alımındaki artışın ≤ 150 ml/dakikadan fazla olmaması sporcuların maksimal kapasitelerinde egzersiz yaptıklarının kriteri olarak kabul edilmiştir⁸⁶.

3.2.2. Kas Kuvveti Ölçümü

Sporcuların izometrik kas kuvvetlerini ölçmek amacı ile Cybex NORM 6000 marka izokinetik dinamometrenin izometrik ölçüm modülü kullanılmıştır. Maksimal ölçümden önce sporculara yaklaşık 10 dakikalık ısınma egzersizi ve sonrasında ağırlıklı olarak alt ekstremité yapısını oluşturan kas gruplarına özel 5 dakika süreyle esneme-germe egzersizi yaptırılmıştır. Ölçüm öncesinde sporcular 90° oturur pozisyonda bel ve göğüs kemerleri ile koltuğa sabitlenmiştir. Sporcunun diz eklemi, kas kuvveti ölçümünün yapılabilmesi için uygun konuma getirilmiş, dinamometrenin ayarları kişinin bacak uzunluğuna göre düzenlenmiş ve sporcuların uygun postürü almaları sağlanmıştır. Şekil 3.3' te görüldüğü gibi sporcuların diz eklemleri ile dinamometre pivot noktasının aynı doğrultuda ve ekseninde olması sağlanmıştır. Daha sonra ayak bileği dinamometre koluna sabitlenmiştir. Diz ekleminin izometrik kas kuvvet ölçümü 90°'lik eklem açısında yapılmıştır. Bu ölçüm sırasında sporculardan bacak ekstensor kaslarını 30 saniye süreyle maksimal kuvvette kasmaları istenmiştir. Ölçüm sırasında sporcuları motive etmek için sözel bildirimler yapılmıştır.

30 sn süren maksimal istemli izometrik kasılmalar sırasında kas kuvvetine ait veriler 100 Hz'lik bir frekansla kaydedilmiştir. Hesaplamalar için 5 sn aralıktaki değerlerin ortalamaları kullanılmıştır.



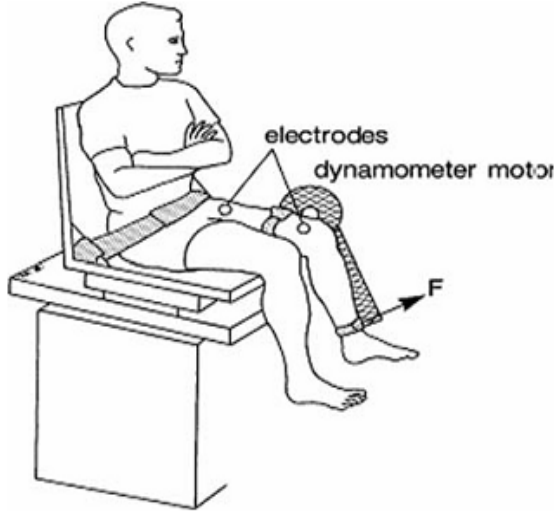
Şekil 3.3: Maksimal izometrik diz ekstensiyon kuvveti ölçümü.

3.2.3. Elektrik Uyarısı

Elektrik uyarısı yüzeysel elektrot kullanılarak verilmiştir. Uygulama sırasında elektrotların cilde zarar vermemesi için, yaklaşık 10 cm'lik özel pedler içine yerleştirilmiştir. Akımın verildiği elektrot rektus femoris kası üzerine nötr elektrod ise vastus medialis veya vastus lateralis kaslarının üstüne yerleştirilmiştir⁸⁷.

Elektrik uyarıları VMS II, Chattanooga Corp cihazının Russion akım modülü kullanılarak uygulanmıştır. Akım tek bir aktif elektrotta olacak şekilde, sabit voltajda, döngü süresi 5/5, burst frekansı 50 pps, görev döngüsü %10 ve rampa 0,5 sn olarak uygulanmıştır.

Deneklerin elektriksel uyarılara uyum sağlayabilmesi için ölçümlere başlamadan yaklaşık 1 hafta önce elektrik uyarısına alışmaları sağlanmıştır. Bu sürede uyarının voltajı yavaş yavaş artırılarak deneklerden istemsiz kasılmayı hissetmeleri istenmiştir. Denekler artan voltajla karıncalanma, ağrı, iğnelenme, kas krampı ve yanma hissi gibi subjektif bulgular dile getirmişlerdir. Bu ölçüm sırasında katılımcıların tolere edebildikleri uyarı aralığı tespit edilerek sonraki bütün ölçümlerde kullanılmak üzere kaydedilmiştir.



Şekil 3.4: Elektrik uyarısı elektrotlarının yerleşimi⁸⁶.

Elektrik uyarısı bu çalışmada iki farklı şekilde uygulanmıştır. Bunlardan ilki denekler istemli kasılma yapmadan kasları gevşemiş durumda iken verilen elektrik uyarısının oluşturduğu kuvvet ölçümüdür (yaklaşık 5 sn süre ile). İkincisi ise maksimal istemli kasılma sırasında deneklere önceden herhangi bir uyarı yapılmadan iki kez 5 sn'ye yakın süre ile eksternal uyarı verilmiştir. Denekler bu sırada maksimal kasılma yapmaya devam etmişlerdir. Deneklerden elektrik uyarısının baskılayıcı ya da kasılmaya yardım edici etkisine karşın maksimum kasılma yapmaları istenmiş, bu konuda sözel teşviklerde bulunulmuştur.

3.2.4. 30 m. Sürat Ölçümü

Sporcuların maksimal sürat performansları, 30 metrelik düz bir parkurun başlangıç ve bitiş noktalarına yerleştirilen fotoselli kronometreler kullanılarak ölçülmüştür. Optik okuyucular arasındaki genişlik 3 metre olarak ayarlanmış ve böylece sporcuların herhangi bir engelle karşılaşmadan rahatlıkla koşabileceği bir alan yaratılmıştır. Öte yandan fotosellerin sporcuların yaklaşık bel hizasına karşılık gelen 120 cm'lik bir yükseltiye yerleştirilmesi sayesinde, sporcunun gövdesinin fotoseller arasından geçtiği anın net olarak tespit edilebilmesi mümkün olabilmıştır. Sporcuların 30 metrelik

koşu performansı, saniye ve milisaniye cinsinden kaydedilmiş ve fotosellere bağlı bir elektronik cihaz tarafından anlık veri olarak kayda alınmıştır. Sporcuların koşu başlangıcı sırasında uygunsuz hareketlerinden kaynaklanabilecek olası yanlış ölçümlerin önüne geçebilmek için, başlangıç çizgisi fotosel sisteminden 1 metre daha uzağa çizilmiştir. Bu nedenle koşunun ilk 1 metresinde olabilecek aksaklıkların önüne geçilmesine çalışılmıştır. Bu hız ölçüm düzeneği aynı zamanda bütün antrenmanlar süresince kullanılmış ve bu sayede yüklenmelerin şiddetini ayarlamak mümkün olmuştur. Performans ölçümlerinde sporculardan en iyi 30 metre derecelerinin alınabilmesi amacıyla testi 3 defa tekrarlamaları istenmiş ve en kısa sprint süresi değerlendirmeye alınmıştır.

3.2.5. Kan Değişkenlerinin Ölçümü

Çalışma sırasında serum örneklerinden çalışılacak değişkenlerin değerlendirilebilmesi amacıyla sporcuların antecubital veninden yaklaşık 5 ml kan örneği alınmıştır (Şekil 3.1 ve 3.2). Kan alımları yorgunluk öncesi dinlenme durumunda ve yorgunluk testinin hemen ardından gerçekleştirilmiştir. Kan örnekleri 5 dakika süre ile 3500 devirde santrifüj edilerek serumu ayrılmıştır. Serum Na^+ , K^+ , P_i , CK, LDH ölçümleri Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi Merkez Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Serum CK ve LDH enzim aktiviteleri kalorimetrik yöntem ile Roche marka ticari kit kullanılarak, Roche elecsys E-170 cihazında ölçülmüştür. K^+ , P_i , Na^+ iyonları ise iyon selektif yöntem DPP modüler sistemle analiz edilmiştir.

3.3. Antrenman Programı

Çalışma süresince sporcularda gelişimi hedefleyen ardışık antrenman protokollerinin tümüne 10 dakikalık ısınma koşusu ile başlanmıştır. Bu esnada sporcuların kalp atım sayısının 120-150 vuru/dakika aralığında olması amaçlanmıştır. İzleyen dönemde 10-15 dakika esneme ve germe hareketleri ile atletizme özel ısınması egzersizlerini yapmaları sağlanmıştır. Tüm antrenman süresince sporcuların kalp atım hızı Garmin 305

GPS cihazı kullanılarak takip edilmiş ve her sprint koşusunun sonundaki kalp atım hızları kaydedilmiştir.

Çalışmada 30 metrelik düz koşulardan oluşan temel bir egzersiz protokolü kullanılmıştır. Setlerin kapsamı on tekrardan oluşan 30 m. sprint koşularından oluşturulmuştur (10x30m). Sporculardan 30 m'lik parkurun başlangıç çizgisinden bitiş çizgisine kadar sprint koşusu yapmaları, daha sonra da parkurun yanında hunilerle belirlenen bölgeden başlangıç çizgisine hafif tempo koşarak yeniden dönmeleri istenmiştir. Sporcuların sprint sonrası yeniden başlangıç noktasına dönmeleri 20–30 sn arasında değişen bir süreyi kapsamıştır. Başlangıç noktasına dönen sporcudan sprint koşusunu yeniden gerçekleştirmeleri istenmiş ve bu yüklemeler set içinde 10 kez tekrarlanmıştır. Sprint performanslarının sürekli kayıt altına alınması sayesinde sporcuların anlık performansının değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Her efor sonrasında dereceleri hakkında bilgi verilen sporculardan kendi performanslarını ayarlamaları istenmiştir. Böylece temposu düşük olan sporcunun hızlı, temposu yüksek olan sporcunun ise yavaşlaması sağlanarak yüklemenin dozajı sürekli kontrol altında tutulmuştur. Sprint antrenmanları bittikten sonra günlük antrenman programı tamamlanmadan önce sporculara 5 dakikalık soğuma koşusu ve ardından da germe egzersizleri yaptırılmıştır. Sporcuların 30 m. koşu hızları ve tekrarlanan set sayısı, antrenman programına göre önceden belirlenmiş olup, ilerleyen haftalarda yüklemenin dozajı koşuların hızı ve set sayısı artırılarak ayarlanmıştır.

Beş haftalık antrenman programı süresince haftalık antrenmanların şiddeti deneklerin maksimal hızlarının yüzdesi, kapsamı ise set sayısı esas alınarak düzenlemiştir. Antrenman şiddeti, antrenmanın her yüklenmesinde ölçülen sprint hızlarının ortalaması ile değerlendirilmiştir. Yüklemelerin şiddeti haftalar içinde giderek artırılmıştır.

Çalışmanın başlangıcında sporcuların maksimal 30 metre derecelerinin alındığından her sporcu için özel % 100 yüklemenin hangi hıza karşılık geldiği tespit edilmiş ve kayda alınmıştır. Bu bilgi çalışmanın başlangıcından itibaren yapılacak yüklemeler için esas teşkil etmiştir. Genel programda haftanın birinci ve ikinci antrenmanında bir set, üçüncü antrenmanında ise iki setlik yüklemenin yapılması hedeflenmiştir. Buna göre;

Birinci haftada yaptırılan antrenmanların ana amacı sporcuların daha sonra yapacakları yoğun yüklemelere uyum sağlayabilmelerine imkân tanıyacak yüklemeleri

gerçekleştirmektedir. Bu dönem süresince yaptırılan üç antrenmanda da yüklenmelerin şiddeti, sporcuların maksimal kapasitelerinin %70-80'inde yapılan sprintlere göre ayarlanmıştır.

İkinci haftada ilk antrenmanda 10 tekrardan oluşan antrenman kapsamının ilk iki sprinti maksimal diğer sekiz sprint ise %80 şiddette uygulanmıştır. Haftanın ikinci antrenmanında ise deneklere maksimal hızlarının %70-80'inde 10 sprint yaptırılmıştır. Haftanın son antrenmanında ise deneklerden maksimal hızlarının %80-90'ında tek set koşmaları istenmiştir

Üçüncü haftanın ilk antrenmanında ikinci haftadan farklı olarak ilk dört sprinti maksimal hızda yapmaları istenmiştir. Sonraki altı sprint maksimal hızın %80-90'ında yapılmıştır. Haftanın ikinci antrenmanı maksimal hızın %70-80'inde tek set, üçüncü antrenmanı maksimal hızın %80-90'ında iki set yapılmıştır.

Dördüncü haftanın ilk antrenmanında, maksimal sprint sayısı beşe çıkarılmış ve diğer beş sprint ise maksimal hızlarının %90'ında yaptırılmıştır. Haftanın ikinci antrenmanı ve üçüncü antrenmanında set sayıları sırasıyla bir ve iki olarak belirlenmiş buna karşın yüklenmelerin şiddeti maksimal hızın %80-90'ında olarak kurgulanmıştır.

Beşinci haftada ise, ilk antrenmanda on tekrardan oluşan setin bütün sprintleri maksimal hızda yapılmıştır. Haftanın ikinci antrenmanı maksimal hızın %80-90'ında tek set, üçüncü antrenmanı ise maksimal hızın %80'inde iki set yapılmıştır.

3.4. EMG Ölçümleri

Çalışma kapsamında yorgunluk testlerinden önce ve hemen sonra kuvvet değişimlerini gözlemlemek amacıyla alınan MVC sırasında EMG kayıtları da alınmıştır (Şekil 3.2 ve 3.3). Yüzeyel EMG verileri ME3000P8 marka cihaz ile (Mega Electronics, Finland) quadriceps kasından kaydedilmiştir. Kayıt aralığı 1 kHz olarak ayarlanmıştır. Ölçümlere başlamadan önce sporcuların sağ uylukları traş edilmiş ve daha sonra deri yüzeyi alkol ile temizlenmiştir. Bütün hesaplamalar için, alınan ham kayıt matlab 6 programında herhangi bir parazit kaydına karşı 20-500 Hz filtreleme yapıldıktan sonra değerlendirmeye alınmıştır Gürültü kaydı olup olmadığı ön ölçümlerle değerlendirilerek herhangi bir parazitin olmadığı görüldükten sonra test ölçümlerine başlanmıştır. Yüzeyel EMG elektrotları yaklaşık 2 cm aralıklarla ve referans elektrot o kastan kayıt alamayacak uzaklığa yerleştirilmiştir. Kasılma süresince alınan kayıttan bu kaslara ait frekans, Root

Mean Square (RMS) ve integrale EMG (IEMG) hesaplamaları yapılmıştır. Frekans analizi için Matlab 6 programında Fast Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Ortalama frekans değerleri şu formülle hesaplanmıştır:

$$f_{mean} = \frac{\int_0^f f S_m(f) df}{\int_0^f S_m(f) df}$$

($S_m(f)$ power density spektrumu göstermektedir)

Bütün EMG hesaplamalarında 1 sn ortalamalar alınmış ve daha sonra kuvvet verileri ile senkronize etmek amacı ile bütün ölçümler 5 sn'lik ortalamalar alınarak hesaplamalar yapılmıştır. RMS hesaplamaları aşağıdaki formülle Matlab 6 programında hesaplanmıştır.

$$RMS \{m(t)\} = \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} m^2(t) dt \right)^{1/2}$$

(T ortalama alınan süre aralığı, t ise anlık zamanı göstermektedir.

IEMG hesaplamaları da Matlab 6 programı kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

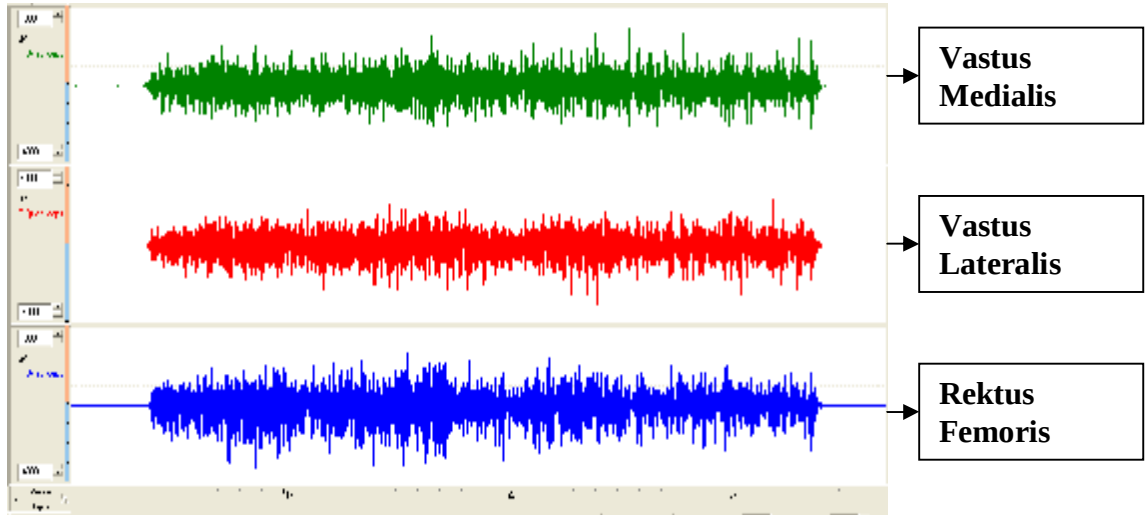
$$I \{m(t)\} = \int_t^{t+T} |m(t)| dt$$

(T ortalama alınan süre aralığı, t ise anlık zamanı göstermektedir.

.



Şekil 3.5: Maksimal izometrik kasılma sırasında EMG kaydı alımı

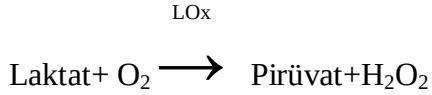


Şekil 3.6: Maksimal izometrik diz ekstensiyonu sırasında ölçülen EMG kaydı örneği

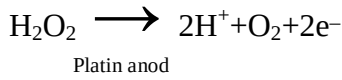
3.5. Laktat Ölçümleri

Kan laktat ölçümleri YSI 1500 Sport L-Lactate marka laktat analizörü ile yapılmıştır. Laktat ölçümü cihaz içindeki iki temel reaksiyona dayanmaktadır:

Reaksiyon 1: önce kan örneğinin bir kısmı membranı geçer ve laktat oksidaz enzimi ile hızla okside olur ve pirüvat+ H₂O₂ (hidrojen peroksit) meydana gelir.



Reaksiyon 2: H₂O₂ platine temas ettiğinde açığa çıkan elektron elektrik akımı oluşturur. Bu ise özel bir çevireçle kaydedilerek laktat konsantrasyonunu gösterir. Daha fazla laktat daha fazla elektron açığa çıkmasına neden olur. Özetle:



Çalışmaya başlamadan önce cihaz içeriği 5, 15 ve 30 mmol/l olan özel kalibrasyon solüsyonları ile kalibre edilmiştir. Hem antrenmanlardan önce ve hem de antrenmanlar sonrasında laktat ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.1 ve 3.2). Ölçümlerde kulak memesinden alınan kılcal kan örnekleri kullanılmıştır. Yorgunluk testine başlamadan önce sporcular henüz ısınmadan dinlenim kan örnekleri ile dinlenim laktat değerleri ölçülmüştür. Sonraki ölçümler ise yorgunluk testini oluşturan her 3 dakikalık yükleme paketleri arasındaki 3 dakikalık dinlenme aralığında gerçekleştirilmiştir. Test tamamlandıktan sonraki 1 dk içinde test sonu laktat ölçümleri yapılmış ve sonuçlar mmol/l olarak kaydedilmiştir.

3.6. İstatistiksel Analiz

Çalışmada sunulan verilerin tümü ortalama $\pm$ standart sapma olarak verilmiştir. Antrenman öncesi ve sonrasına ait değerler arasındaki değişiklikler ve yorgunluk testi öncesi sonrası değişkenlerin zaman içerisindeki değişimi eşleştirilmiş *t* testi (paired) ile

karşılaştırılmıştır. Tekrarlayan ölçümler bağımlı gruplarda (repeated measures) tek yönlü varyans analizi ile değerlendirilirken, farkların hangi ölçüm zamanlarından kaynaklandığının tespiti için Bonferroni düzeltmesi kullanılmıştır. İki farklı değişken arasındaki ilişki, Pearson korelasyon analizi ve doğrusal regresyon testi yapılarak değerlendirilmiştir. Güven aralığı %95 olarak seçilmiş ve $p < 0.05$ ile altındaki değerler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir. İstatistik hesaplamalarının tümü Windows için yazılmış olan SPSS 11.5 paket programı kullanılarak yapılmıştır.

4. BULGULAR

4.1. Demografik Özellikler

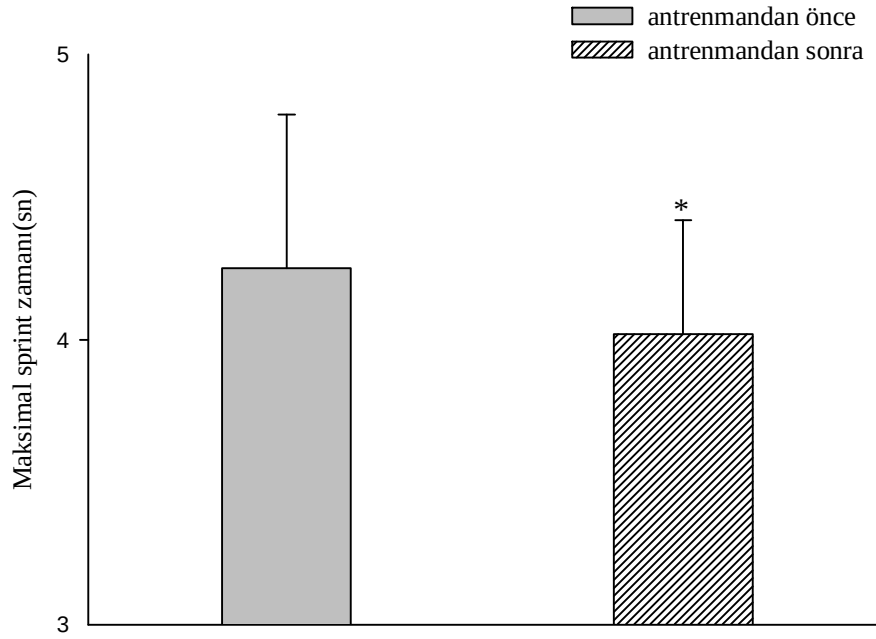
Çalışmaya Çukurova Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu'nda eğitim alan 23.3 ± 3 yaş aralığında, boyları 176.4 ± 4 cm, vücut ağırlığı 70.4 ± 6 kg ve maksimum oksijen alımı 60.1 ± 5.8 ml/kg/dakika olan 16 sağlıklı erkek öğrenci katılmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1: Çalışmaya katılan deneklerin demografik özellikleri

N=16	Ortalama
Yaş	23.3 ± 3
Boy (cm)	176.4 ± 4
Vücut ağırlığı (kg)	70.4 ± 6
VO _{2max} (ml/kg/dak)	60.1 ± 5.8

4.2. Sprint Performansı Sonuçları

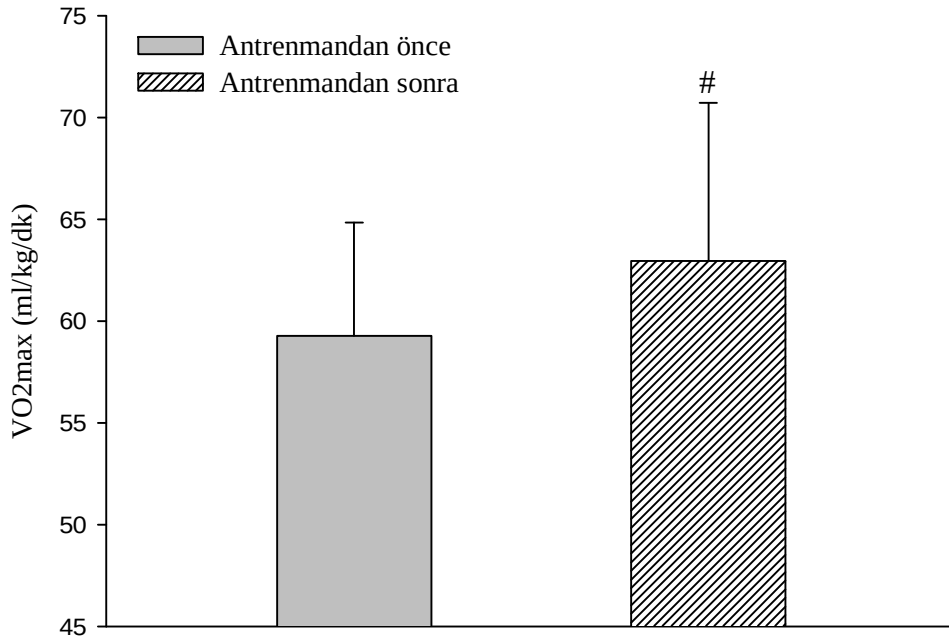
Deneklere 5 hafta süreyle yaptırılan sprint antrenman yüklemeleri performanslarında artışa yol açmıştır. Antrenmanlara başlamadan önce 30 m maksimal sprint derecesi 4.25 ± 0.5 sn olan denekler antrenmanlardan sonra 4.02 ± 0.4 sn derecesine ulaşmışlardır (Şekil 4.1). Sprint zamanındaki bu azalma istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.001$).



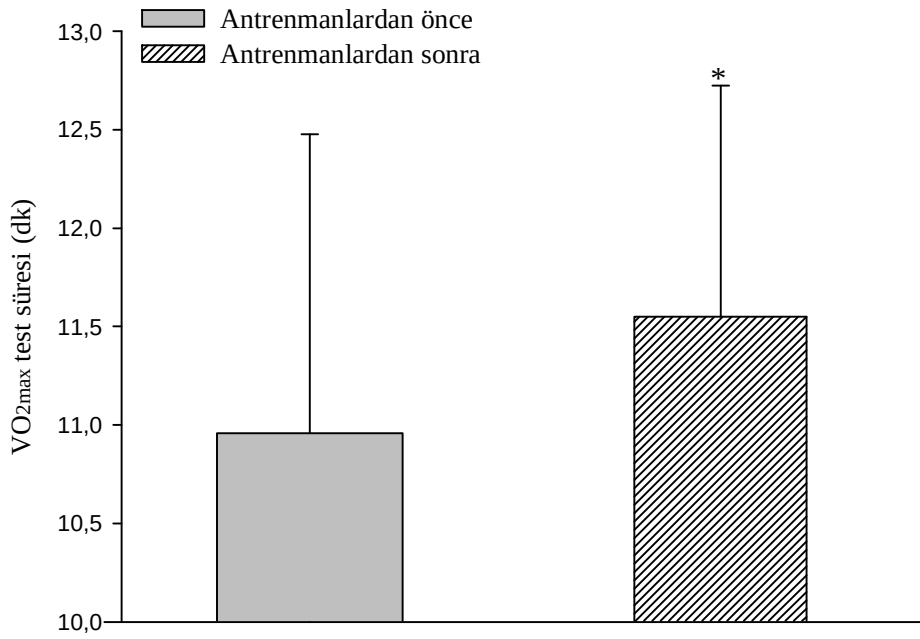
Şekil 4.1: Antrenmanlardan önce ve sonra deneklerin 30 m sprint koşu dereceleri(*p<0,001)

4.3. VO_{2max} Ölçüm Sonuçları

Yapılan sprint antrenmanlarının temel performans değişkenlerinden birisi olan maksimum oksijen tüketimine etkisi irdelendiğinde antrenman öncesi 60.1 ± 5.8 ml/kg/dk olan VO_{2max} değerlerinin, 5 haftalık antrenman döneminden sonra 63.3 ± 7.8 ’ e çıktığı görülmüştür. İstatistiksel olarak anlamlı bulunan bu gelişim($p < 0.001$) aerobik kapasitedeki artışı göstermektedir (Şekil 4.2). VO_{2max}’taki gelişme test sırasındaki egzersiz süresinde de artışa neden olmuştur(Şekil 4.3). Antrenman öncesi 10.7 ± 1.2 dk olan test süresi, antrenmanlardan sonra 11.5 ± 1.1 ’e yükselmiş ve aradaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu bulunmuştur ($p < 0.001$).



Şekil 4.2: Antrenmanlardan önce ve sonra VO₂max ölçüm sonuçları (#p<0.05)

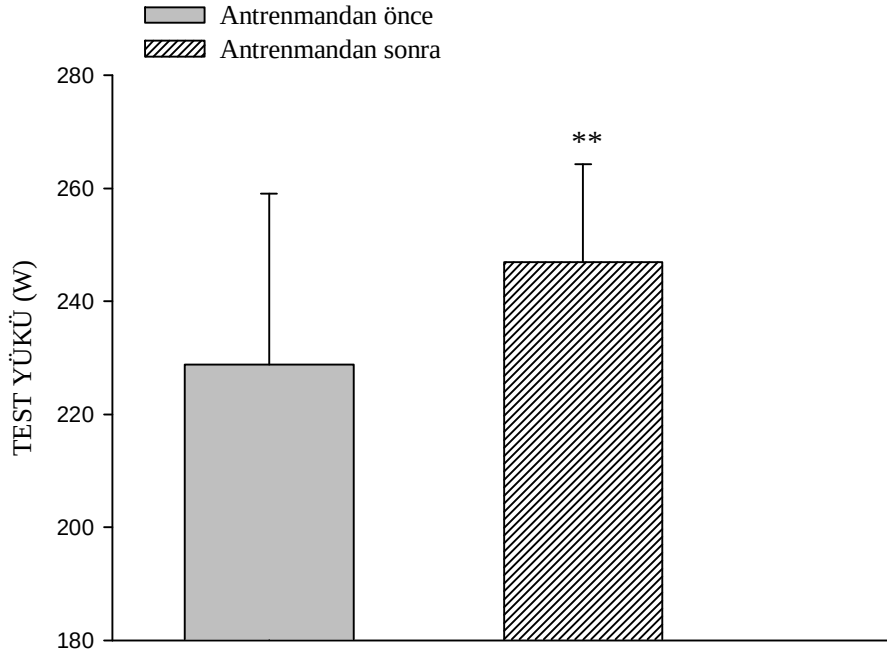


Şekil 4.3 : Antrenmanlardan önce ve sonra VO₂max ölçüm testinde yükleme süreleri (*p<0,001)

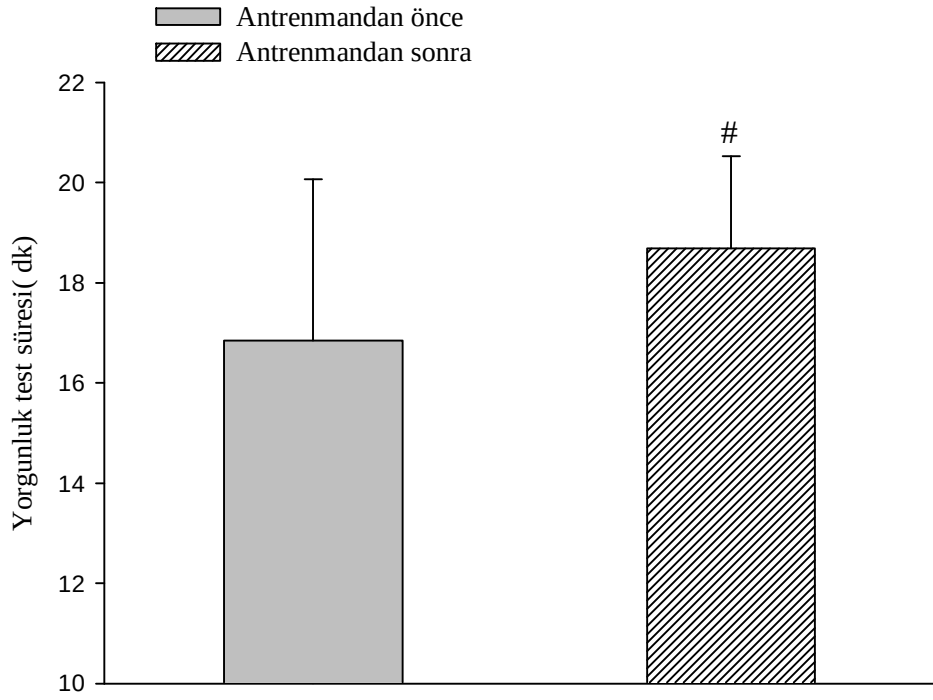
4.4. Yorgunluk Testinde Dayanıklılık Süresi, Maksimal Yük ve Maksimal Kalp Atım Sayısı Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.4'te sporcuların yorgunluk testinde ürettikleri maksimum güç ortalamaları görülmektedir. Antrenmanlardan önce uygulanan yorgunluk protokolünde sporcuların maksimal yük ortalaması 228 ± 31 W iken, antrenmanlardan sonra 245 ± 16 W'a çıkmıştır. Hesaplamalar bu ölçümler arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir ($p < 0.005$). Yorgunluk test sürelerinin değişimi de aerobik kapasitedeki artışla uyumlu olarak uzamıştır. Katılımcıların yorgunluk testindeki tükenme süresi antrenmanlardan önce 17 ± 3 dk iken antrenmanlardan sonra 19 ± 2 dk'ya yükseldiği görülmüştür (Şekil 4.5). Yorgunluk testi süresindeki bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$).

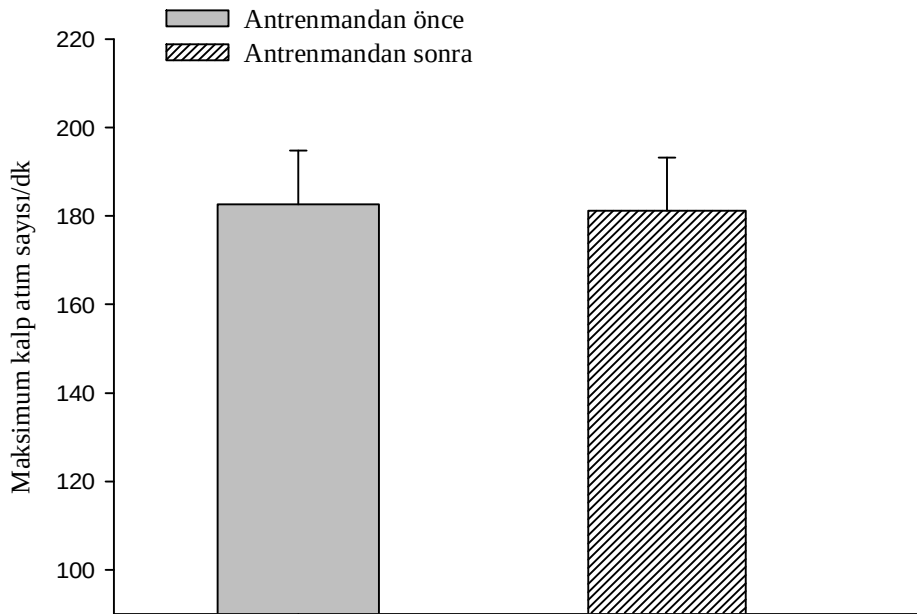
Yorgunluk testi sırasında ulaşılan maksimum kalp atım sayısı değerleri Şekil 4.6'da görülmektedir. Antrenmanlardan önce yapılan yorgunluk testi sırasında kaydedilen maksimum kalp atım sayısı ortalama 182 ± 12 /dk iken antrenmanlardan sonraki yorgunluk testinde kalp atım sayısı 181 ± 11 /dk olarak kaydedilmiştir. Maksimal kalp atım sayısı değerleri arasındaki fark anlamlı bulunmamıştır ($p > 0.05$).



Şekil 4.4 : Antrenmanlardan önce ve sonra tükenme yükü ortalamaları (** $p < 0.005$).



Şekil 4.5: Antrenmandan önce ve sonra yorgunluk testi sırasındaki tükenme süresi ($p < 0.05$).



Şekil 4.6: Antrenmanlardan önce ve sonra yorgunluk testi sırasındaki maksimum kalp atım sayısı değerleri. (Aralarındaki fark istatistiksel olarak anlamlı değildir)

4.5. Laktat Ölçüm Sonuçları

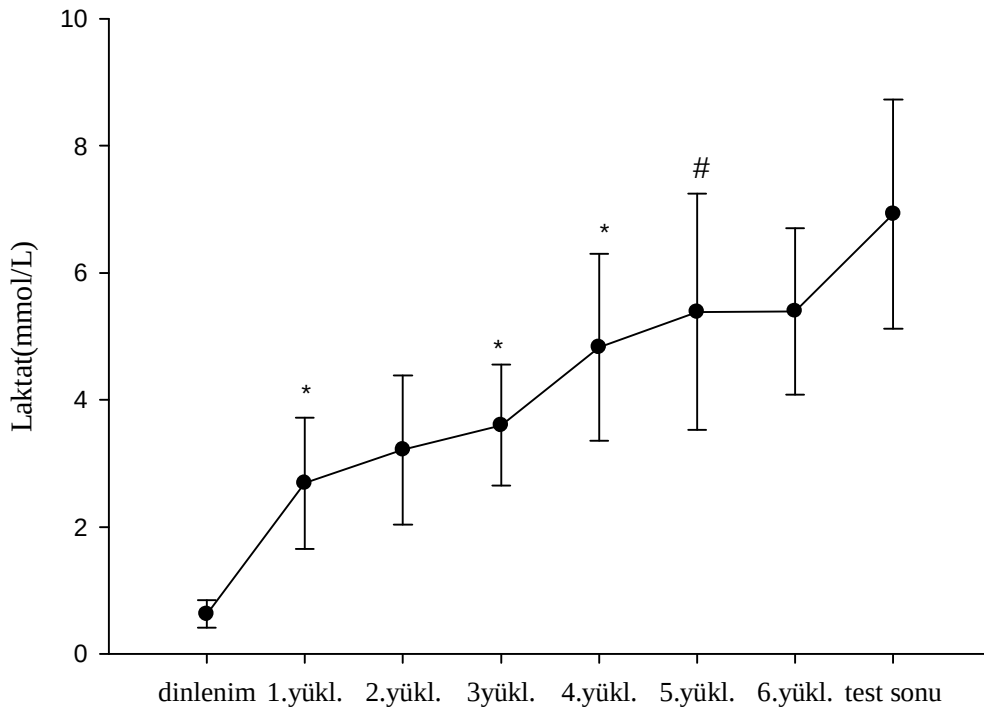
Yorgunluk testi öncesi ve sonrasında yapılan kan laktat konsantrasyonlarına ait veriler çizelge 4.2’de verilmiştir. Deneklerin dinlenim laktat ortalamaları antrenmanlardan önce 0.6 ± 0.2 mmol ve antrenmanlardan sonra da 0.6 ± 0.1 mmol olarak ölçülmüştür. Antrenman öncesi ve sonrası dinlenim değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0.05$). Bu durum deneklerin çalışmaya dinlenmiş olarak geldiklerini göstermesi açısından önemlidir. Her iki ölçümde de kan laktat değerleri egzersizin başlaması ile birlikte artmaya başlamıştır. Test sonrasında antrenman öncesi 7.1 ± 1.6 mmol olan tükenme anındaki laktat değeri, antrenmanlardan sonra 8.3 ± 1.9 mmol’e çıkmıştır. Verilen istatistiksel değerlendirmesi antrenman öncesi maksimum laktat değerlerinin antrenman sonrası maksimum laktat değerlerinden anlamlı olarak daha düşük olduğunu göstermiştir ($p < 0.05$).

Çizelge 4.2: Antrenmandan önce ve sonra yorgunluk testi sırasında kaydedilen laktat değerleri ($\#p < 0.05$ Antrenmandan önce ve sonra test sonu değerler arasındaki farkın istatistiksel değerlendirmesi)

Laktat değerleri(mmol)	Antrenmandan önce	Antrenmandan sonra
Dinlenim	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1
1.yükleme sonrası	2.7 ± 1.0	2.7 ± 0.7
2. yükleme sonrası	3.2 ± 1.1	3.4 ± 0.8
3. yükleme sonrası	3.6 ± 0.9	4.4 ± 1.1
4. yükleme sonrası	4.8 ± 1.4	5.2 ± 1.2
5. yükleme sonrası	5.6 ± 1.8	7.0 ± 2.2
6. yükleme sonrası	6.7 ± 1.5	8.1 ± 2.2
Test sonu ölçümü	7.1 ± 1.6	$8.3 \pm 1.9\#$

Antrenmanlardan önce yorgunluk testi sırasındaki yüklemeler arasında alınan ardışık laktat ölçümleri arasındaki farklılıklar şekil 4.7’de gösterilmektedir. Antrenmanlardan önce ardışık ölçümler arasında 1 ve 3. ölçümlerde ($p < 0.001$) ve 4. ölçümde ($p < 0.05$) istatistiksel olarak anlamlı laktat artışı kaydedilmiştir. Yapılan

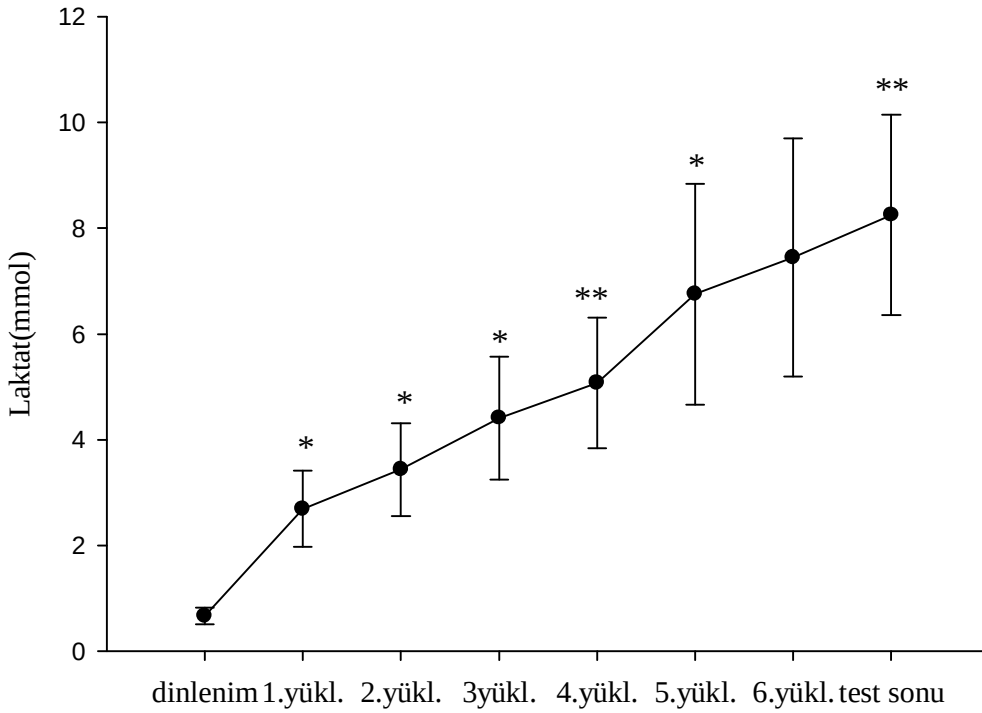
hesaplamalarda 1. yükleme sonrasında ölçülen laktat değerlerinin Dinlenme durumuna göre anlamlı artış gösterdiği tespit edilmiştir ($p<0.001$). İzleyen yüklemelerde 3. yükleme sonrasında ölçülen laktat değerlerinin, 2. yükleme sonrasında ölçülen laktat değerlerinden ($p<0.001$) ve 4. yüklemede ölçülen laktat değerlerinin de 3.yükleme sonrasındaki laktat değerlerinden anlamlı olarak daha yüksek çıktığı görülmüştür ($p< 0.005$). 5. yüklemeden sonra oluşan kan laktat değerleri arasındaki fark anlamlı bulunmamıştır.



Şekil 4.7: Antrenmandan önce ardışık laktat ölçümleri arasındaki farklılıklar (* $p< 0.001$ bir önceki ölçüm değerine göre anlamlı farklılık, # $p<0.05$ bir önceki ölçüm değerine göre anlamlı farklılık).

Antrenmanlardan sonraki yorgunluk testinde yüklemeler arasında alınan laktat ölçüm değerlerinde ardışık değerler arasındaki farklılıklar şekil 4.8’de gösterilmektedir. Yapılan hesaplamalar 1. yükleme sonrası ölçülen laktat değerinin dinlenme durumuna göre anlamlı olarak yükseldiğini göstermiştir ($p<0.001$). izleyen yüklemelerde 2. yükleme sonrası ölçülen değer 1. yükleme sonrası değerinden ($p<0.001$), 3. yükleme sonrası laktat değerinin 2. yükleme sonrası değerden ($p<0.001$), 4. yükleme sonrası ölçülen değerin 3.

yükleme sonrası laktat değerinden ($p<0.005$) , 5. yükleme sonrası laktat değerinin 4. yükleme sonrası değerden ($p<0.001$) ve test sonu laktat değerinin de 6. yükleme sonrası değere göre anlamlı olarak yükseldiği görülmüştür ($p<0.005$).



Şekil 4.8:Antrenmanlardan sonra ardışık ölçümler arası laktat ölçümleri (* $p<0.001$ bir önceki ölçüm değerine göre anlamlı farklılık, ** $p<0.005$ bir önceki ölçüm değerine göre anlamlı farklılık)

4.6. Kandan Ölçülen Enzim ve İyon Konsantrasyon Sonuçları

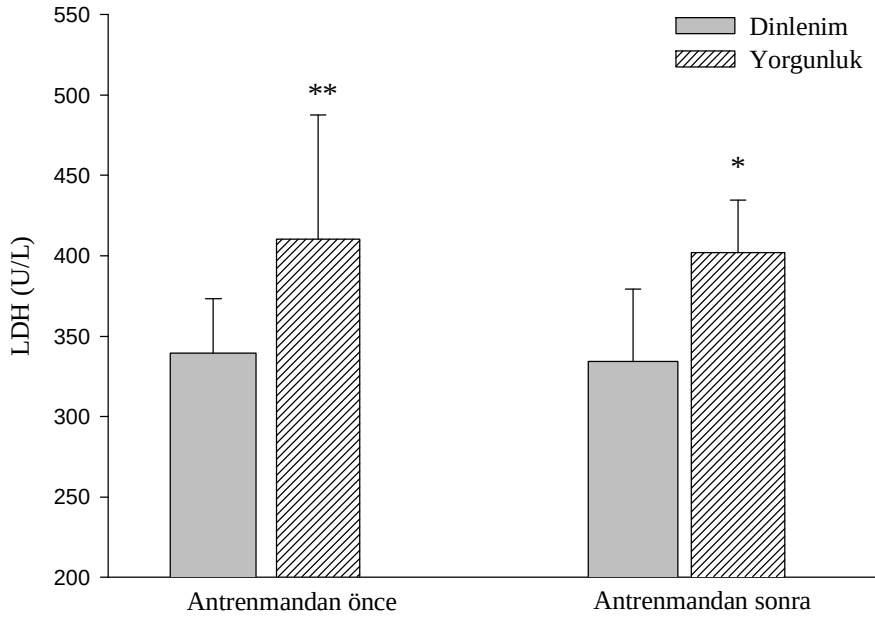
Serum enzim konsantrasyonlarının antrenman öncesi ve sonrası yorgunluktaki değişimi şekil 4.1’ de verilmiştir. LDH değerlerinin değişimi şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Serum LDH düzeylerinin yorgunlukta hem antrenmandan önce ($p<0.05$) hem de antrenmandan sonra ($p<0.001$) anlamlı olarak arttığı görülmüştür. Antrenmanlardan önce dinlenimde 339 ± 33 u/l olan serum LDH değeri yorgunlukta 410 ± 77 u/l’ye yükselmiştir ($p<0.005$). Antrenmanlardan sonra dinlenimde 334 ± 44 u/l olan LDH değeri

yorgunlukta 402 ± 32 u/l'ye yükselmiştir ($p < 0.001$). Antrenman öncesi ve sonrası dinlenim ve yorgunluk değerleri arasında anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p > 0.05$).

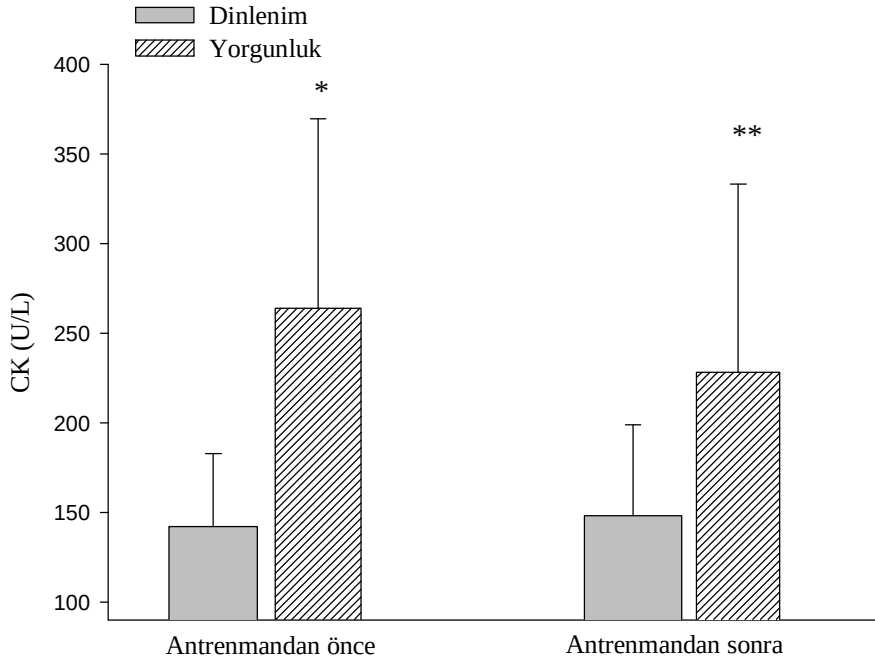
Şekil 4.10' da serum CK değerlerinin antrenmanlarla ve yorgunlukla değişimleri gösterilmiştir. Serum CK düzeylerinin hem antrenmandan önce hem de antrenmandan sonra yorgunluk testiyle istatistiksel olarak anlamlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Antrenmanlardan önce dinlenim CK değeri $142,3 \pm 40,6$ u/l iken, yorgunlukta $263,7 \pm 106,1$ u/l'ye yükselmiştir ($p < 0.001$). Antrenmanlardan sonra ise dinlenim CK değeri $148,2 \pm 50,7$ u/l iken yorgunlukta $228,3 \pm 104,9$ u/l'ye yükselmiştir ($p < 0.005$). Antrenman öncesi ve sonrası arasında dinlenim ve yorgunluk değerleri arasında anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p > 0.05$).

Çizelge 4.3: Antrenmanlardan önce ve sonra dinlenim ve yorgunlukta ölçülen enzim değerleri değişimi (* $p < 0.001$ dinlenim değerine göre farklılık, ** $p < 0.005$ dinlenim değerine göre farklılık).

	ANTRENMAN ÖNCESİ		ANTRENMAN SONRASI	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
LDH(u/l)	339.1 ± 33.2	$410.2 \pm 77.1^{**}$	334.3 ± 44.1	$402.1 \pm 32.2^*$
CK(u/l)	142.3 ± 40.6	$263.7 \pm 106.1^*$	148.2 ± 50.7	$228.3 \pm 104.9^{**}$



Şekil 4.9 : Antrenmanlardan önce-sonra yorgunlukla LDH değişimi (** $p < 0.005$ yorgunluk öncesine göre anlamlı farklılık, * $p < 0.001$ yorgunluk öncesine göre anlamlı farklılık)

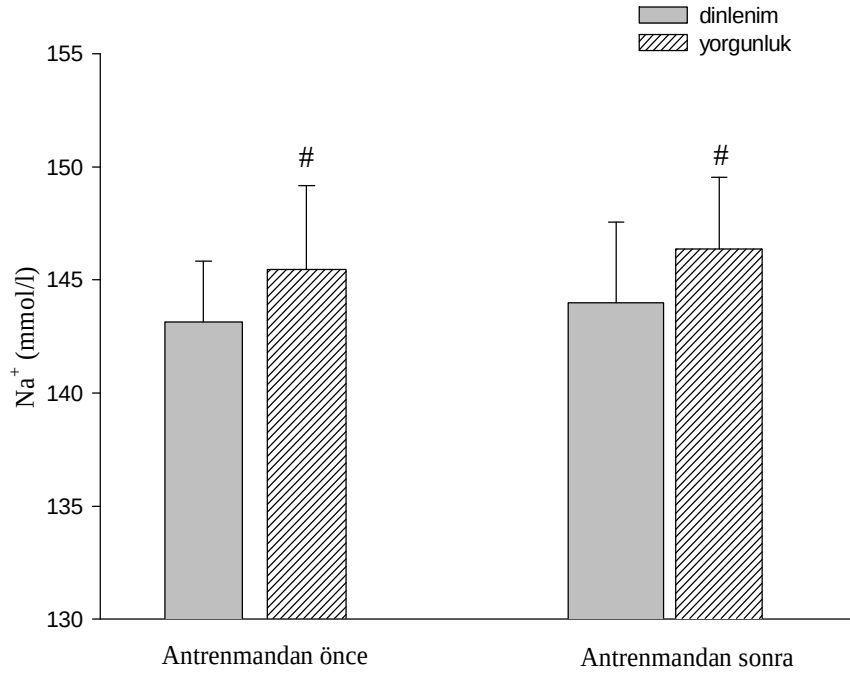


Şekil 4.10 : Antrenmanlardan önce ve sonra yorgunlukla CK değişimi (* $p < 0.001$ yorgunluk öncesine göre anlamlı farklılık, ** $p < 0.005$ yorgunluk öncesine göre anlamlı farklılık)

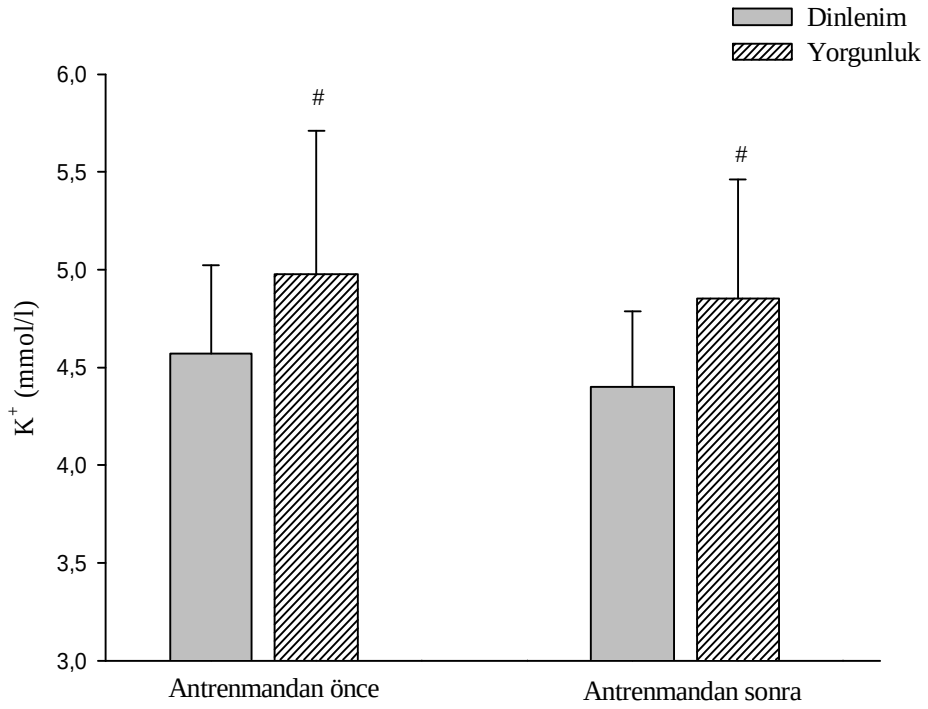
Serumdaki Na^+ , K^+ ve P_i konsantrasyonlarının antrenman ve yorgunlukla olan değişimleri çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Antrenmanlardan önce ve sonra yorgunlukta her üç iyonun da serum konsantrasyonlarının anlamlı oranda arttığı görülmüştür ($p<0.05$). Öte yandan antrenman sonrası yorgunluk anında ölçülen P_i değerinin antrenman öncesi yorgunlukta ölçülen P_i değerinden anlamlı olarak yüksek olduğu bulunmuştur ($p<0.05$). Her üç iyonunda yorgunlukta değişimleri şekil 4.11, şekil 4.12 ve şekil 4.13' te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Antrenman ve yorgunlukla serum iyon değişimleri

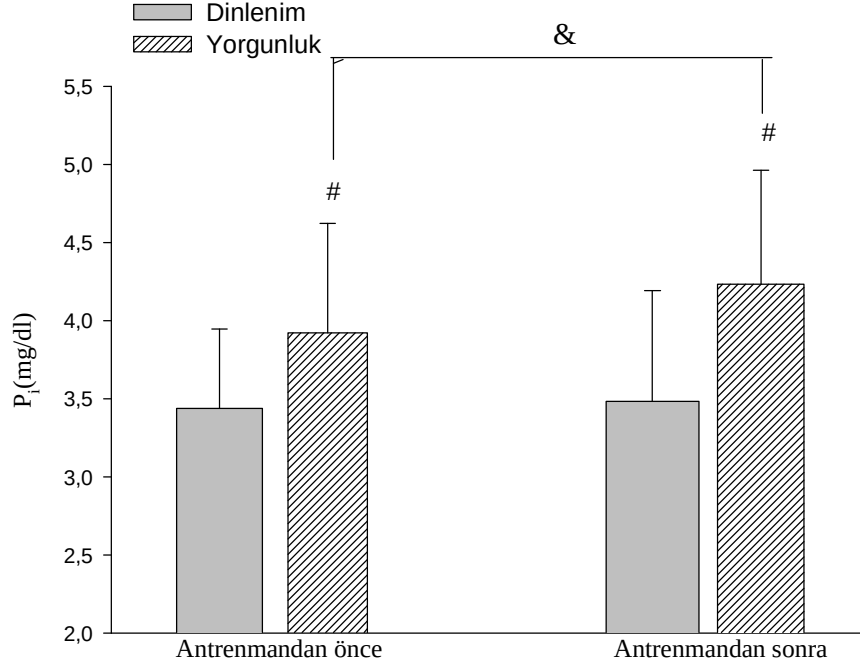
	ANTRENMAN ÖNCESİ		ANTRENMAN SONRASI	
	Yorgunluk Öncesi	Yorgunluk Sonrası	Yorgunluk Öncesi	Yorgunluk Sonrası
Na^+ (mmol/l)	143.1± 2.6	145.4± 3.7 #	142.9± 2.6	146.3± 3.1 #
K^+ (mmol/l)	4.5± 0.4	4.9± 0.7 #	4.4± 0.3	4.8± 0.6 #
P_i (mg/dl)	3.4± 0.5	3.9± 0.7 #	3.4± 0.7	4.2± 0.7 # &



Şekil 4.11: Antrenmandan önce-sonra yorgunlukla Na^+ konsantrasyon değişimi (# $p < 0.05$ dinlenim durumuna göre anlamlı farklılık)



Şekil 4.12: Antrenmanlarla ve yorgunlukla serum K^+ değişimi (# $p < 0.05$ dinlenim durumuna göre anlamlı farklılık)



Şekil 4.13: Antrenmanlardan önce ve sonra yorgunlukta P_i değişimi (# $p < 0.05$ antrenman öncesi ve sonrası dinlenime göre farklılık, & antrenman öncesi ve sonrası yorgunluk değerleri arasındaki farklılık).

4.7. Kas Kuvveti Ölçüm Sonuçları

4.7.1. Maksimal İstemli Diz Ekstensiyonu Sırasında Kaydedilen Kuvvet Sonuçları

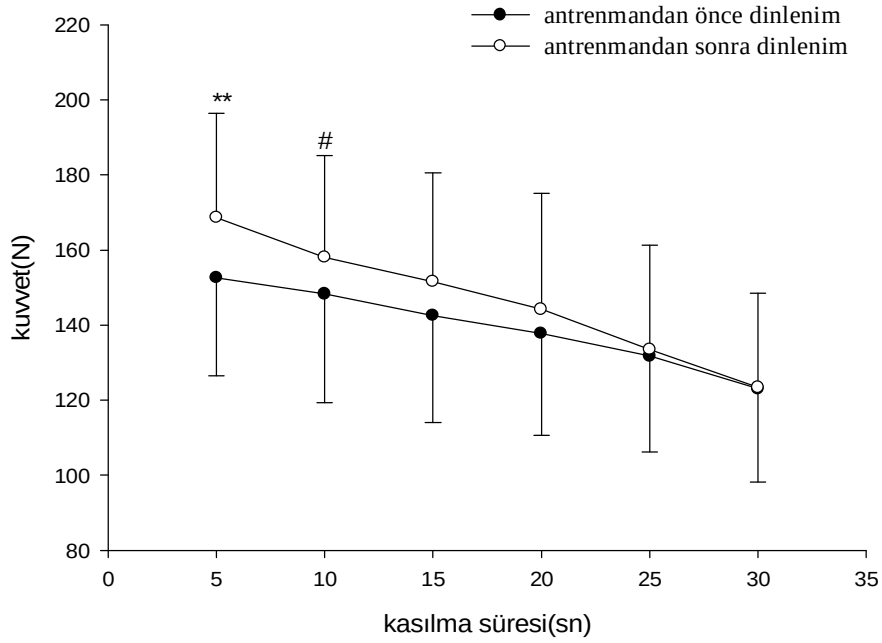
30 sn süre ile devam eden maksimal istemli diz ekstensiyonu sırasında kasılmanın başından itibaren kuvvette önce hızlı ve sonra daha yavaş bir azalma gözlenmiştir. Antrenman öncesi ve sonrası dinlenim ve yorgunluk sırasındaki bütün 5 sn lik ortalama kuvvet değerleri çizelge 4.5'te görülmektedir. Buna göre yorgunlukta yapılan izometrik kasılma sırasında ortalama kuvvet değerleri bütün 5 sn lik ortalamalarda yorgunluk öncesine göre istatistiksel olarak düşüş göstermiştir ($p < 0.001$). Antrenman öncesi dinlenim kasılmasında 153 ± 26 N olan maksimal kuvvet değeri kasılmanın ilk 5 saniyesinde kaydedilmiştir. Antrenman sonrası da pik kuvvet kasılmanın ilk 5 saniyesinde ve 167 ± 66 N olarak kaydedilmiştir. Bu iki değer arasında istatistiksel olarak anlamlı artış görülmüştür ($p < 0.005$). Antrenmanlardan önce dinlenim

kasılmasına ait 5-10. saniye arasındaki ortalama kuvvet 148 ± 28 N iken, antrenman sonrasında aynı dönemde 158 ± 27 N olarak kaydedilmiştir. Bu iki değer arasındaki kuvvet artışı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Antrenman öncesi ve sonrasında dinlenim ve yorgunluk kasılmasındaki kuvvet değişimleri şekil 4.14'te görülmektedir.

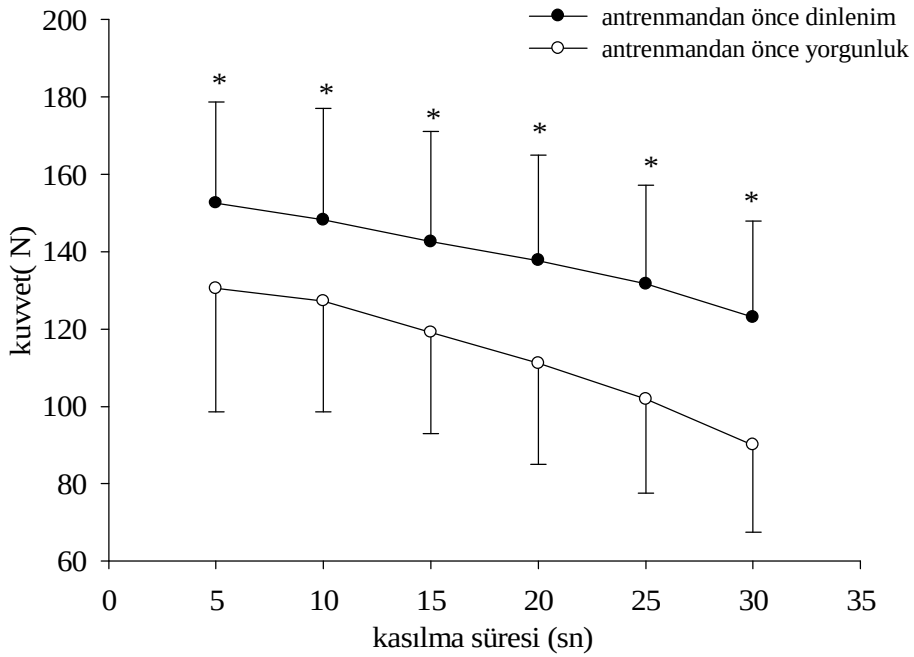
Antrenmanlardan önce yorgunluk kasılmasındaki kuvvet değerleri bütün sürelerde dinlenim kasılma değerlerinden daha düşük bulunmuştur ($p < 0.001$). Şekil 4.15'de antrenman öncesi yorgunlukla kuvvet değişimi gösterilmiştir. Antrenman sonrası dönemde de bütün sürelerde yorgunlukla anlamlı kuvvet azalması olduğu görülmüştür ($p < 0.001$). Yorgunlukla bu kuvvet değişimi şekil 4.16'da gösterilmiştir. Ancak hem antrenmanlardan önce ve hem de antrenman sonrasındaki yorgunluk kasılma kuvvetleri karşılaştırıldığında (şekil 4.17) antrenmanların yorgunluk kasılma değerlerine anlamlı bir etkisi kaydedilmemiştir ($p > 0.05$).

Çizelge 4.5: Antrenmanlar ve yorgunlukla maksimum kasılma kuvveti değişimi (* $p < 0.001$, yorgunluk testinden sonra değişen değerler için, # $p < 0.05$, ** $p < 0.005$ antrenman sonrasında değişen değerler için)

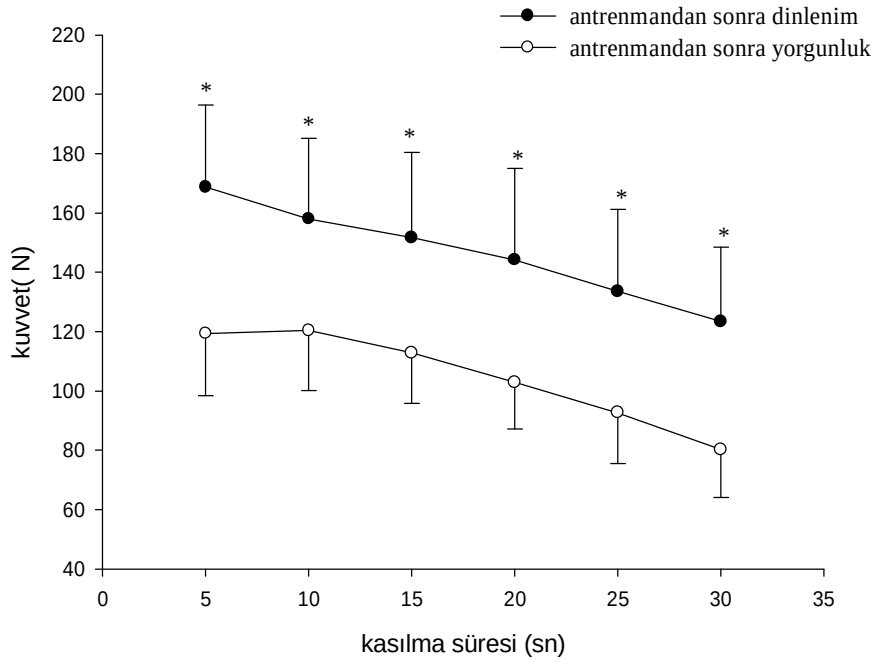
İzometrik kuvvet (N)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	153 ± 26	$131 \pm 31^*$	$167 \pm 66^{**}$	$119 \pm 20^*$
5-10 sn	148 ± 28	$127 \pm 28^*$	$158 \pm 27^{\#}$	$120 \pm 20^*$
10-15 sn	143 ± 28	$119 \pm 26^*$	151 ± 28	$113 \pm 16^*$
15-20 sn	138 ± 27	$111 \pm 26^*$	144 ± 30	$103 \pm 15^*$
20-25 sn	132 ± 25	$101 \pm 24^*$	133 ± 27	$93 \pm 17^*$
25-30 sn	123 ± 24	$90 \pm 22^*$	123 ± 25	$80 \pm 16^{*\#}$



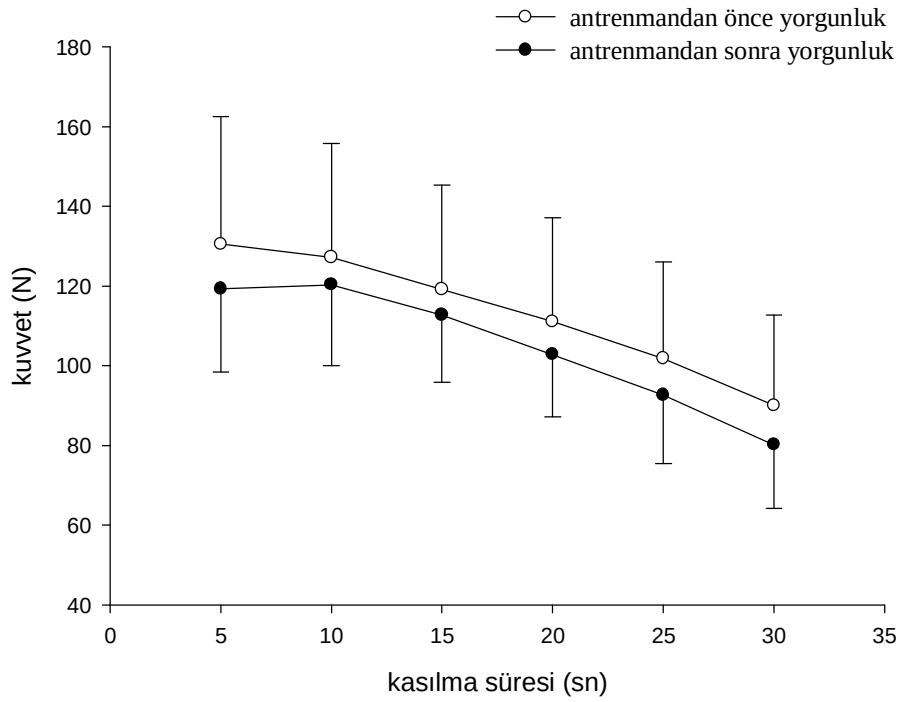
Şekil 4.14: Antrenmanların dinlenim durumundaki istemli maksimal izometrik kasılma kuvvetine etkisi (** p< 0.005 antrenman sonrası dinlenim kuvvet artışı , #p<0.05 antrenman sonrası dinlenim kuvvet artışı)



Şekil 4.15: Antrenmanlardan önce yorgunlukla maksimal istemli kuvvet değişimi (* p< 0.001 yorgunluk sonrası değişen değerler için)



Şekil 4.16: Antrenmanlardan sonra yorgunlukla maksimal istemli kuvvet değişimi (* $p < 0.001$ antrenman sonrası değişen değerler için)



Şekil 4.17: Antrenmanlarla yorgunluk sonrasındaki izometrik kuvvet değişimi (Antrenmanlarla anlamlı değişiklik kaydedilmemiştir)

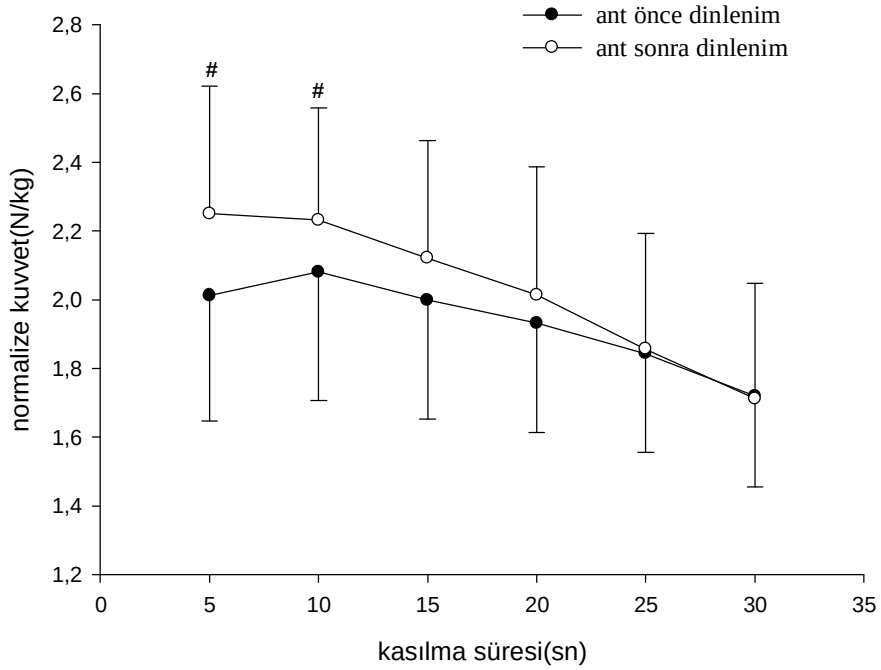
Antrenmanlardan önce ve sonra dinlenim ve yorgunluk kasılma kuvvet değerleri sporcuların vücut ağırlıklarına normalize edildiğinde çizelge 4.6'da görülen değerler kaydedilmiştir. Salt kuvvet değerlerinde olduğu gibi normalize değerlerde de hem antrenman öncesinde ve hem de antrenmanlar sonrasında yorgunluk kasılmasında kuvvet bütün sürelerde anlamlı olarak azalmıştır ($p<0.001$). Antrenmanlardan önce dinlenim kasılmasında ilk 5 sn'de 2.01 ± 0.37 N/kg olan kas kuvveti antrenman sonrasında 2.24 ± 0.37 N/kg olarak kaydedilmiştir. Antrenman sonrasında görülen bu kuvvet artışı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0.05$). Antrenman öncesi dinlenim kasılmasında 2.08 ± 0.37 N/kg olan 2. beş saniyedeki kuvvet ortalaması antrenman sonrasında 2.23 ± 0.32 N/kg değerine yükselmiştir. Bu kuvvet artışı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Şekil 4.18'de normalize kuvvet değerlerinin değişimi gösterilmektedir.

Şekil 4.19'da antrenmanlardan önce yorgunlukla normalize kuvvet değişimi gösterilmektedir. Vücut ağırlığına normalize edilen kuvvet değerleri incelendiğinde salt kuvvet değerlerinde olduğu gibi tüm sürelerde yorgunluk kasılmasında anlamlı kuvvet azalmaları görülmüştür ($p<0.001$).

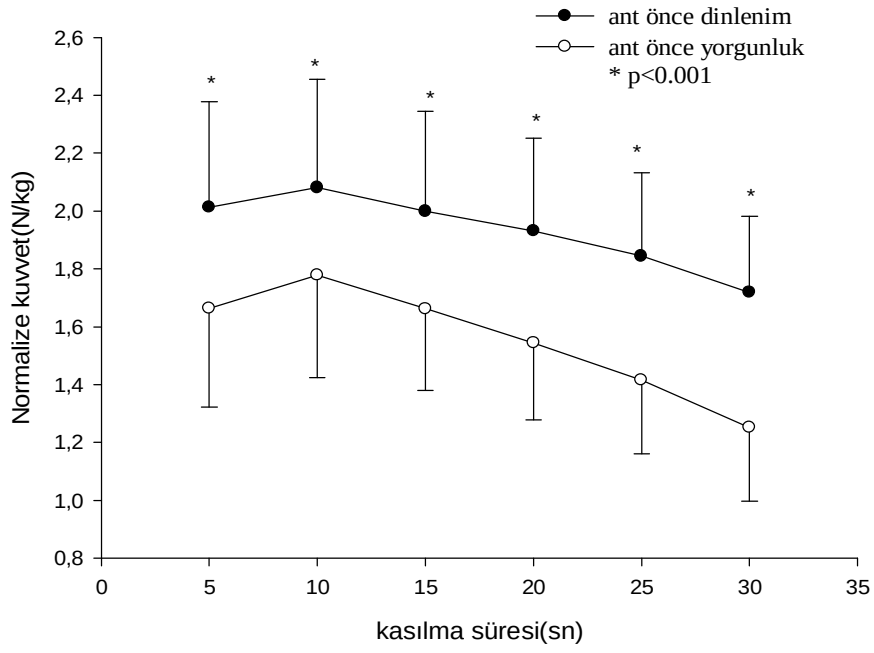
Antrenmanlardan sonra dinlenime göre yorgunluktaki normalize kuvvet değişimleri de şekil 4.19'da gösterilmiştir. Buna göre antrenmanlar sonrasında da antrenman öncesi dönemde olduğu gibi bütün sürelerde normalize kuvvet değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı kuvvet azalması görülmüştür ($p<0.001$). Hem antrenmanlar öncesi ve hem de sonrasında yorgunluk kasılmasında kaydedilen değerler arasında anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p>0.05$).

Çizelge 4.6:Antrenmanlarla ve yorgunluk testleri ile değişen normalize MVC değerleri (*p<0.001 yorgunluk testinden sonra değişen değerler için ve #p<0.05antrenmandan sonra değişen değerleri göstermektedir)

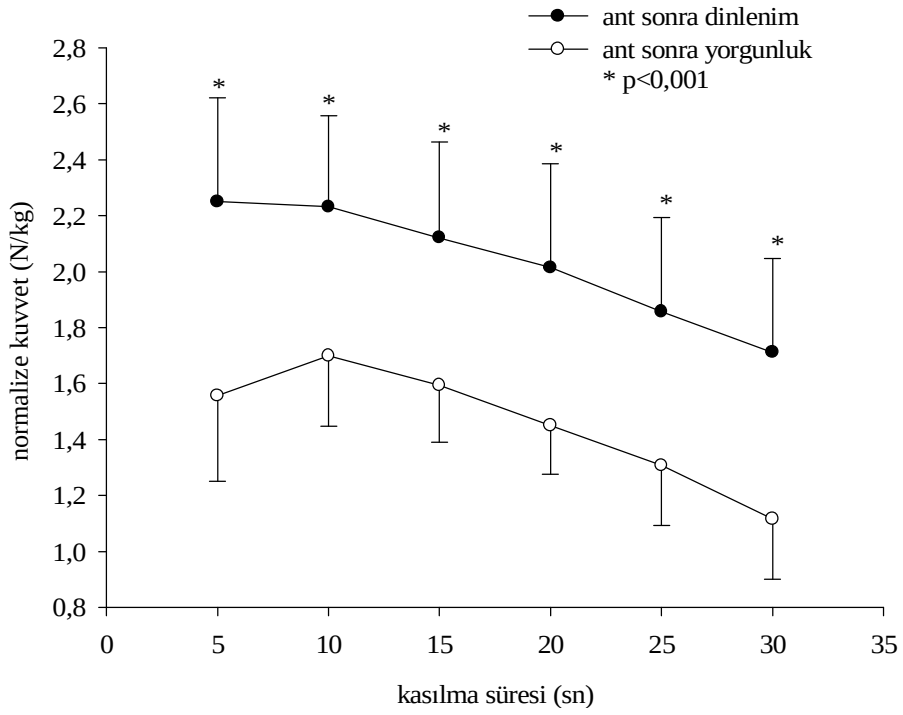
İzometrik kuvvet/Vücut ağırlığı (N/kg)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	2.01 ± 0.37	1.66 ± 0.34*	2.24 ± 0.37#	1.56 ± 0.30*
5-10 sn	2.08 ± 0.37	1.77 ± 0.35*	2.23 ± 0.32#	1.69 ± 0.24*
10-15 sn	1.99 ± 0.34	1.66 ± 0.28*	2.12 ± 0.32	1.59± 0.20*
15-20 sn	1.93 ± 0.31	1.54 ± 0.26*	2.01 ± 0.37	1.45 ± 0.17*
20-25 sn	1.84 ± 0.28	1.41 ± 0.25*	1.85 ± 0.33	1.30 ± 0.21*
25-30 sn	1.71 ± 0.26	1.25 ± 0.25*	1.71 ± 0.30	1.11 ± 0.21*



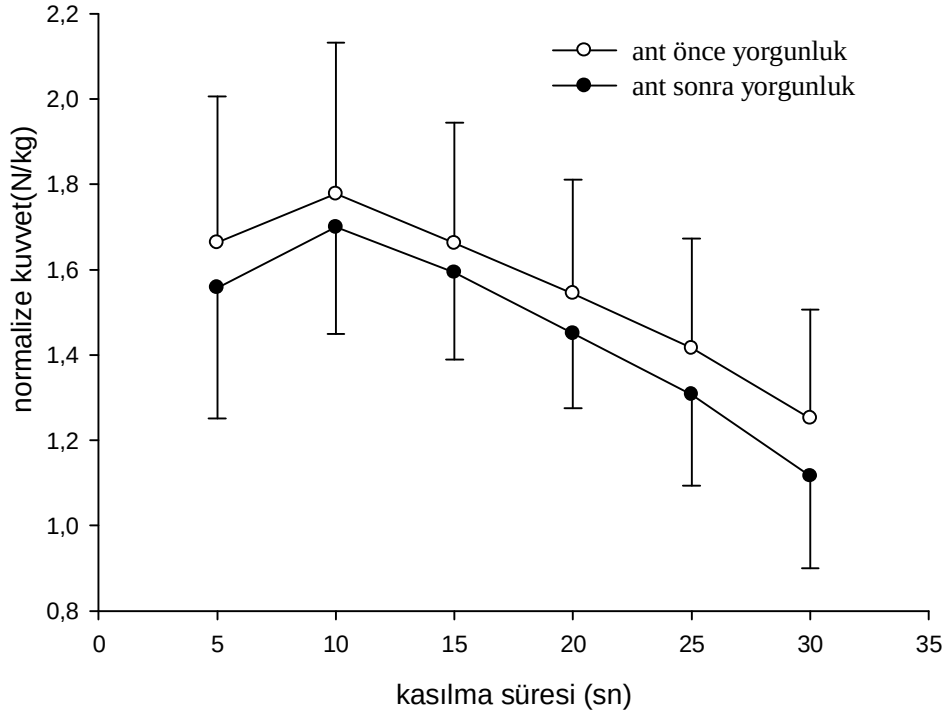
Şekil 4.18: Antrenmanlardan sonra dinlenim kasılması sırasındaki normalize kuvvet değişimi (#p<0.05 antrenmanlarla değişen değerler göstermektedir).



Şekil 4.19: Antrenmanlardan önce dinlenim ve yorgunluk kasılmasındaki normalize kuvvet değişimleri (*p<0.001 yorgunlukla kuvvet değişimini göstermektedir).



Şekil 4.20 : Antrenmandan sonra yorgunlukla normalize kuvvet değişimi (*p<0.001).



Şekil 4.21: Antrenmanlardan önce ve sonra yorgunlukta ölçülen normalize kuvvet değişimi (Antrenmanlarla yorgunlukta anlamlı kuvvet değişimi görülmemiştir).

4.7.2. Yorgunluk Testi Sırasında Yüklemeler Arasında Yapılan Maksimal Kasılma Kuvveti Sonuçları

3 dakikalık bisiklet yüklemeleri arasında gelişen yorgunluktan kuvvetin nasıl etkilendiğini gözlemlemek için alınan 10 sn süreli maksimal istemli kasılma kuvvet değerleri çizelge 4.7’de verilmiştir. Artan yüklemelerle beraber kasılma kuvveti de azalmaktadır. Antrenmanlardan önce ardışık ölçümler arasındaki kuvvet azalmasına bakıldığında 2. yükleme sonrasında 160.4 ± 25.5 N olan kuvvet değeri, 3.yükleme sonrasında 153.1 ± 27.1 N’a düşmüştür ($p < 0.05$). 4. yükleme sonrasında 148.4 ± 26.6 N olan kasılma kuvveti 5. yüklemeden sonra 131.5 ± 29 N’a düşmüştür ($p < 0.005$).

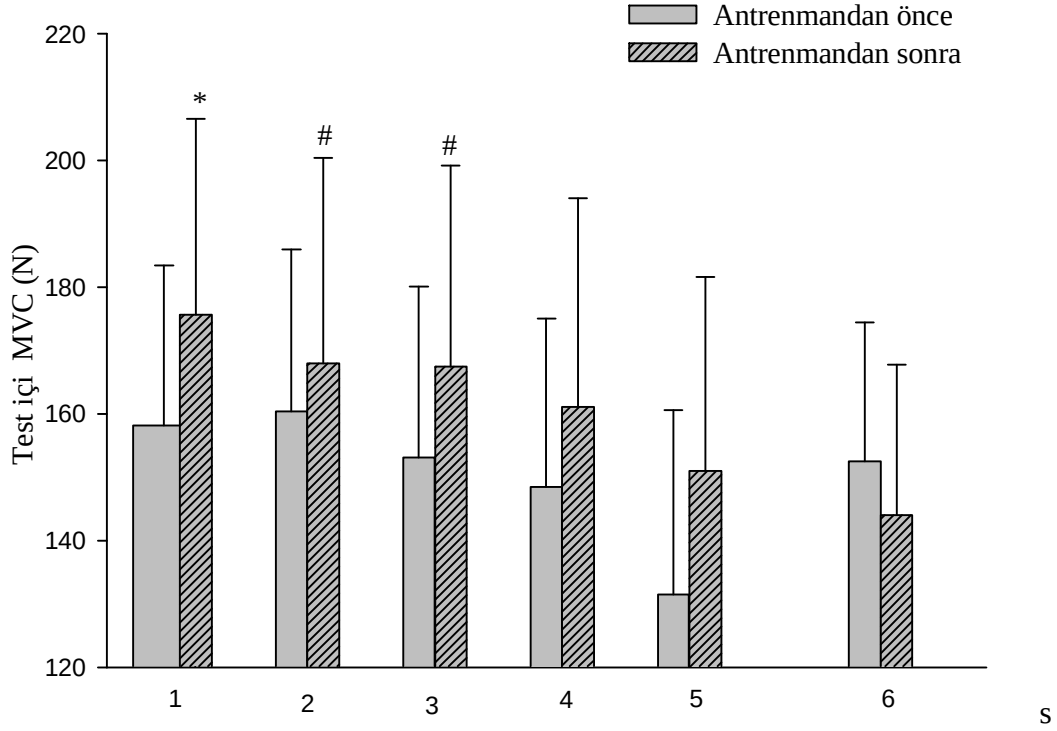
Antrenman sonrası ölçümlere bakıldığında ise 1.yüklemeden sonra ölçülen 175.7 ± 30.9 N değerindeki kas kuvveti 2. yüklemeden sonra 168.3 ± 33.4 N’a düşmüştür. Bu kuvvet azalması istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.005$). Ayrıca 3. yüklemeden sonra 167.5 ± 33.3 N olan kuvvet, 4. yüklemeden sonra 161.1 ± 34.5 N , 5.

yüklemeden sonra 151.1 ± 31.1 N ve 6. yüklemeden sonra ise 144.2 ± 27.1 N ölçülmüştür. Tüm bu kuvvet ölçümlerinin istatistiksel değerlendirmesinde bir önceki yükleme sonrası ölçüme göre anlamlı kuvvet azalması olduğu görülmüştür ($p < 0.05$).

Antrenman öncesi ve sonrası yorgunluk testinde ölçülen kuvvet değerlerine bakıldığında ise antrenmanlardan önce 158.1 ± 25.2 N olan 1. yükleme sonrası kuvvet değerinin antrenmanlardan sonra 175.7 ± 30.9 N'a yükseldiği görülmüştür. Bu kuvvet artışı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Şekil 4.22'de gösterilen antrenman sonrası kuvvet artışlarından diğerleri ise 2. ve 3. yüklemeler arasındaki kuvvet farklarıdır ($p < 0.05$).

Çizelge 4.7: Antrenmandan önce ve sonra yorgunluk testinde yüklemeler arasında yapılan maksimal istemli kasılma kuvvet ortalamaları. (** $p < 0.005$ bir önceki değere göre anlamlı farklılığı göstermektedir. # $p < 0.05$ bir önceki değere göre anlamlı farklılığı göstermektedir)

Salt Kuvvet Değerleri (N)	Antrenmandan Önce	Antrenmandan Sonra
1. Yükleme sonrası	158.1 ± 25.2	175.7 ± 30.9
2. Yükleme sonrası	160.4 ± 25.5	168.3 ± 33.4 **
3. Yükleme sonrası	153.1 ± 27.1 #	167.5 ± 33.3
4. Yükleme sonrası	148.4 ± 26.6	161.1 ± 34.5 #
5. Yükleme sonrası	131.5 ± 29.1 **	151 ± 31.1 #
6. Yükleme sonrası	152.5 ± 21.9	144.2 ± 27.1 #



Şekil 4.22: Antrenmandan önce ve sonra bisiklet intervalleri arasında ölçülen maksimal izometrik kuvvet değerleri (* $p<0.001$ antrenmandan sonra değişen değerleri göstermektedir, # $p<0.05$ antrenmandan sonra değişen değerleri göstermektedir).

4.7.3. Elektrik Uyarısı İle Kaydedilen Kuvvet Ölçüm Sonuçları

Elektrik uyarısının kasta oluşturduğu kuvvet yanıtları çizelge 4.8’de gösterilmiştir. Denekler istemli hiçbir harekette bulunmadan sadece elektrik uyarısının ürettiği kas kuvvet değeri antrenmanlardan önce dinlenim halinde iken 35 ± 12 N, yorgunlukta ise 23 ± 16 N olarak kaydedilmiş olup aradaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0.001$). Antrenmanlardan sonra dinlenim halinde verilen elektriksel uyarının oluşturduğu kuvvet 38 ± 11 N ve yorgunluk halinde 20 ± 12 N’a düştüğü bulunmuştur. Bu iki değer arasındaki farkın da antrenman öncesine benzer şekilde anlamlı olduğu görülmüştür ($p<0.001$).

Çizelge 4.8: Elektriksel uyarının kasta oluşturduğu istemsiz kuvvet değerleri (* $p<0.001$ yorgunlukta değişen kuvvet yanıtlarını göstermektedir)

Sadece elektrik uyarısı ile elde edilen kuvvet (N)	Antrenmandan önce		Antrenmandan sonra	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
	35± 12	23± 16*	38± 11	20± 12*

4.7.3.1. Elektrik Uyarısının Maksimal İstemli İzometrik Kasılma Sırasında Uygulanması İle Kaydedilen Kuvvet Sonuçları

Maksimal istemli izometrik kasılma sırasında verilen elektriksel uyarı hem antrenmanlardan önce ve hem de antrenmanlardan sonra kuvvet artışına yol açmamıştır. Aynı şekilde yorgunluktan sonra da elektriksel uyarının kuvvette anlamlı bir değişiklik oluşturmadığı görülmüştür.

Şekil 4.23’de görüldüğü gibi hem antrenmanlardan önce ve hem de antrenmanlardan sonra yorgunluk sonrası yapılan maksimal istemli kasılma ya da maksimal istemli kasılma+elektrik uyarısı kasılma kuvvet değerlerinde bütün ortalama değerlerde bir önceki 5 saniyelik kuvvet ortalamasına göre anlamlı kuvvet azalmaları görülmüştür ($p<0.001$).

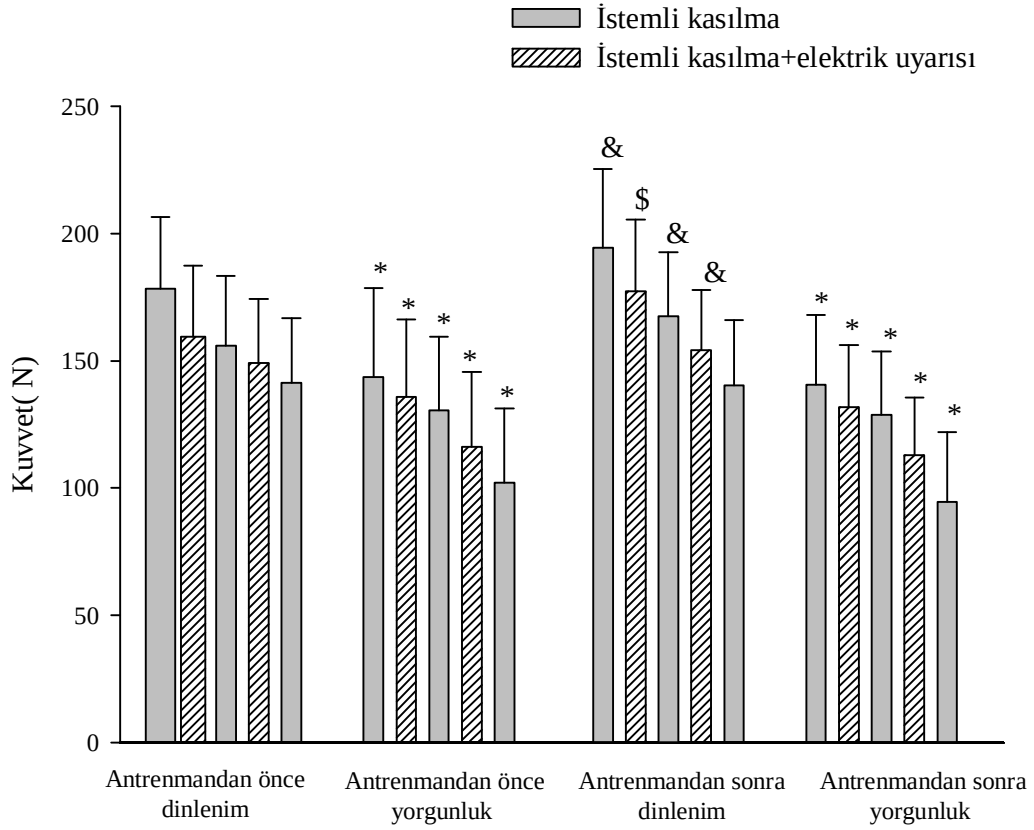
Bütün ölçümlerde kasılma istemli olarak başlatılmış ve ilk elektrik uyarısı yaklaşık 5 sn içinde verilmiştir. Antrenmanlardan önce maksimal kasılma sırasında ilk elektrik uyarısından önceki istemli kuvvet ortalaması 172.2± 29.1 N iken, elektrik uyarısının geldiği ikinci 5 sn aralığında 157. 1± 26.9 N olarak kaydedilmiştir. Üçüncü 5 sn aralığında ölçülen istemli kasılma kuvvet ortalaması 152. 2± 27.4 N iken elektrik uyarısının verildiği dördüncü 5 sn aralığında kuvvet ortalaması 145. 7± 25.4 N olarak kaydedilmiştir. Bu aralıklarda kas kuvvetinin dışarıdan verilen uyarılarla artmadığı, tam tersine yorgunluk örüntüsünün tipik seyrini de değiştirmedeği görülmüştür ($p<0.001$). Kasta elektriksel uyarı gelmesine rağmen kuvvet azalması devam etmiştir.

Antrenman öncesi dönemde yorgunluk kasılması sırasında elektrik uyarısının etkisine bakıldığında ilk uyarı gelmeden önceki istemli kasılma ortalaması 141.5± 33.3 N iken elektirik uyarısının geldiği ikinci 5 saniyedeki kuvvet ortalaması 135.4± 29.4 N

olarak ölçülmüştür. İkinci uyarı gelmeden önceki istemli kasılma kuvveti ortalaması 127.8 ± 29.2 N iken üçüncü 5 saniye aralığında elektriksel uyarının da gelmesi ile kuvvet ortalaması 116.1 ± 30.6 N olarak kaydedilmiştir. Yapılan istatistiksel analizler elektriksel uyarının geldiği zaman aralığında da kuvvetin anlamlı oranda azalmaya devam ettiğini göstermiştir ($p < 0.05$).

Antrenmanlardan sonra dinlenim sırasındaki kasılmada elektriksel uyarının etkisine bakıldığında uyarı gelmeden önceki istemli kuvvet ortalaması 191.6 ± 31.5 N iken, uyarının verildiği ikinci 5 sn aralığında kasılma kuvveti 176.1 ± 27.2 N olarak kaydedilmiştir. Antrenman sonrası dönemin yorgunluk kasılmasında ilk 5 sn'deki istemli kuvvet ortalaması 136.2 ± 25.1 N iken uyarının verildiği ikinci beş saniyede kuvvet ortalaması 128.6 ± 23 N olarak tespit edilmiştir. Uyarı kesildikten sonraki istemli kasılma ortalaması 125.1 ± 23.9 N iken uyarı geldiğinde kuvvet ortalaması 110.8 ± 21.5 N olarak kaydedilmiştir. Yapılan istatistiksel değerlendirmelerde elektirik uyarısı verildiği dönemde de kasılma kuvvetinin bir önceki kuvvet ortalamasına göre düşmeye devam ettiği ve bu kuvvet azalmalarının istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($p < 0.001$).

Yorgunluk öncesi değerler incelendiğinde antrenmanlardan sonra hem istemli ve hem de istemli+elektrik uyarısı kuvvet değerlerinin şekil 4.24' te gösterildiği gibi arttığı görülmüştür ($\&p < 0.001$, $\$p < 0.05$).



Şekil 4.23: Maksimal istemli izometrik kasılma + elektriksel uyarının verildiği ölçümlerde kuvvet değişimi (* $p<0.001$ yorgunluk öncesine göre kuvvet azalmasını göstermektedir, & $p<0.001$ antrenman öncesi döneme göre kuvvet artışını göstermektedir, \$ $p<0.05$ antrenman öncesi döneme göre kuvvet artışını göstermektedir)

4.8. EMG Sonuçları

4.8.1. Ortalama Frekans Sonuçları

Her üç kasın da ham EMG değerleri 20-500 Hz filtrelemelerden sonra 5 er saniyelik ortalamalar alınarak değerlendirilmiştir. Buna göre vastus lateralis kasının ortalama frekans değerleri bütün ölçüm kayıtlarında ardışık değerler arasında anlamlı oranda azalmıştır ($p<0.001$). Çizelge 4.9’da gösterildiği gibi antrenman öncesi dinlenim kasılmasında başlangıçta 72 ± 5 Hz olan ortalama frekans değeri 30 saniyelik kasılmanın sonunda 58 ± 5 Hz’e düşmüştür ($p<0.001$). Benzer şekilde antrenmanlardan sonra da başlangıçta ortalama 74 ± 6 Hz olan ortalama frekans 61 ± 4 Hz’e düşmüştür ($p<0.001$).

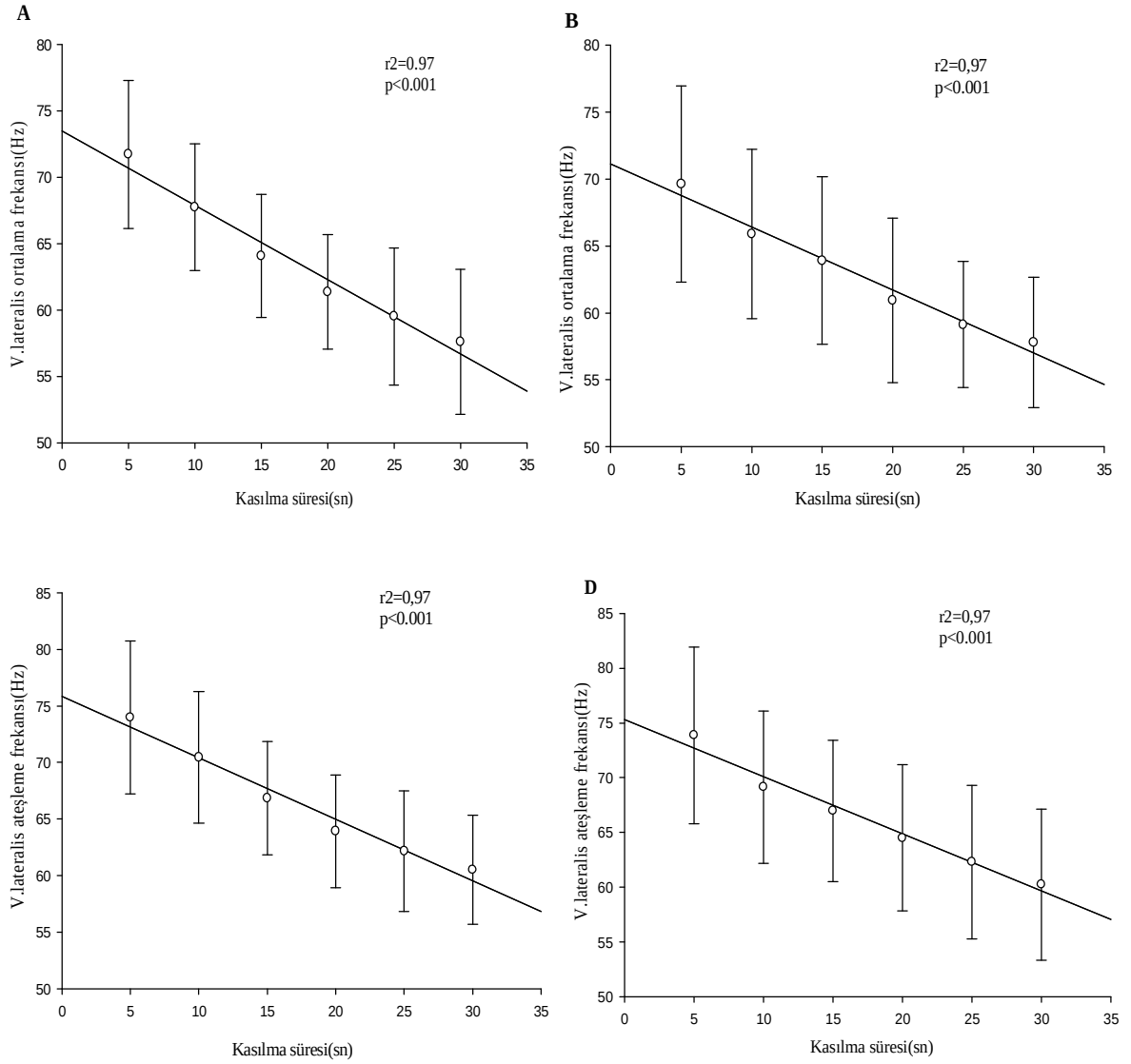
Ayrıca kasılma zamanı ilerledikçe bütün 5 saniyelik ortalama frekans değerlerinin bir önceki 5 sn ortalama frekans değerinden anlamlı olarak düşük olduğu kaydedilmiştir ($p<0.001$) Antrenmanların dinlenim ya da yorgunluk kasılması sırasındaki ortalama frekans değerlerine bir etkisi görülmemiştir ($p>0.05$).

Maksimal kuvvetin vastus lateralis kasına ait ortalama frekanslarla değişimi şekil 4.25'te gösterilmiştir. Buna göre bütün ölçümlerde frekansın azalması ile birlikte kuvvet değerleri doğrusal olarak azalmaktadır.

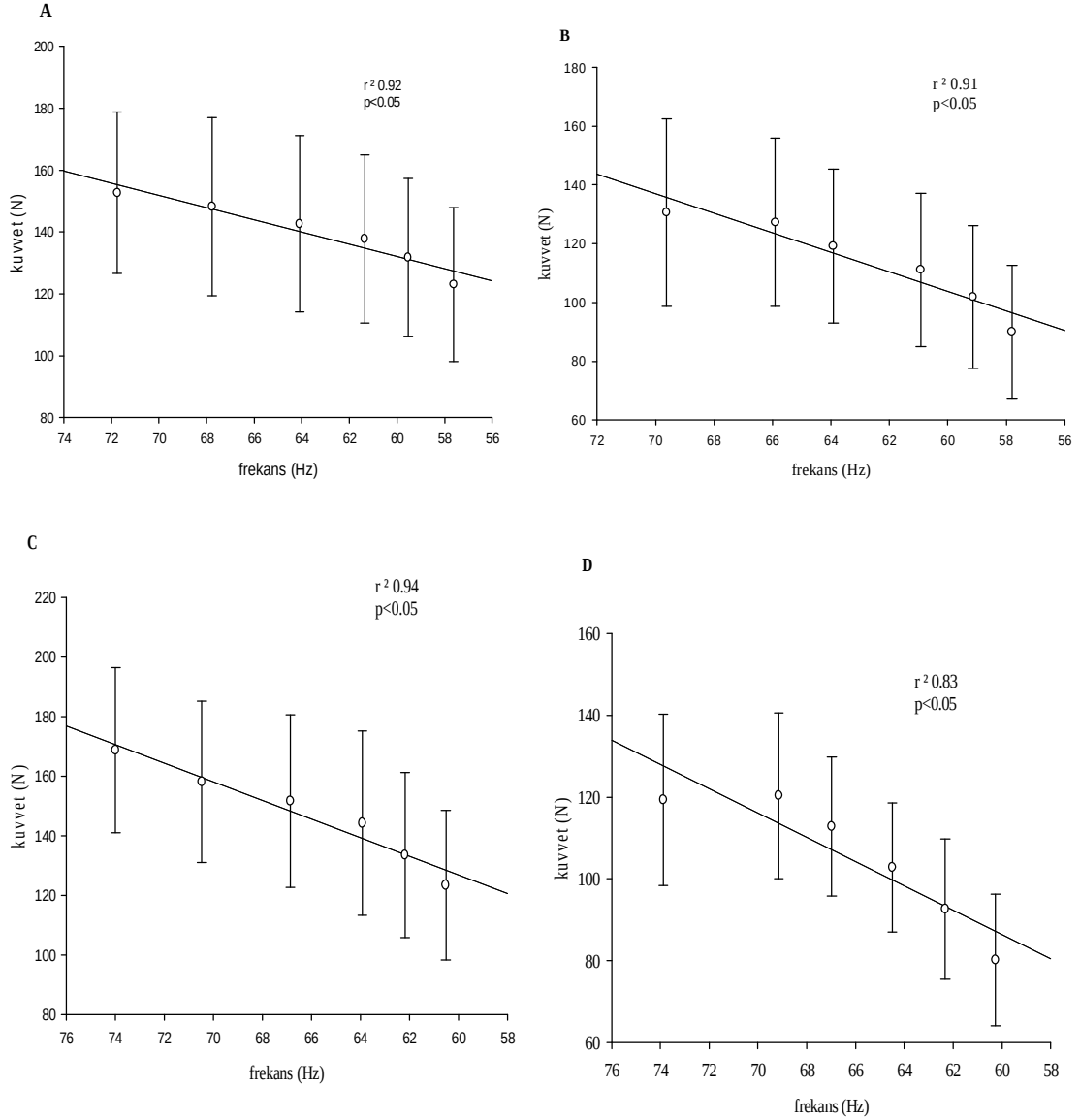
Çizelge 4.9: Vastus lateralis ortalama frekansı değişimi (* $P<0,001$ ardışık değerler arasındaki farklılık,)

Vastus Lateralis Ortalama frekans(Hz)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	72±5	70± 7	74±6	74 ±8
5-10 sn	68±4 *	66±6 *	70±5 *	69±6 *
10-15 sn	64±4 *	64±6 *	67±5 *	67± 6 *
15-20 sn	61±4 *	61±6 *	64±4 *	65± 6 *
20-25 sn	60±5 *	59±4 *	62±5 *	62±7 *
25-30 sn	58±5 *	58±4 *	61±4 *	60±6 *

Vastus lateralis kasının ortalama frekans değerlerinin şekil 4.24'te görüldüğü gibi doğrusal olarak azaldığı tespit edilmiştir. Maksimal kuvvetin vastus lateralis kasına ait ortalama frekanslarla değişimi şekil 4.25' te gösterilmiştir. Buna göre bütün ölçümlerde frekansın azalması ile birlikte kuvvet değerleri doğrusal olarak azalmaktadır.



Şekil 4.24: Vastus lateralis kasına ait ortalama frekans değerlerinin kasılma süresi boyunca azaldığını gösteren grafik. A)antrenman öncesi dinlenim kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi B)antrenman öncesi yorgunluk kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenim kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi değerini göstermektedir.



Şekil 4.25: Kuvvet ve vastus lateralis ortalama frekans değişim ilişkisini gösteren grafik A) antrenmandan önce dinlenim kasılmasındaki frekans-kuvvet değişimini B) Antrenmandan önce yorgunluk kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini C) Antrenmandan sonra dinlenim kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini D)) Antrenmandan sonra dinlenim kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini göstermektedir.

Çizelge 4.10’da gösterildiği gibi antrenman öncesi dinlenim kasılmasında başlangıçta 70 ± 6 Hz olan ortalama frekans değeri 30 saniyelik kasılmanın sonunda 56 ± 7 Hz’e düşmüştür ($p < 0.001$). Benzer şekilde antrenmanlardan sonra da başlangıçta ortalama 76 ± 6 Hz olan ortalama frekans 61 ± 7 Hz’e düşmüştür ($p < 0.001$). Ayrıca

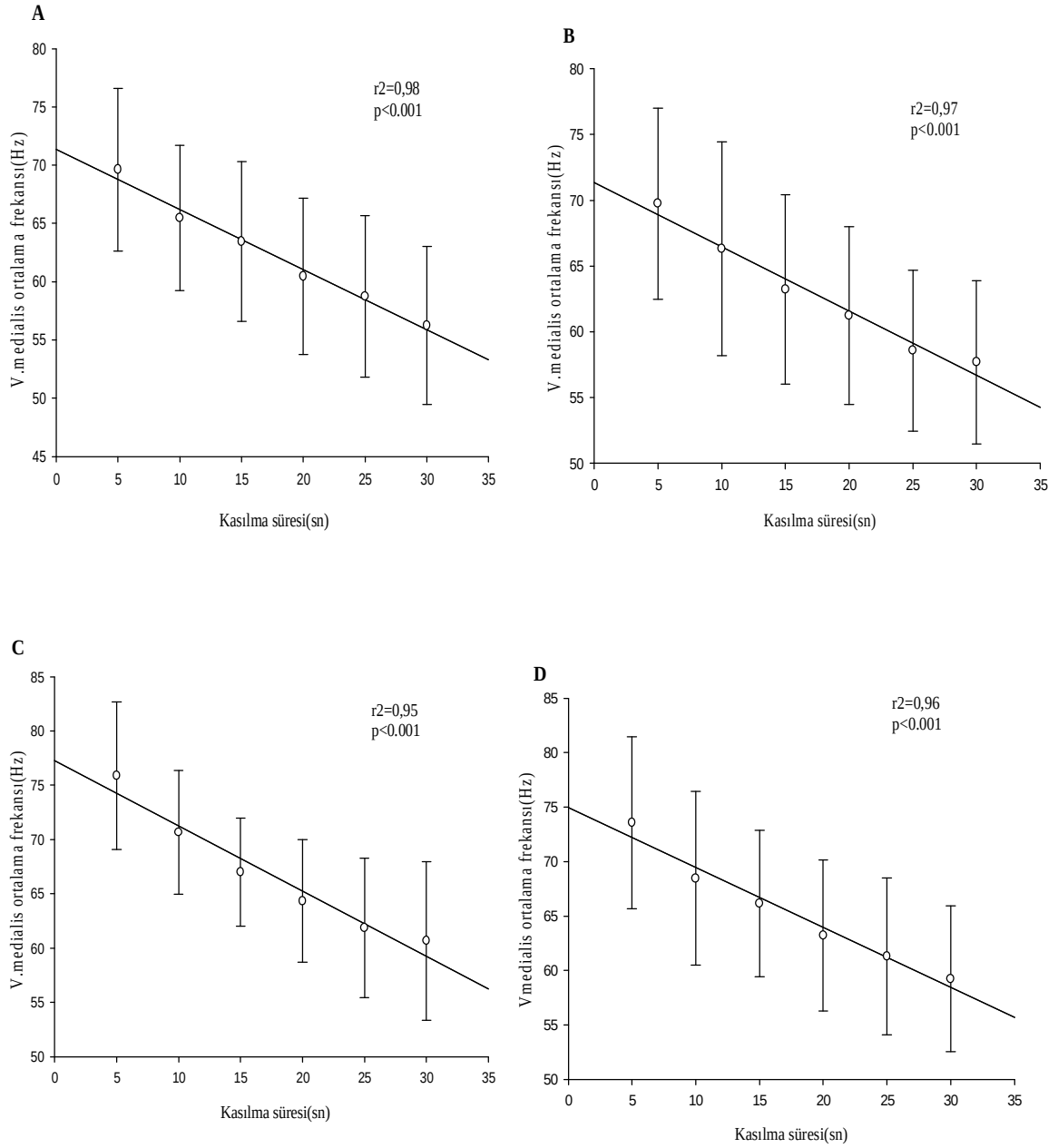
kasılma zamanı ilerledikçe bütün 5 saniyelik ortalama frekans değerlerinin bir önceki 5 sn ortalama frekans değerinden anlamlı olarak düşük olduğu kaydedilmiştir ($p<0.001$).

Antrenmanların dinlenim ya da yorgunluk sonrası kasılmadaki medialis frekans değerlerine etkisi incelendiğinde antrenmanlardan sonra dinlenim kasılmasında 5 ve 10. saniye ortalamalarında ($p<0.01$) ve dinlenim kasılmasında 20 ve 30.saniye ortalamalarında ($p<0.05$) anlamlı frekans artışları görülmüştür. Ancak antrenmanlardan sonra yorgunluk kasılmasına ait frekans değerlerinde anlamlı değişiklik kaydedilmemiştir ($p>0.05$).

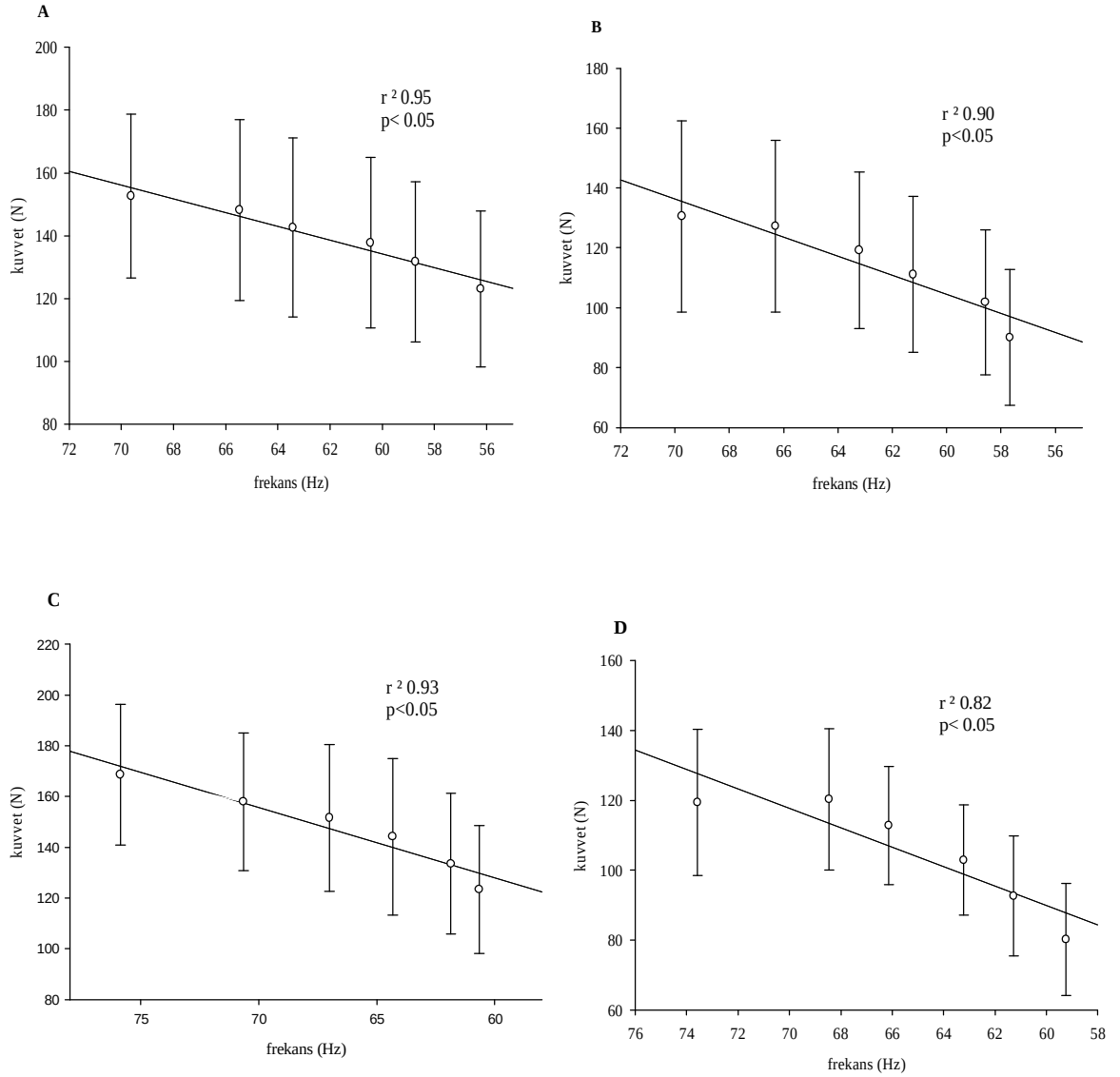
Çizelge 4.10: Vastus medialis kasının ortalama frekans değişimi (* $p<0,005$ ardışık değerler arasındaki farklılık, & $p<0,01$ ve # $p<0,05$ antrenmandan sonraki ölçümlerde kaydedilen farklılık)

Vastus Medialis Ortamala Frekans(Hz)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	70± 6	70± 7	76± 6 &	74± 7
5-10 sn	65± 6 *	66± 8 *	71± 5 * &	68± 7 *
10-15 sn	63± 6 *	63± 7 *	67± 4 *	66± 6 *
15-20 sn	60± 6 *	61± 6 *	64± 5 * #	63± 6 *
20-25 sn	59± 7 *	59± 6 *	61± 6 *	61± 7 *
25-30 sn	56± 7 *	58± 6 *	61± 7 * #	59± 6 *

Vastus medialis kasının ortalama frekans değerlerinin şekil 4.26’da görüldüğü gibi doğrusal olarak azaldığı tespit edilmiştir. Maksimal kuvvetin vastus medialis kasına ait ortalama frekanslarla değişimi şekil 4.27’de gösterilmiştir. Buna göre bütün ölçümlerde frekansın azalması ile birlikte kuvvet değerleri de doğrusal olarak azalmaktadır.



Şekil 4.26: Vastus medialis kasına ait ortalama frekans değerlerinin kasılma süresi boyunca azaldığını gösteren grafik A) antrenman öncesi dinlenim kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi B) antrenman öncesi yorgunluk kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenim kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi değerini göstermektedir.



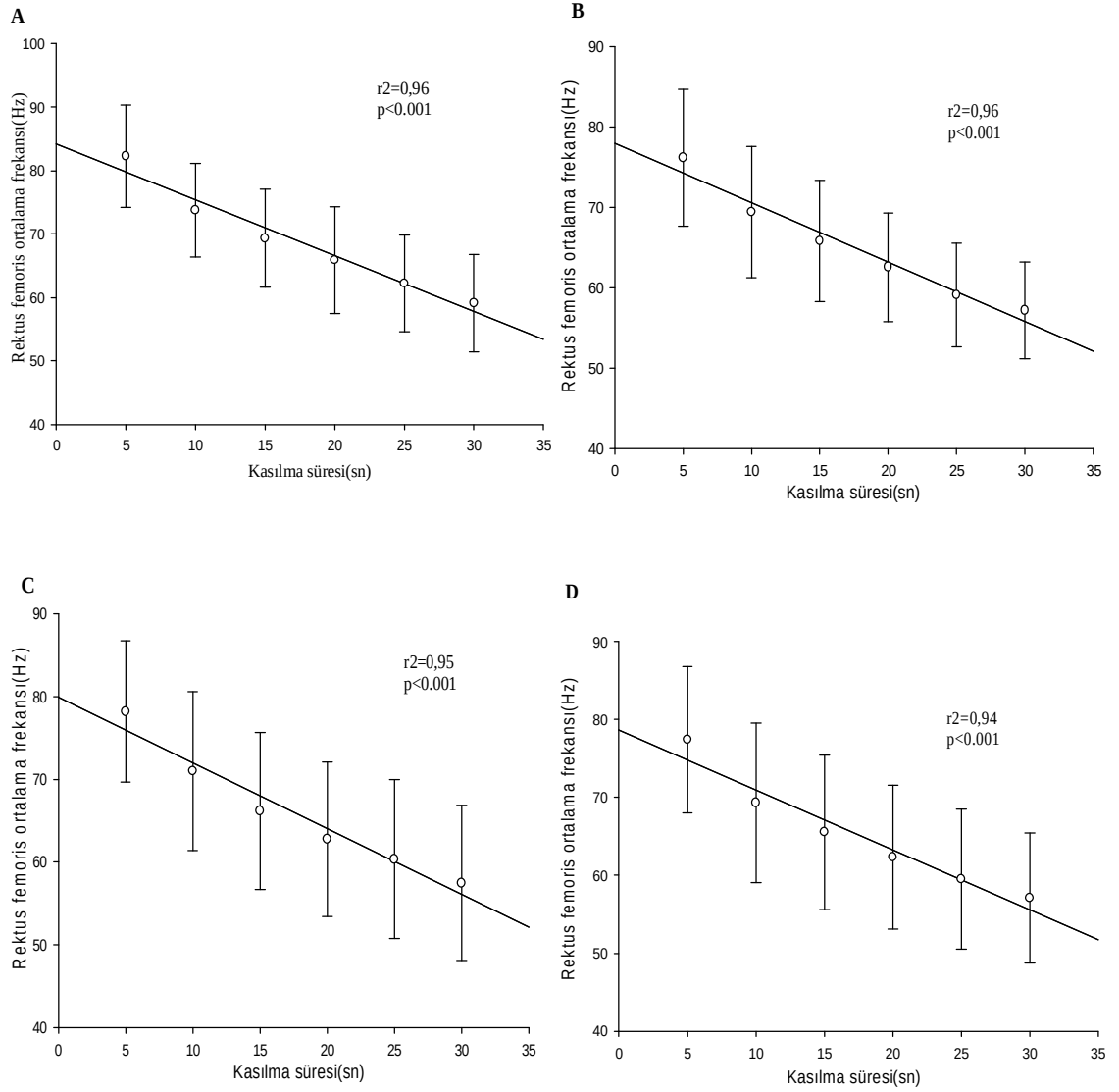
Şekil 4.27: Kuvvet ve vastus medialis ortalama frekans değişim ilişkisini gösteren grafik A) antrenmandan önce dinlenim kasılmasındaki frekans-kuvvet değişimini B) Antrenmandan önce yorgunluk kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini C) Antrenmandan sonra dinlenim kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini D)) Antrenmandan sonra dinlenim kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini göstermektedir.

Çizelge 4.11’de rektus femoris kasına ait ortalama frekans değerleri görülmektedir. Antrenmanlardan önce dinlenim kasılmasının ilk 5 saniyesinde 82 ± 8 Hz olan rektus ortalama frekans değeri son 5 saniyede 59 ± 7 Hz’e düşmüştür ($p < 0.001$). Antrenmanlardan sonra ilk 5 saniyede 78 ± 8 Hz olan ortalama rektus frekans değeri son 5 saniyede 57 ± 9 Hz’e düşmüştür. Ayrıca kasılma zamanı ilerledikçe bütün 5 saniyelik ortalama frekans değerlerinin bir önceki 5 sn ortalama frekans değerinden anlamlı olarak düşük olduğu kaydedilmiştir ($p < 0.001$).

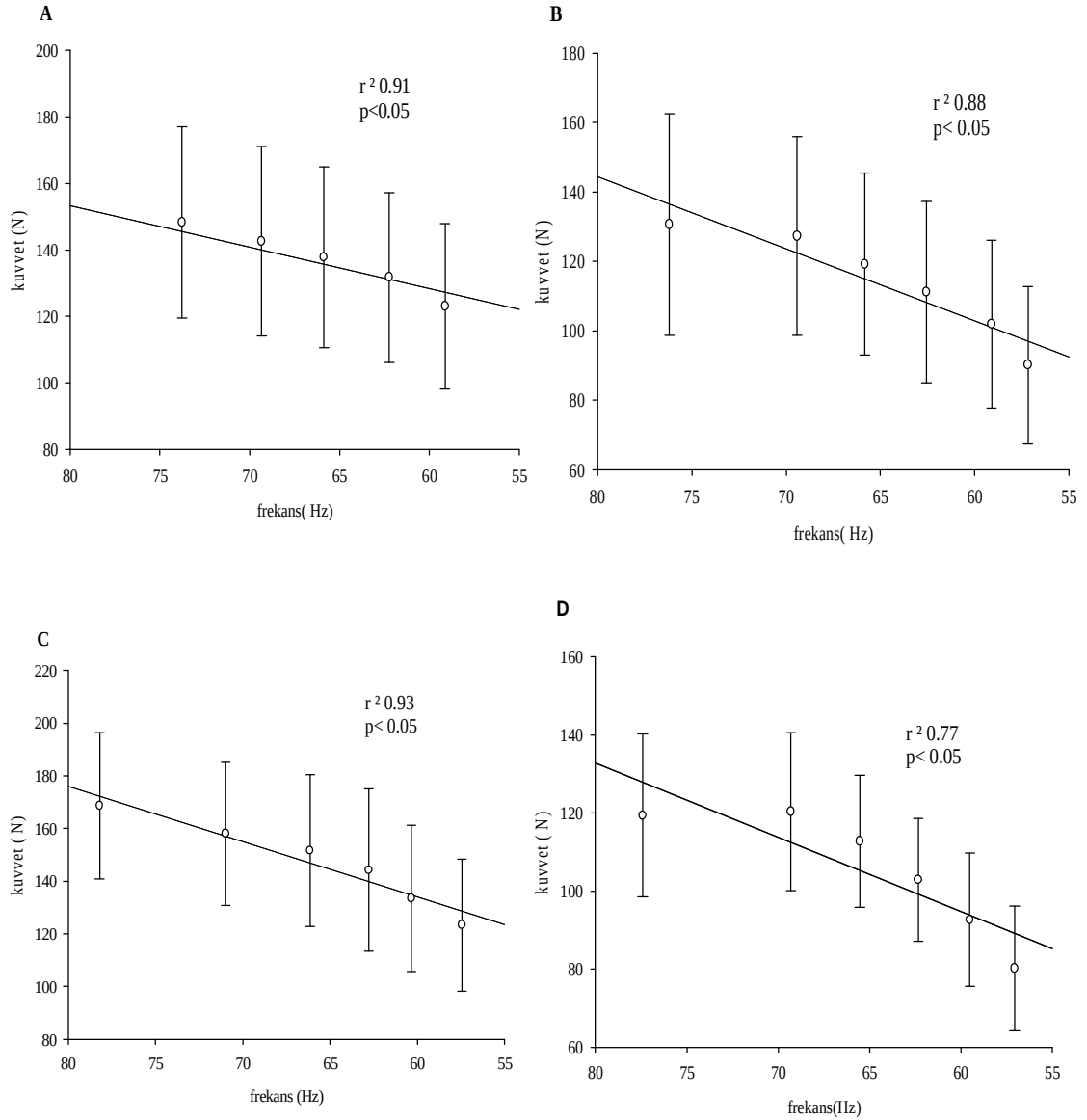
Çizelge 4.11 : Rektus femoris ortalama frekans değışimi (*P< 0.001 ardışık değerler arasındaki farklılık, #p<0.05 yorgunluk öncesine göre farklılık)

Rektus Femoris Ortalama Frekans (Hz)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	82± 8	76± 8	78± 8	77± 9
5-10 sn	74± 7 *	69± 8 *	71± 9 *	69± 10*
10-15 sn	69± 7 *	66± 7 *	66± 9 *	66± 9 *
15-20 sn	66± 8 *	63± 6 *	63± 9 *	62± 9 *
20-25 sn	62± 7 *	59± 6 *	60± 9 *	59± 8 *
25-30 sn	59± 7 *	57± 6 *	57± 9 *	57± 8 *

Rektus femoris kasının ortalama frekans değerlerinin şekil 4.28’de görüldüğü gibi doğrusal olarak azaldığı tespit edilmiştir. Maksimal kuvvetin rektus femoris kasına ait ortalama frekanslarla değışimi şekil 4.29’da gösterilmiştir. Buna göre bütün ölçümlerde frekansın azalması ile birlikte kuvvet değerleri de doğrusal olarak azalmaktadır.



Şekil 4.28: Rectus femoris kasına ait ortalama frekans değerlerinin kasılma süresi boyunca azaldığını gösteren grafik A) antrenman öncesi dinlenim kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi B) antrenman öncesi yorgunluk kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenim kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk kuvvetine ait ortalama frekansın zamana bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 4.29: Kuvvet ve rektus femoris ortalama frekans değişim ilişkisini gösteren grafik A) antrenmandan önce dinlenim kasılmasındaki frekans-kuvvet değişimini B) Antrenmandan önce yorgunluk kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini C) Antrenmandan sonra dinlenim kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini D) Antrenmandan sonra dinlenim kasılmasındaki kuvvet-frekans değişimini göstermektedir.

Aynı ölçüm içinde kaslar arasındaki frekanslar değerlendirildiğinde antrenman öncesi dinlenim kasılmasında rektus femoris kasının ilk 5 saniye ortalamasında vastus medialis ve lateralisten anlamlı olarak yüksek frekans değerlerine sahip olduğu görülmüştür ($p < 0.001$). Sonraki 10, 15 ve 20. saniye ortalamalarında da rektus kasının diğer iki kastan yüksek atarşleme frekansına sahip olduğu görülmüştür ($p < 0.05$). Antrenman öncesi yorgunluk kasılmasında da rektus kası ilk 5 saniyede diğer kaslardan daha yüksek

ortalama frekans göstermiştir ($p<0.05$). Antrenmanlardan sonra kaslar arasında ortalama frekans değerlerinde anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p>0.05$).

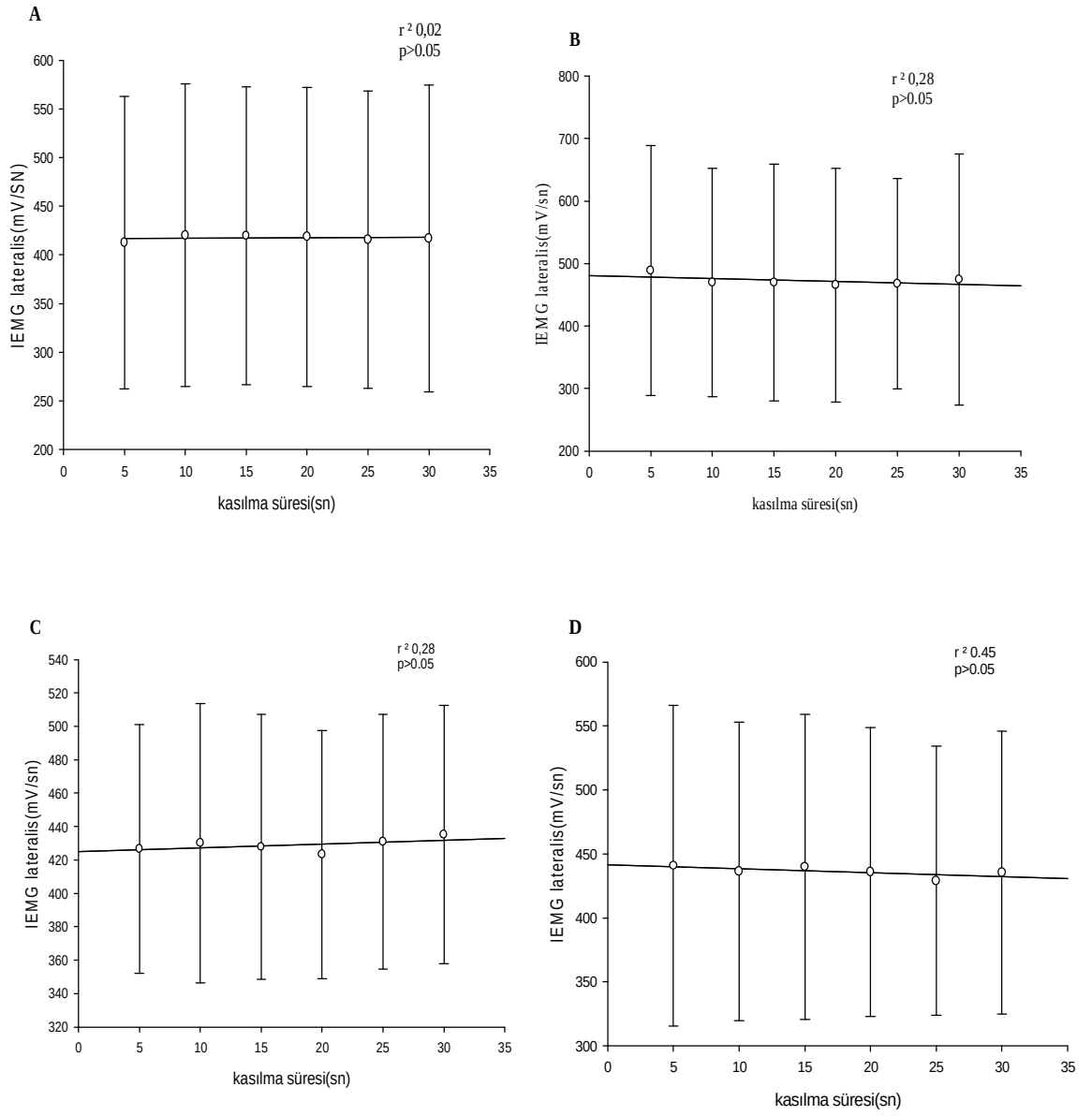
4.8.2.IEMG Sonuçları

Vastus lateralis kasının IEMG değerlerine bakıldığında bütün sürelerde yorgunlukla artış olduğu ancak bu değerlerin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür ($p>0.05$). Çizelge 4.12’de görüldüğü gibi antrenmanlardan sonraki dinlenme kaydında da IEMG değerlerinin antrenman öncesine göre istatistiksel olarak anlamlı olmadığı bulunmuştur ($p>0.05$).

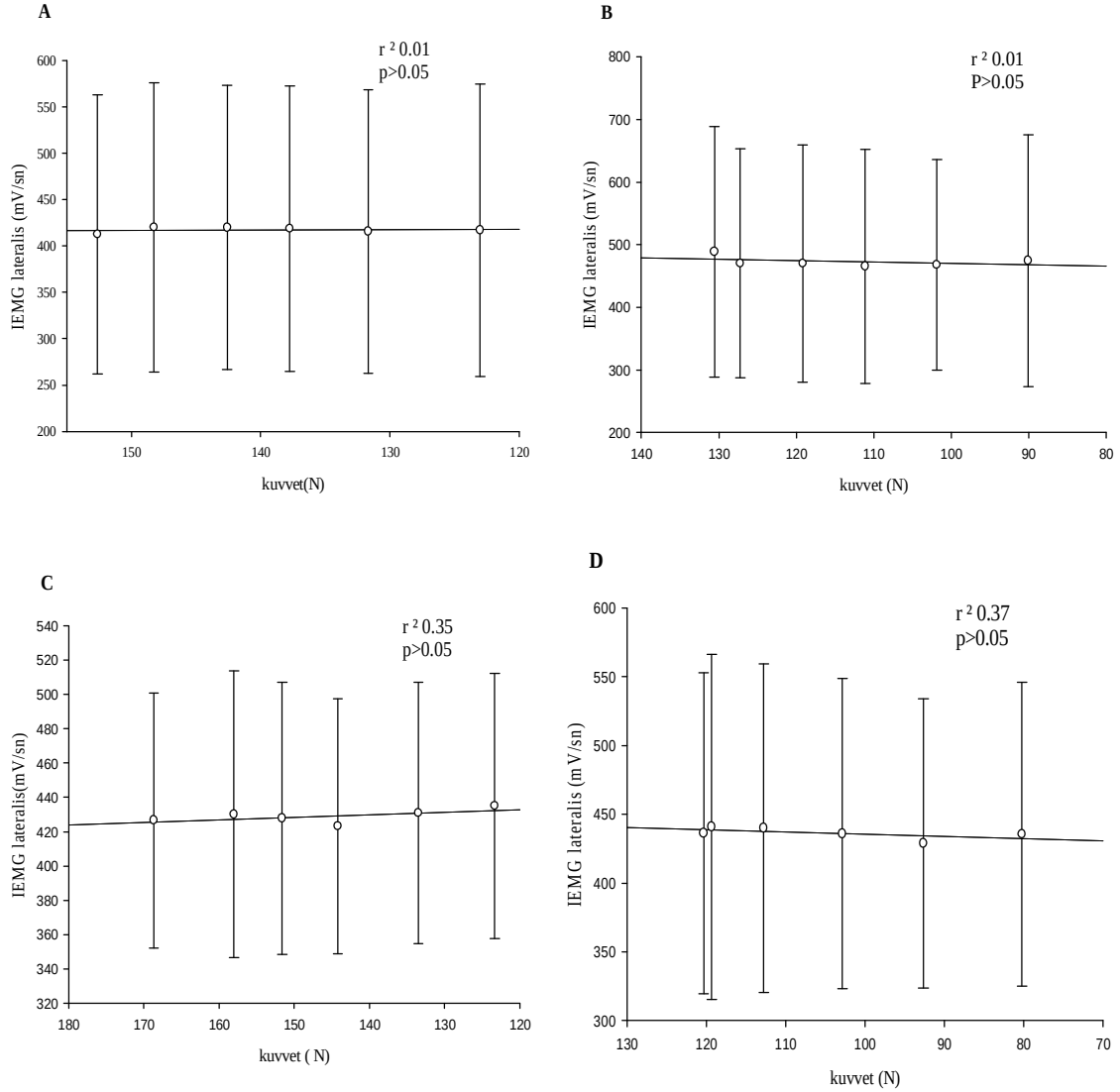
Çizelge 4.12: Vastus lateralis kasına ait IEMG değerleri.

IEMG LATERALİS (mV/sn)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenme	Yorgunluk	Dinlenme	Yorgunluk
1-5 sn	413± 150	489± 200	427± 74	441± 125
5-10 sn	420± 155	470± 182	430± 83	436± 116
10-15 sn	420± 153	469± 189	428± 79	440± 119
15-20 sn	419± 153	466± 186	424± 74	436± 112
20-25 sn	416± 152	468± 168	431± 76	429± 105
25-30 sn	417± 157	474± 201	435± 77	436± 110

Şekil 4.30’da vastus lateralis kasının bütün kasılmalarındaki zamana bağlı ortalama IEMG grafikleri görülmektedir. Kuvvete bağlı IEMG değerlerinin değişimine bakıldığında ise kuvvet azalmasına rağmen IEMG lateralis değerlerinin belirgin bir azalma göstermediği kuvvet- IEMG değişimini gösteren şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.30: Vastus lateralis kasına ait IEMG değerlerini gösteren grafik. a) antrenman öncesi dinlenim IEMG değerlerinin zamana bağlı değişimi b) antrenman öncesi yorgunluk IEMG değerlerinin zamana bağlı değişimi c) antrenman sonrası dinlenim IEMG değerlerinin zamana bağlı değişimi d) antrenman sonrası yorgunluk IEMG değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir.



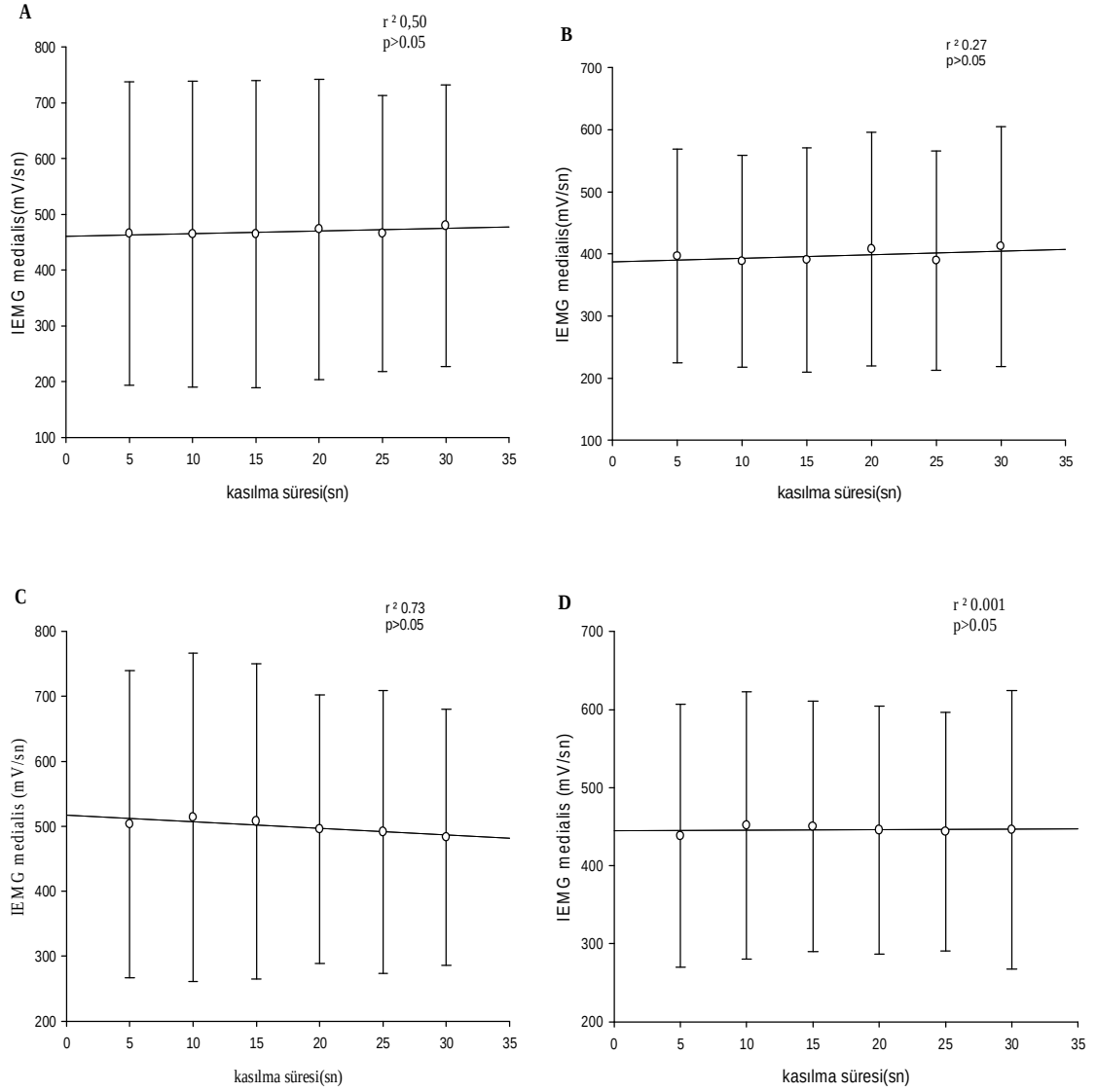
Şekil 4.31: Vastus lateralis kasına ait IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik. a)antrenman öncesi dinlenme IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi b)antrenman öncesi yorgunluk IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi c) antrenman sonrası dinlenme IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi d) antrenman sonrası yorgunluk IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini göstermektedir.

Çizelge 4.13'te vastus medialis kasına ait IEMG değerleri verilmiştir. Medialis kasında yorgunlukla veya antrenmanlarla anlamlı değişiklik gösterilmemiştir ($p > 0.05$).

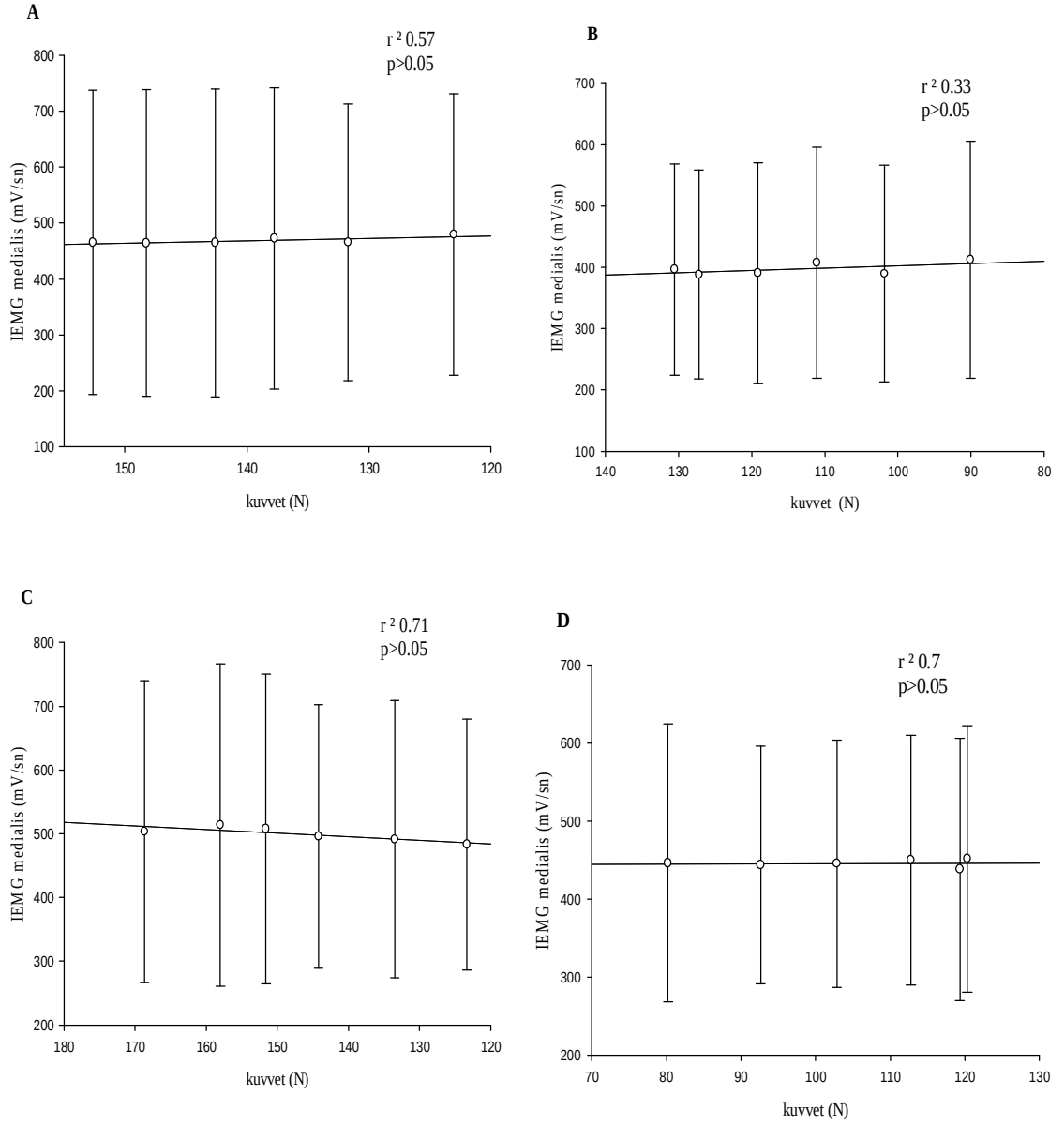
Çizelge 4.13: Vastus medialis kasına ait IEMG değerleri.

IEMG MEDİALİS (mV/sn)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	465± 272	396± 172	503± 236	438± 168
5-10 sn	464± 274	388± 170	513± 252	452± 171
10-15 sn	465± 275	390± 180	508± 242	450± 160
15-20 sn	473± 269	408± 188	496± 206	445± 158
20-25 sn	466± 247	389± 176	491± 217	443± 152
25-30 sn	479± 252	412± 193	483± 197	446± 178

Şekil 4.32’ de vastus medialis kasına ait bütün kasılmalarındaki ortalama IEMG değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği görülmektedir. Kasılma kuvvetine bağlı olarak IEMG medialis değerlerinin nasıl değiştiğine bakıldığında kuvvetin azalmasına rağmen IEMG medialis değerlerinin belirgin bir azalama göstermediği görülmüştür. Kuvvete bağlı IEMG medialis değişimi şekil 4.33’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.32: Vastus medialis kasına ait IEMG değerlerini gösteren grafik. A)antrenman öncesi dinlenme kailmasında zamana bağlı IEMG değişimi B)antrenman öncesi yorgunluk kailmasında zamana bağlı IEMG değişimi C) antrenman sonrası dinlenme kailmasında zamana bağlı IEMG değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk kasılmasında zamana bağlı IEMG değişimini göstermektedir.



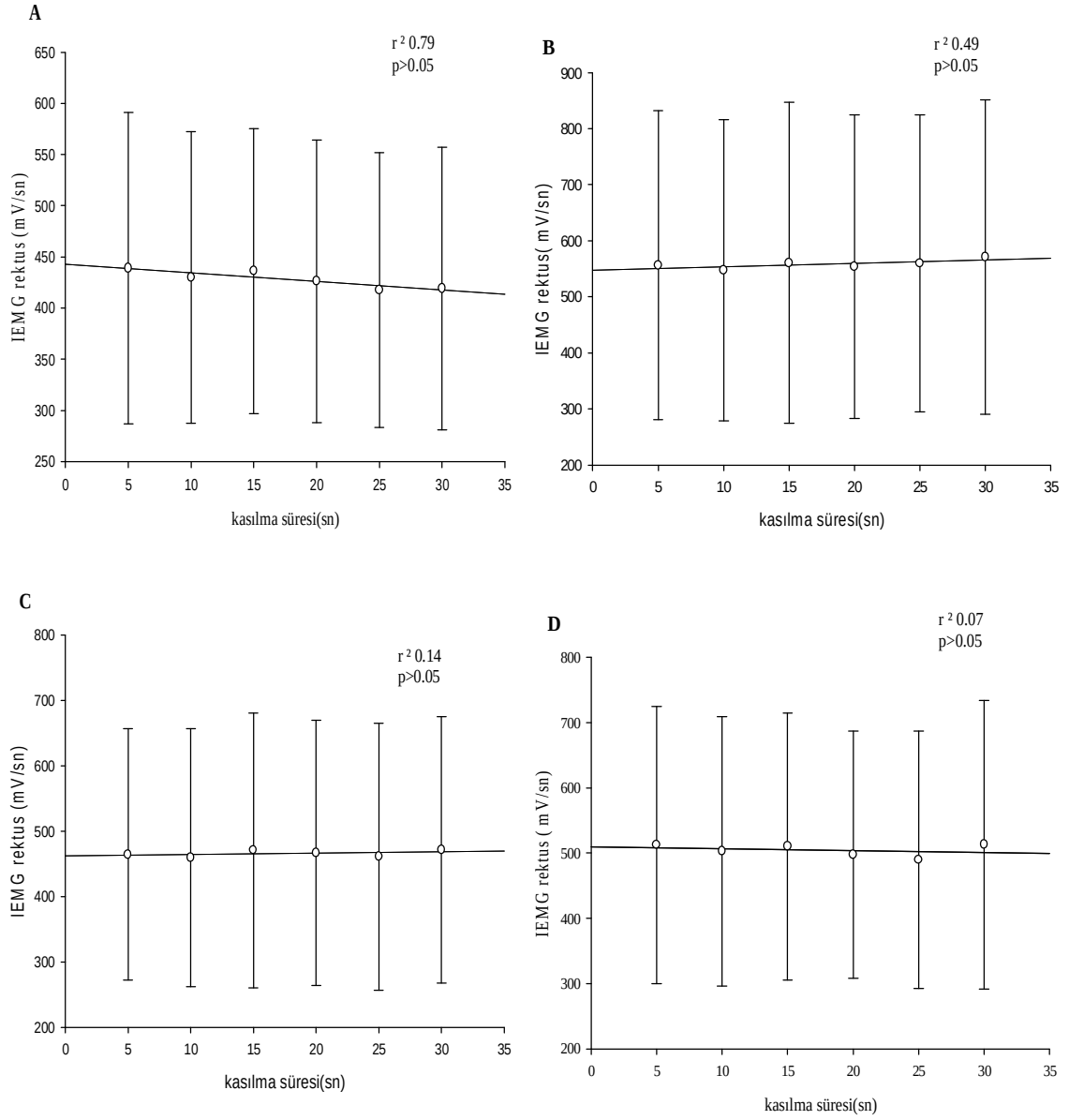
Şekil 4.33: Vastus medialis kasına ait IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik. A)antrenman öncesi dinlenim IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi B) antrenman öncesi yorgunluk IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenim IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini göstermektedir.

Rektus femoris kasına ait İntegre EMG (IEMG) değerlerine bakıldığında antrenmanlardan önce yorgunlukla anlamlı artışlar kaydedilmiştir ($p<0.05$). Ancak antrenmanlardan sonra aynı döneme ait değerlerin artışları istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0.05$).

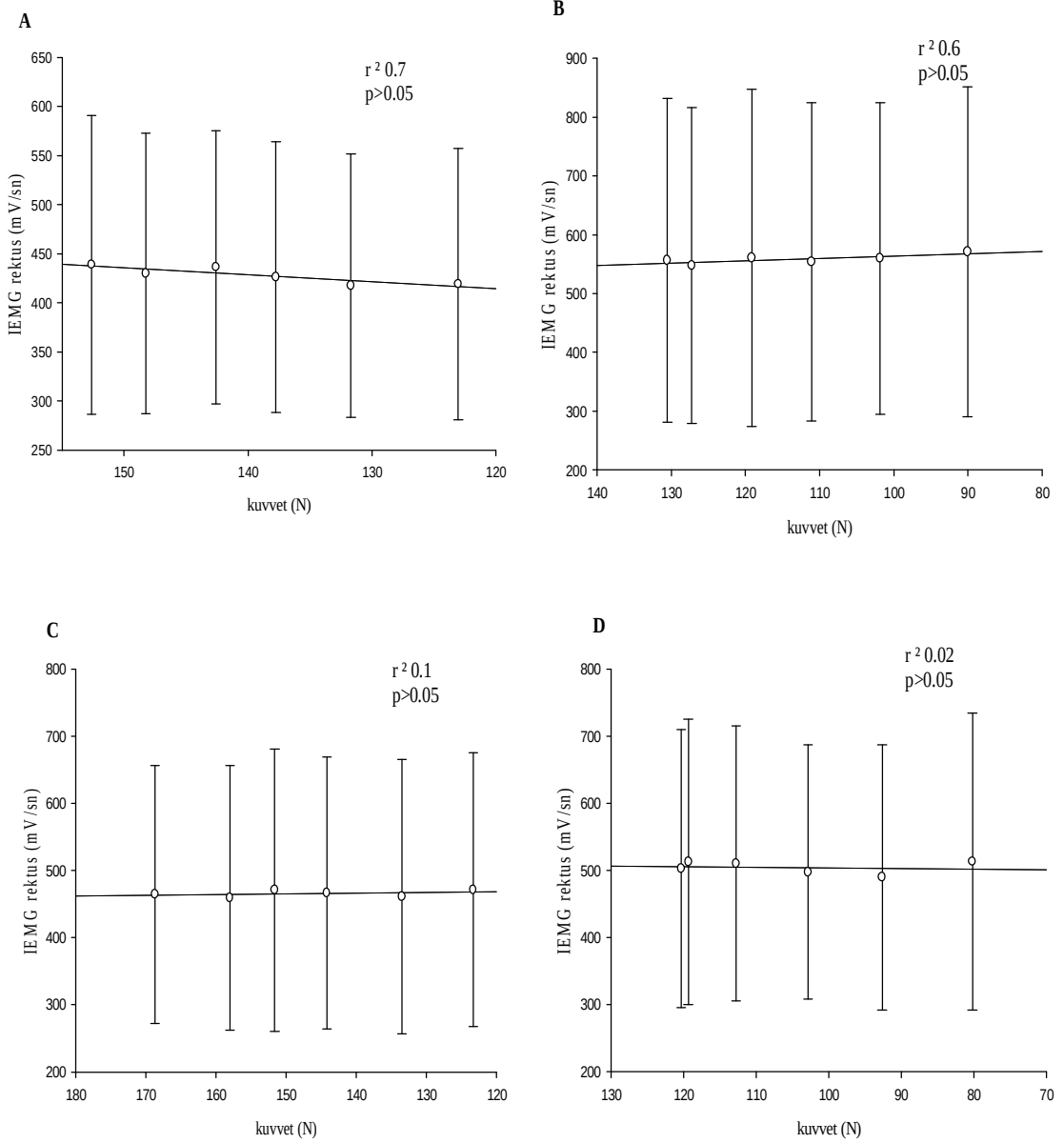
Çizelge 4.14 : Rektus kasına ait IEMG değerleri (# $p<0.05$ yorgunlukla değişen değerler arasındaki farklılık)

INTEGRE REKTUS FEMORİS (mV/sn)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Yorgunluk Öncesi	Yorgunluk Sonrası	Yorgunluk Öncesi	Yorgunluk Sonrası
1-5 sn	439± 152	556± 275#	464± 191	512± 212
5-10 sn	430± 142	547± 268#	459± 197	503± 206
10-15 sn	436± 139	561± 286#	471± 209	510± 204
15-20 sn	426± 138	554± 270#	466± 202	497± 189
20-25 sn	417± 134	560± 264#	461± 204	490± 197
25-30 sn	419± 138	571± 280#	471± 203	513± 221

Şekil 4.34’de rektus femoris kasına ait bütün kasılmalar sırasındaki ortalama IEMG değerlerinin değişim grafiği verilmiştir. Kasılma kuvvetine bağlı olarak rektus femoris kasına ait IEMG değerlerinin nasıl değiştiğine bakıldığında kuvvetin azalmasına rağmen IEMG medialis değerlerinin belirgin bir azalama göstermediği görülmüştür. Kuvvete bağlı IEMG medialis değişimi şekil 4.35’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.34: Rektus femoris kasına ait IEMG değerlerini gösteren grafik. A) antrenman öncesi dinlenim IEMG değerlerinin zamana bağlı değişimi B)antrenman öncesi yorgunluk değerlerinin zamana bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenim değerlerinin zamana bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 4.35: Rektus femoris kasına ait IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik. A)antrenman öncesi dinlenim IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi B)antrenman öncesi yorgunluk IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenim IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk IEMG değerlerinin kuvvete bağlı değişimini göstermektedir.

4.8.3. RMS Sonuçları

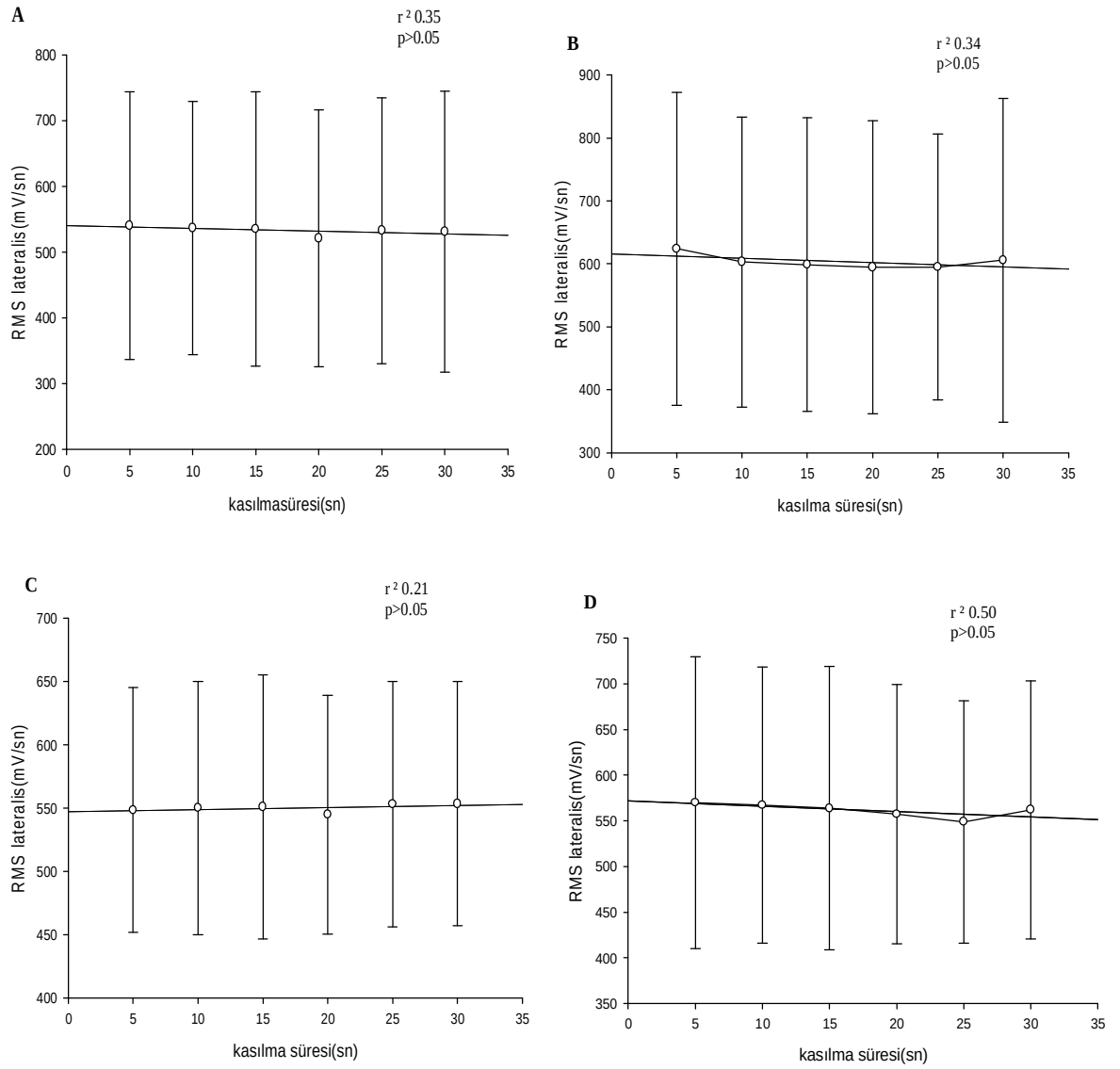
RMS EMG değerlerinde quadriceps grubu kaslarda antrenmanlarla ve yorgunlukla oluşan değişikliklere bakıldığında vastus lateralis kasına ait RMS değerleri çizelge 4.15'te görülmektedir. Vastus lateralis kasının RMS değerleri hem

antrenmandan önce ve hem de antrenmandan sonra yorgunlukta artmasına rağmen bu artışlar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0.05$)

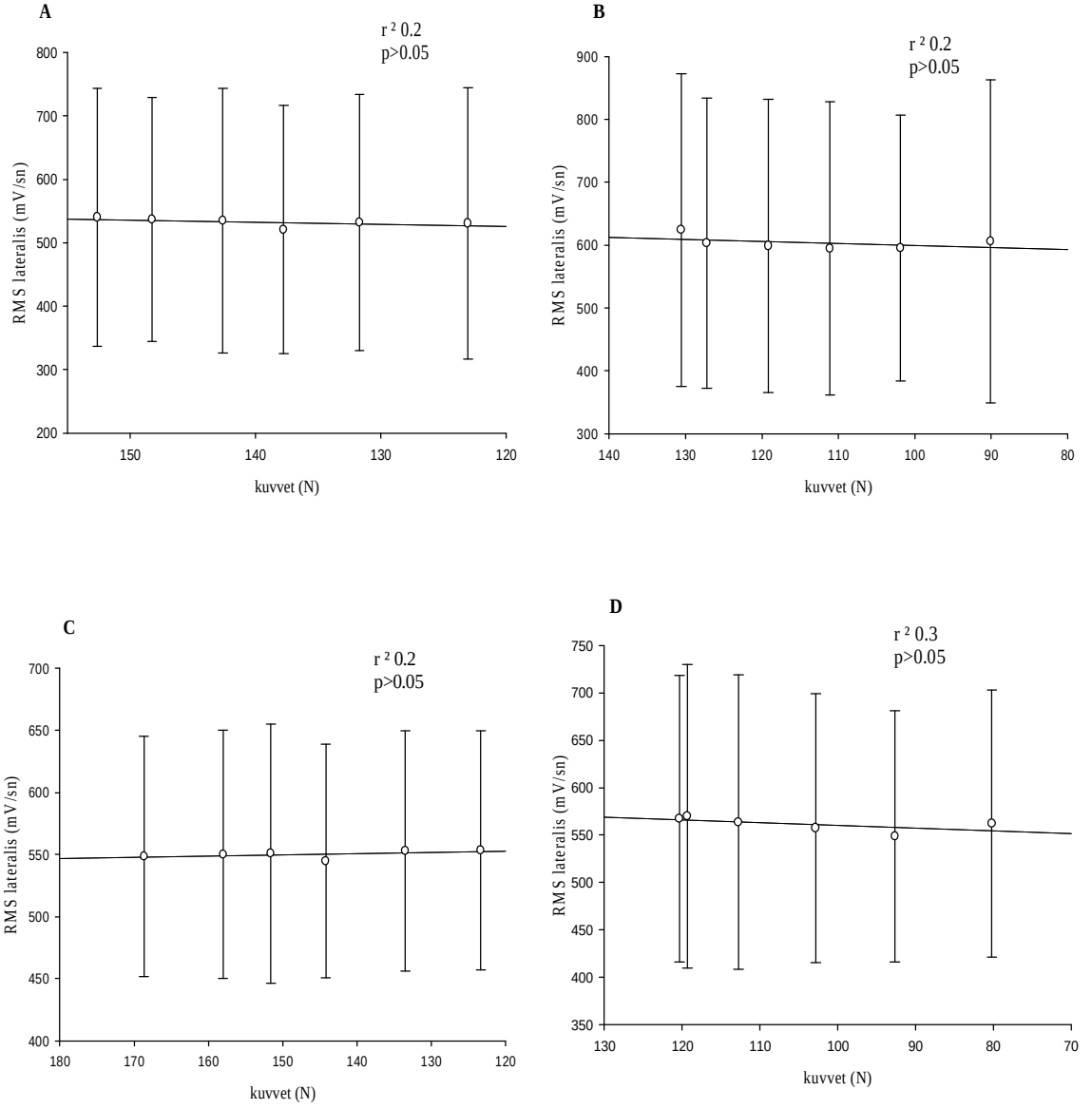
Çizelge 4.15: Vastus lateralis kasına ait RMS değerleri.

RMS VASTUS LATERALİS (mV/sn)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	540± 203	624± 248	548± 97	570± 160
5-10 sn	537± 192	603± 230	550± 99	567± 151
10-15 sn	535± 208	599± 233	550± 104	564± 155
15-20 sn	521± 195	595± 233	545± 94	557± 141
20-25 sn	532± 202	595± 211	553± 96	549± 132
25-30 sn	531± 213	606± 257	553± 96	562± 141

Şekil 4.36’da vastus lateralis kasına ait RMS değerlerinin değişimi grafiği gösterilmiştir. RMS değerinin kuvvete göre değişimi ise şekil 4.37’de görülmektedir.



Şekil 4.36: Vastus lateralis kasına ait RMS değerlerini gösteren grafik. A) antrenman öncesi dinlenim RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi B) antrenman öncesi yorgunluk RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenim RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk RMS değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir.



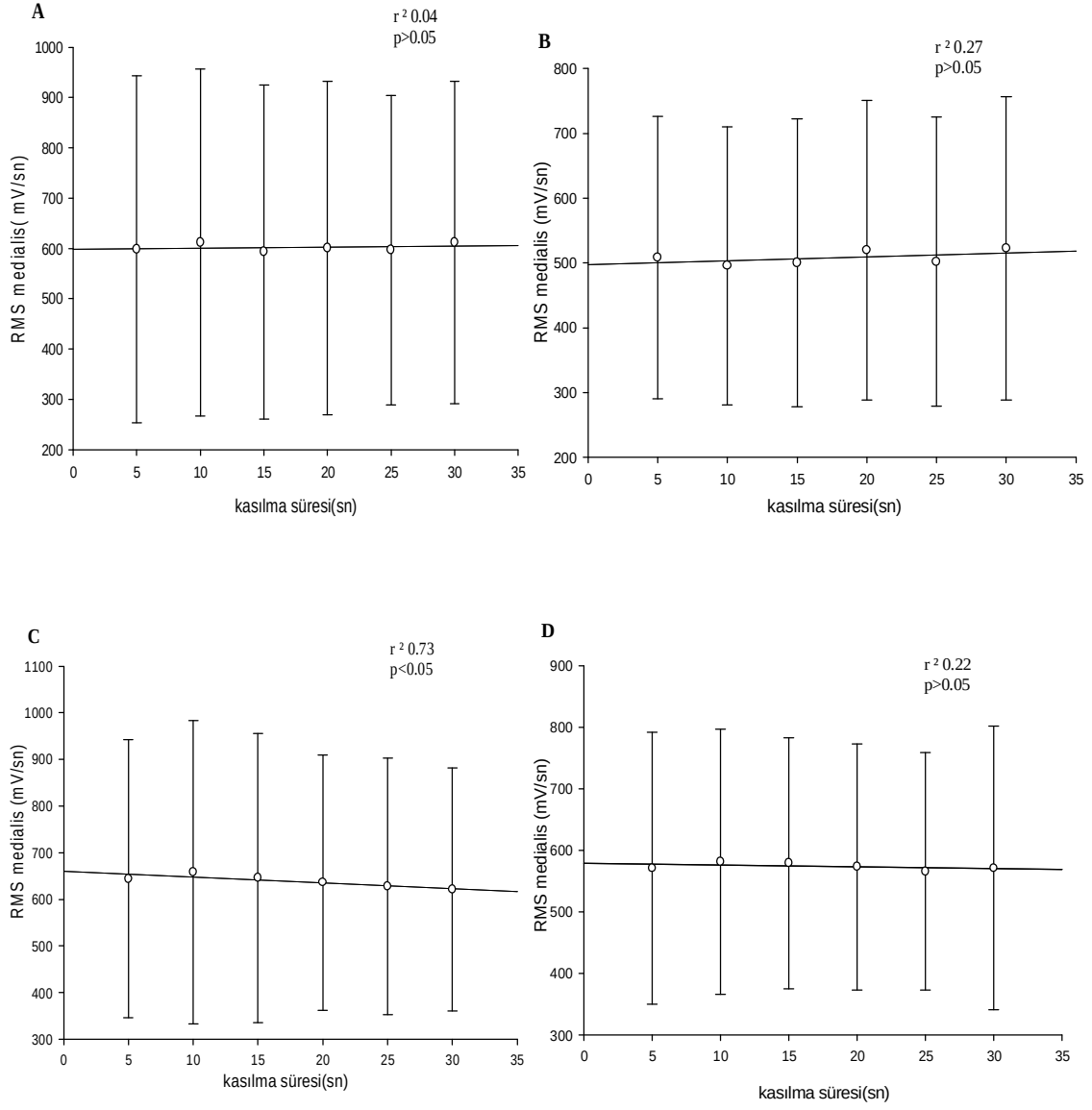
Şekil 4.37: Vastus lateralis kasına ait RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik. A) antrenman öncesi dinlenme RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi B) antrenman öncesi yorgunluk RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenme RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini göstermektedir.

Çizelge 4.16’da vastus medialis kasına ait RMS değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Vastus medialis kasına ait RMS değerlerinde antrenmanlarla ve yorgunlukla artış olmasına rağmen bu artışlar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0.05$).

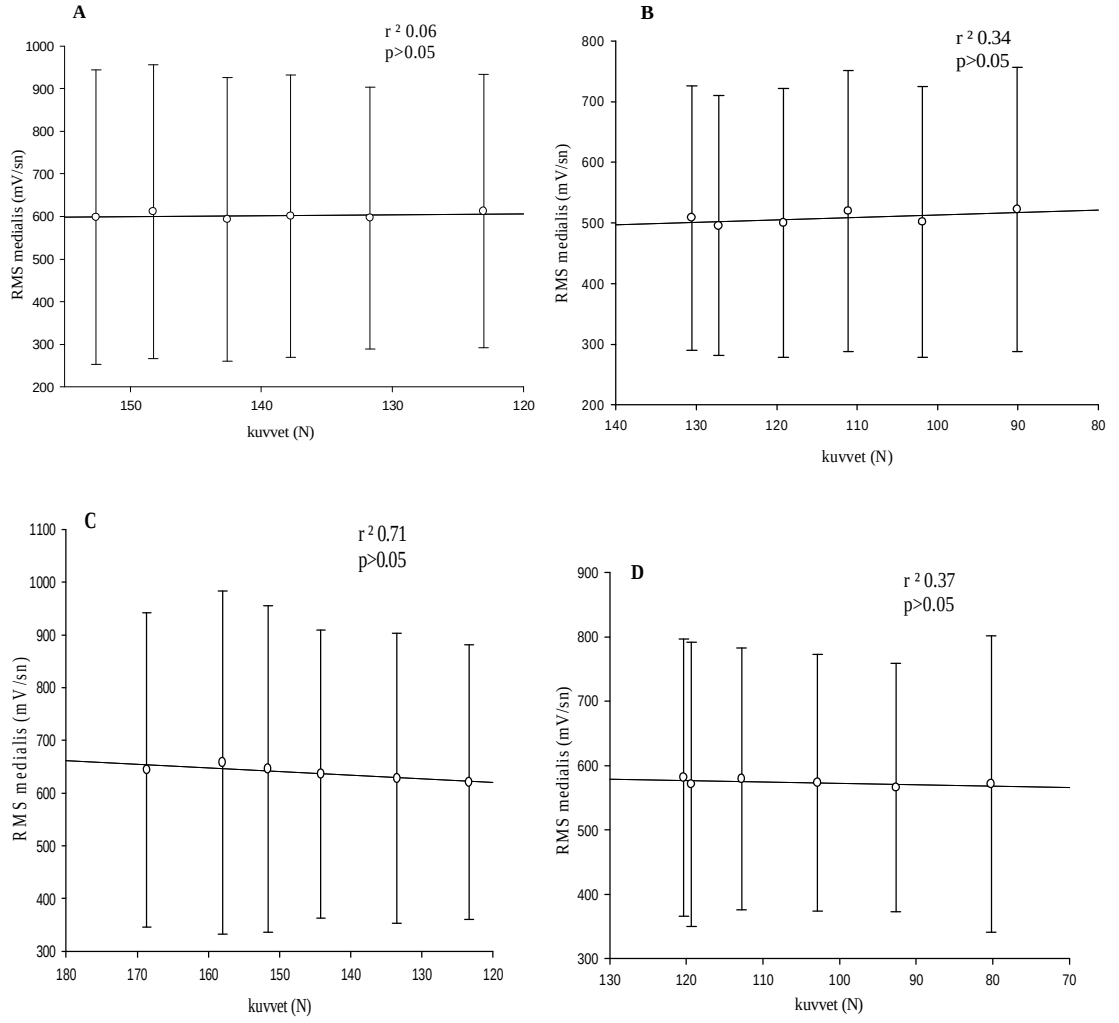
Çizelge 4.16: Vastus medialis kasına ait RMS değerleri.

RMS VASTUS MEDİALİS (mV/sn)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	598± 344	509± 217	644± 298	571± 220
5-10 sn	611± 344	495± 214	658± 325	581± 215
10-15 sn	592± 332	500± 222	646± 309	579± 203
15-20 sn	600± 331	520± 231	636± 273	573± 199
20-25 sn	597± 307	501± 222	628± 275	566± 193
25-30 sn	612± 320	522± 233	621± 260	571± 230

Şekil 4.38’de vastus medialis kasına ait RMS değerlerinin bütün kasılmalar sırasındaki değişim grafikleri verilmiştir. Kuvvet değerlerine göre vastus medialis kasının RMS değerlerinin değişimine bakıldığında kuvvet düşmesine rağmen vastus medialis kasının RMS değerlerinin değişim göstermediği tespit edilmiştir. Kuvvete göre RMS medialis değişimi şekil 4.39’da gösterilmiştir.



Şekil 4.38: Vastus medialis kasına ait RMS değerlerini gösteren grafik. A) antrenman öncesi dinlenme RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi B) antrenman öncesi yorgunluk RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenme RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk RMS değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir.



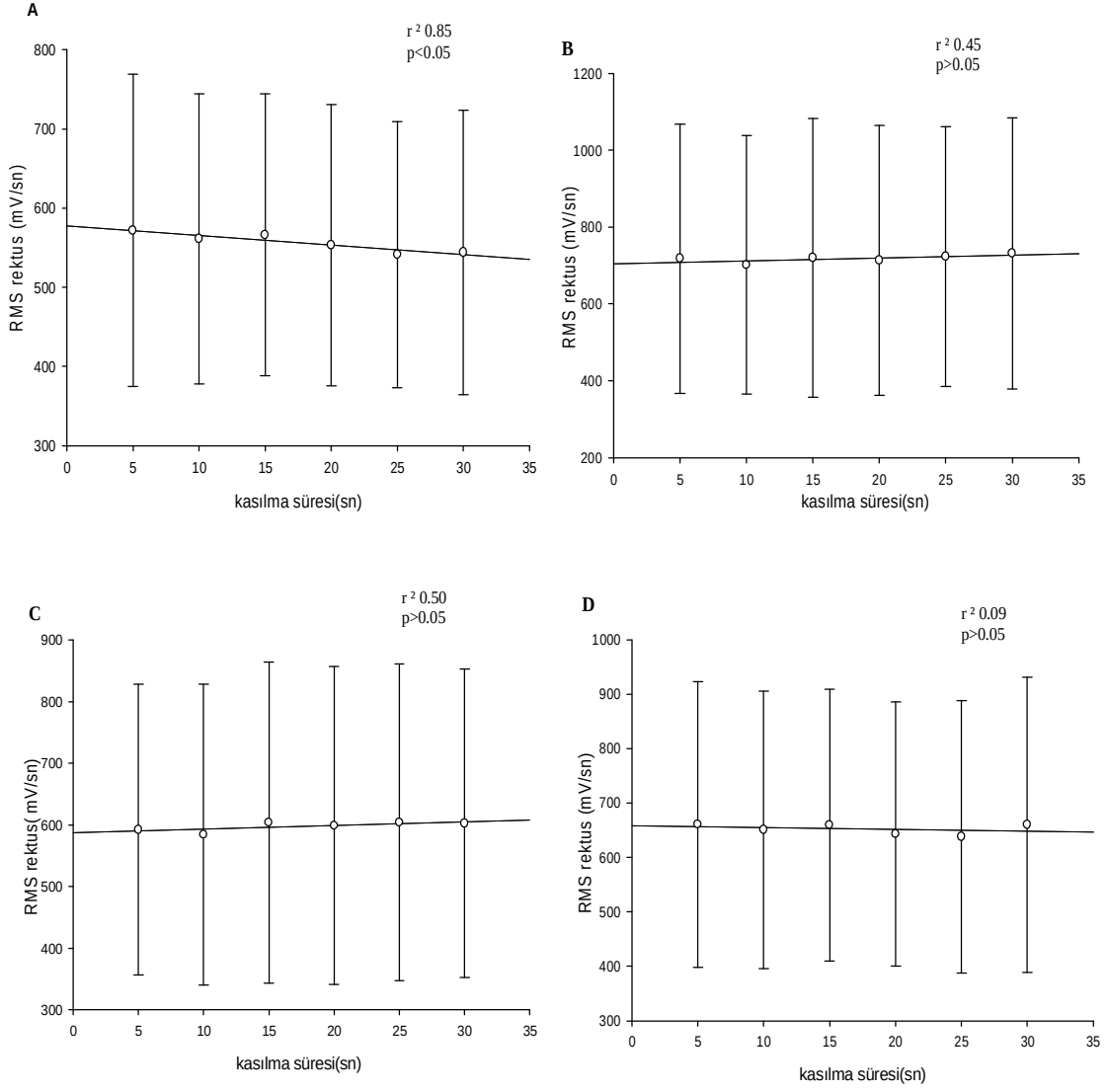
Şekil 4.39: Vastus medialis kasına ait RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik. A)antrenman öncesi dinlenme RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi B)antrenman öncesi yorgunluk RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi C) antrenman sonrası dinlenme RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini göstermektedir.

Çizelge 4.17’ de rektus femoris kasının RMS değerleri verilmiştir. Rektus femoris kasının RMS değerlerine bakıldığında antrenman öncesi yorgunluk kasılmasında dinlenme kasılmasına göre anlamlı artışlar kaydedilmiştir($p < 0.05$). Antrenmanlardan sonra aynı döneme ait değerlerde istatistiksel olarak anlamlı değişiklik görülmemiştir ($p > 0.05$). Ardışık 5 sn ortalamalarına ait değerler arasında farklılık bulunmamıştır ($p > 0.05$).

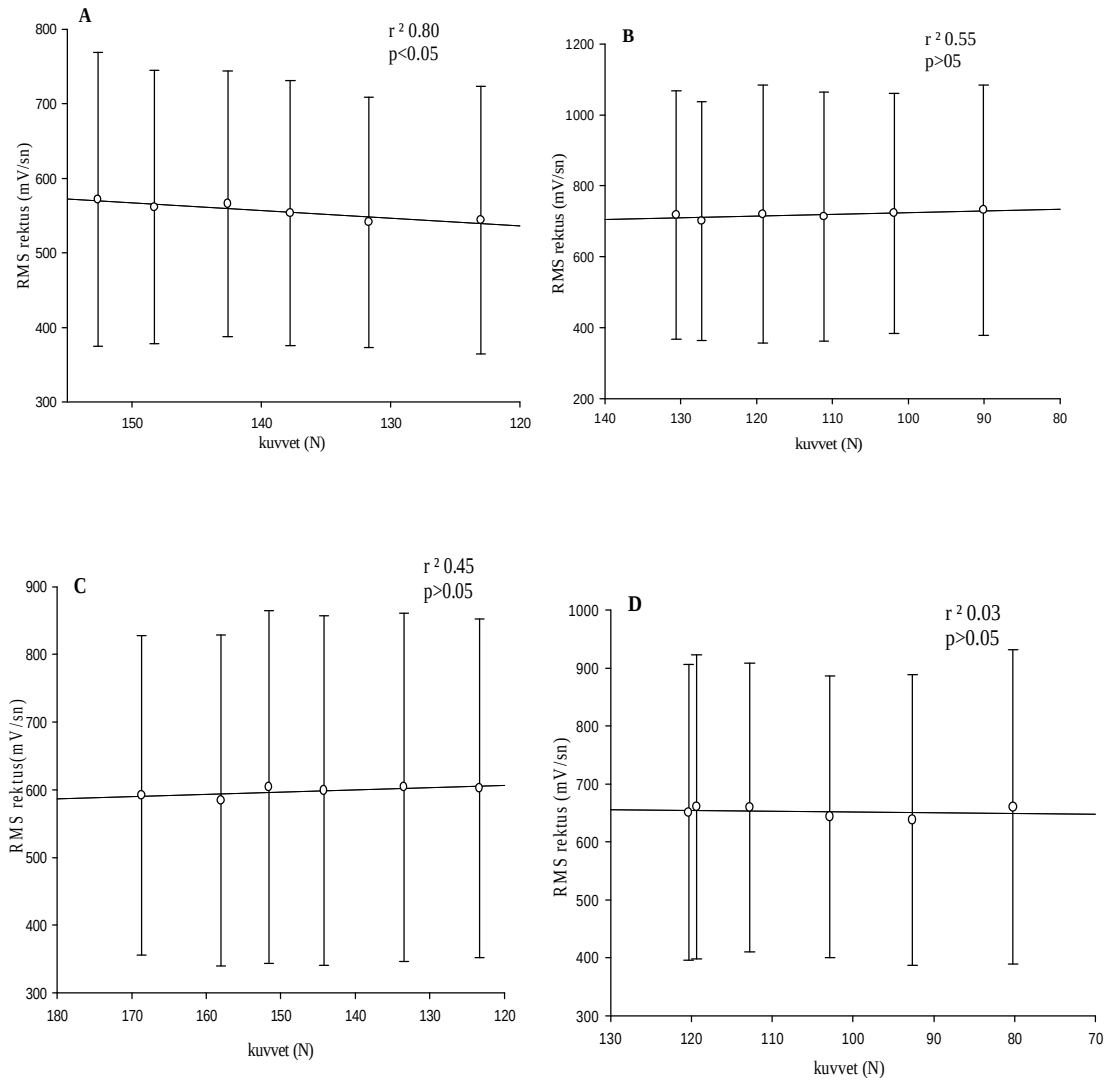
Çizelge 4.17: Rektus femoris kasına ait RMS değerleri ($\#P<0,05$ yorgunluk sonrasında değişen değerler için).

RMS REKTUS FEMORİS (mV/sn)	Antrenman Öncesi		Antrenman Sonrası	
	Dinlenim	Yorgunluk	Dinlenim	Yorgunluk
1-5 sn	572± 197	718± 349 #	592± 236	661± 262
5-10 sn	561± 183	701± 336 #	584± 244	651± 255
10-15 sn	566± 178	720± 363 #	604± 260	660± 249
15-20 sn	553± 177	713± 351 #	599± 258	643± 242
20-25 sn	541± 168	723± 338 #	604± 257	638± 250
25-30 sn	544± 179	732± 352 #	602± 250	660± 271

Şekil 4.40’da rektus femoris kasına ait RMS değerlerinin bütün kasılmalar sırasındaki değişim grafikleri verilmiştir. Rektus femorisin kuvvete bağlı değişimi şekil 4.41’ de görülmektedir. Kuvvet azalmasına rağmen rektus femorisin RMS değerlerinin belirgin bir değişiklik göstermediği gösterilmiştir.



Şekil 4.40 Rektus femoris kasına ait RMS değerlerini gösteren grafik. A) antrenman öncesi dinlenim RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi B) antrenman öncesi yorgunluk RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi B) antrenman sonrası dinlenim RMS değerlerinin zamana bağlı değişimi D) antrenman sonrası yorgunluk RMS değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 4.41: Rektus femoris kasına ait RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini gösteren grafik. a) antrenman öncesi dinlenim RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi b) antrenman öncesi yorgunluk RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi c) antrenman sonrası dinlenim RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimi d) antrenman sonrası yorgunluk RMS değerlerinin kuvvete bağlı değişimini göstermektedir.

5. TARTIŞMA

Bu araştırmanın en önemli bulgusu sprint antrenmanlarının hem kuvvet, hem sprint ve hem de dayanıklılık performansını önemli oranda geliştirdiğidir. Antrenmanlardan sonra yorgunluk testi sırasında daha fazla bisiklet yükünü tolere eden katılımcılarımızın test bitimindeki kan laktat düzeyinin antrenman öncesine göre daha yüksek olması, antrenmanın laktat toleransını geliştirdiğini düşündürmektedir.

Kullandığımız deney protokolünde kasa eksternal uyarı verilmesinin kas kuvvetini artırmaması nedeniyle, gözlemlediğimiz yorgunluğun periferik kaynaklı olabileceğini düşündürmesidir. Bazı bireylerde maksimal istemli kasılma sırasında verilen elektriksel uyarı bir miktar kuvvet artışına neden olmakla beraber istatistiksel değerlendirmeler oluşturulan değişikliğin anlamlı olmadığını göstermiştir. Elektriksel uyarının uygulandığı kuvvet ölçümlerinde kas kuvvetinin 30 sn süre içinde bu uyarıdan etkilenmeksizin azaldığı kaydedilmiştir. Öte yandan maksimal istemli kasılma sırasında yapılan EMG kaydında frekansın azaldığının görülmesi SSS' nin yorgunluk sırasında baskılanmış olabileceğini düşündürmektedir.

Yorgun olan kasta istemli kasılma olmaksızın elektrik uyarısının oluşturduğu kuvvet dinlenme koşullarındaki uyarının oluşturduğu kuvvetten daha düşük bulunmuştur. Bu durum periferde meydana gelen değişiklikler nedeni ile dışarıdan optimal uyarılara kasın kuvvet yanıtı vermediğini düşündürmektedir. Antrenmanların bu tablo üzerine herhangi bir etkisi bulunmamıştır.

Maksimal istemli kasılma sırasında ölçülen EMG veri grubu değerlendirildiğinde, kasılmanın başından itibaren ateşleme frekansının azalmaya başladığı kaydedilmiştir. En düşük frekans değeri kasılmanın sonunda kaydedilmiştir. Öte yandan antrenmanların frekans değerlerinde anlamlı değişikliğe yol açmadığı bulunmuştur.

5.1. Sprint Antrenmanlarının Performansa Etkisi

Çalışmamızda 5 haftalık sprint antrenmanları maksimal sprint sürelerini kısaltmış, bisiklet test süresini uzatmış, maksimal oksijen alımını artırmış ve izometrik kas kuvvetini geliştirmiştir. Literatürde sprint antrenmanlarının direnç antrenmanlarına benzer şekilde kasılma kuvvetini artırdığı ifade edilmektedir^{88,95}. Nitekim bizim çalışmamızda maksimal izometrik kuvvetin sprint antrenmanlarından sonra önemli oranda artmış olduğu, ancak yorgunluk örüntüsünün etkilenmediği bulunmuştur. Kuvvet artışı olmasına rağmen EMG aktivitesinde belirgin bir değişikliğin olmaması, gelişmeden kontraktıl elemanları antrenman sonrası doğrudan etkileyen bir mekanizmanın sorumlu olduğunu düşündürmektedir.

Literatürde farklı protokollerle uygulanan sprint antrenmanlarının aerobik^{87,95} ve anaerobik^{88,108,109} metabolizmayı geliştirdiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda sprint antrenmanlarının aerobik adaptasyonlara neden olması sonucunda tükenme süresini uzattığı, maksimum oksijen tüketimi ile birim zamanda üretilen kuvveti ve gücün artırdığı savına ulaşılmıştır^{89,90,91,92}.

Sprint antrenmanlarında yaklaşık 30 saniyelik süreler içinde yapılan yüklemelerin aerobik kapasiteyi artırması antrenman bilimcilerin tartıştığı konu başlıklarından biri olmuştur. Ancak ardışık anaerobik yüklenmelerinin kas hücresinde aerobik yüklemelere oranla daha ciddi ve hızlı değişikliklere neden olduğu gösterilmiştir⁹⁵. Son yıllarda yapılan çalışmalar anaerobik egzersizler sonrasında meydana gelen farklılıkların hücre içi sinyal yollarını etkinleştirerek uyum yanıtında rol alan unsurları tetiklediğini göstermiştir^{93,95,98,123}. Bu artışta antrenmanın kapsamı kısa olmasına karşın şiddetinin yüksek olmasının yarattığı etkinin rol aldığı belirtilmektedir. Maksimal şiddetteki sprint egzersizlerinde VO_{2max} 'nin çok üstünde bir yüklenme söz konusudur ve bu sürecin mitokondrial enzim aktivitesini de artırdığı belirtilmektedir^{90,95}.

Yorgunluk sırasında hücre içi konsantrasyonu artan metabolitlerin bu yolakta etken olan aracı sinyal kimliği taşıdığı gösterilmiştir. Söz konusu değişikliklerin hücrelerin denge koşullarını yeniden sağlayabilmesinden sorumlu uyum yanıt döngüsünü tetikleyebileceği düşünülmektedir. Kas gelişimiyle ilgili bu bilgi, son yıllarda antrenman programlarında da kapsamlı değişikliklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Özellikle performans antrenmanlarının önemli bir kısmında, aralıklı yüksek

aktivite örüntüsünü taklit eden antrenman programları, belirtilen uyum yanıtını tetiklemesinden dolayı daha sık kullanılmaya başlamıştır.

Çalışmamızda sprint antrenmanlardan sonra maksimal sprint derecesi anlamlı bir gelişim göstermiştir. Nitekim bulgularımız sprint antrenmanlarından sonra anaerobik güç üretiminin önemli oranda arttığı ve bunun da sprint performansını geliştirdiğinin gösterildiği literatür verileriyle uyumludur^{91,88}.

Araştırma modelimizle uyumlu olarak, literatürde 30 sn dinlenme aralıklarının ATP-CP depolarının yenilenmesini sağladığı ifade edilmektedir^{88,109}. Bu metabolik değişim söz konusu performans değişkenlerinin etkilenmesinde tetikleyici öneme sahip olabilir. Çalışmamızda 30 sn gibi kısa bir dinlenme süresinin verilmiş olması fosfajenlerin yıkım ve yeniden sentezini uyaran niteliktedir. Birçok araştırmada bu tarz yüklemelerin anaerobik metabolizmayı geliştirdiği ifade edilmiştir^{89,92,94,95,96,111}. Bizim çalışmamıza benzer bir denek grubuyla yapılan bir araştırmada⁹³ denekler 6 sn süren maksimal bisiklet sprintleri 10 kez tekrarlanmış ve tekrarlar arası 30 sn dinlenme arası verilmiştir. Bu çalışmada sprintler arasında alınan kas örnekleri incelendiğinde ATP nin anaerobik metabolizma ile yeniden sentezinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ardışık yüklemelerde ilk sprinte göre glikojenin laktata yıkımının ilerleyen yüklemelerde azaldığı gösterilmiştir. Ancak ilk ve son sprintte PCr benzer oranda azalması sprintler arası 30 sn dinlenme süresinin PCr yeniden sentezi için yeterli olabildiği ve bu tarz aralıklı yüklenmelerde PCr nin enerji kaynağı olarak önemli bir bileşen olduğu vurgulanmıştır⁹². Sprint türü fiziksel aktivitelerde PCr' in yeniden sentezi ile güç üretimi arasında yakın bir ilişki olduğu ifade edilmektedir^{97,108,109,110,116}. Anaerobik sürecin kas yapısındaki etkisi içerdiği lif tipine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kas biyopsisi yaparak kasta meydana gelen değişikliklerin doğrudan incelendiği araştırmalarda tip II liflerde daha fazla ATP azalması olduğu belirtilmektedir. Glikojenolizin 30 sn süren bir tek sprintte 90 dakika süren aerobik bir egzersizden çok daha fazla olduğu belirtilmiştir^{88,97}.

Anaerobik egzersizin doğası gereği aerobik yoldan sağlanan ATP konsantrasyonu tepkimeler için gereken hıza erişmemektedir. Anaerobik glikoliz sonrası laktat molekülüyle bir arada artan H⁺, pirüvat dehidrogenaz aktivitesini artırarak aerobik metabolizmayı hızlandırabilmektedir. Rekreatif olarak spor yapan aktif deneklerde yapılan bir çalışmada 14 gün boyunca 6 kez Wingate testi ile yapılan

antrenman sonrasında oksidatif potansiyelinin arttığı gözlenmiştir⁹⁷. Yine benzer bir grubun denek olarak katıldığı bir başka çalışmada oluşturulan iki gruptan birisine 90-120 dk VO_{2max} 'ın % 65 inde 175 W ile 2 hafta aerobik, diğer gruba da yine 2 hafta süre ile 4 dk dinlenmeli 30 sn sprintlerle (700 W) anaerobik antrenman yaptırılmıştır⁸⁷. 2 haftanın sonunda gruplar arasında kasın oksidatif kapasitesi ve glikolitik özellikleri arasında anlamlı farklılık bulunmamıştır. Bu araştırmaya göre sprint antrenmanları uzun süren dayanıklılık antrenmanlarına göre hızla ve benzer oranda fizyolojik adaptasyonlar oluşturmaktadır⁸⁷. Bizim çalışmamızda da VO_{2max} değerleri, tükenme süreleri ve test yüklerinin önemli oranda artmış olması aerobik kapasitenin geliştiğini düşündürmektedir. Literatürde sprint antrenmanında kas kan akımının arttığı, kastan laktat ve hidrojen taşınım kapasitesinin geliştiği ve SR fonksiyonlarının geliştiği belirtilmektedir^{95,99,100,110}. Dayanıklılık antrenmanlarına göre daha düşük kapsamlı olan sprint antrenmanlarının VO_{2max} 'ın üstünde bir şiddette yapıldığında VO_{2max} artışını sağladığı belirtilmektedir. Çok tekrarlı sprintlerin anaerobik enzimler yanında aerobik enzim aktivitesini de geliştirerek VO_{2max} artışına katkıda bulunduğu belirtilmektedir¹¹⁰.

5.2. Yorgunluk Bulgularının Değerlendirilmesi

Yorgunluğun tanımında yer alan “istemli kasılmalar sırasında üretilen kuvvet azalması” birçok araştırmada farklı düzeneklerle gösterilmiştir. Bu çalışmada deneklerden bisiklet ergometresinde yapılan egzersize tükeninceye kadar devam etmeleri istenmiştir. Bu yorgunluk yüklemesinin dışında, 30 saniyelik maksimal kasılmalarda istemli kasılma kuvvetinin önemli oranda azaldığı tespit edilmiş, 30 sn süresince kasın maksimal kuvvetini koruyabilmesi mümkün olmamıştır. Kasılma sırasında kuvvet başlangıçta hızlı, ilerleyen sürelerde ise daha yavaş azalmaya başlamıştır. Deneklerin form durumları bu yorgunluk örüntüsünü etkilememiştir. Yorgunluğun etiyolojisini inceleyen birçok araştırmada ilk birkaç saniye içinde görülen kuvvet azalmasından fosfajen sistemdeki azalmalar sorumlu tutulmaktadır²⁹.

Antrenmanlardan sonra maksimal istemli kasılma kuvveti anlamlı artış göstermiştir. Ancak bu artış 30 sn boyunca devam etmemiştir. Pik kuvvetteki artış yorgunluk oranında da artışa neden olmuştur. Maksimal kuvvetin sprint antrenmanları ile

artması literatürdeki çalışmalarla uyumlu bir bulgudur¹⁰¹. Antrenmanların yorgun kastaki kasılma kuvveti üzerine bir etkisi gözlenmemiştir.

Yorgunluk sırasında gözlemlenen kuvvet kaybını birbirini tetikleyen bir seri mekanizmayla açıklamak mümkündür. Kasta laktat, hidrojen, inorganik fosfat, potasyum ve sodyum konsantrasyonlarının değişmesi yorgunluk oluşumunda etken olabilmektedir. Literatürde tüm bu biyokimyasal değişimlerin nöromüsküler eşleşme ve-veya kontraktıl elemanlar üzerine baskılayıcı etki göstereceğine dair bilgiye ulaşmak mümkündür.^{41,42,43,44}

Yüklemeler arasında alınan kuvvet ölçümlerinde ilk 3 değerde antrenmandan sonra anlamlı kuvvet artışları görülmüştür. Ancak yorgunluk geliştikçe diğer ölçümler arasında bu farkın olmadığı tespit edilmiştir. Antrenmanlar test sırasında da kontraktiliteyi olumlu etkileyen süreçleri içermektedir. Yüklemelerin artması ile birlikte kan ve kasta biriken metabolitlerin kuvvet azalmasında etken olabileceği düşünülmektedir.

5.2.1.Kandan Ölçülen Biyokimyasalların Yorgunluktaki Önemi

Yorgunlukla kanda meydana gelen biyokimyasal değişikliklerden birisi potasyum konsantrasyonunun artmasıdır. Literatürde maksimal kalp atım hızının % 60'ını aşan yüklemelerde serum $[K^+]$ arttığı gösterilmiştir^{102,103}. Öte yandan yüklemelerin bitiminden itibaren birkaç dakika içinde $[K^+]$ normale döndüğü belirtilmektedir¹⁰³. Kanda potasyum artışının özellikle de çalışmaya aktif olarak katılan kas liflerinden hücre dışına geçerek, kas performansını azalttığı ifade edilmektedir. Potasyumun yorgunluk yapıcı etkisinin H^+ konsantrasyon artışından daha baskılayıcı olduğunu ifade edilmektedir⁵⁹. Bizim çalışmamızda yorgunluk testinin hemen bitiminde alınan kan örneklerinde serum $[K^+]$ hem antrenmanlardan önce, hem de antrenmanlardan sonra anlamlı artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bisiklet ergometresinde tükeninceye kadar yaptırdığımız yorgunluk testine benzer şekilde koşu bandı kullanılarak yapılan iki çalışmada da^{103,104} potasyum değerlerinin femoral arter kanında sırasıyla 6 ve 7 mmol/l değerlerine ulaştığı kaydedilmiştir. Ayrıca tek bacakla diz ekstensiyonu yaptırılan bir çalışmada da yorgunlukta kan $[K^+]$ bizim çalışmamızdaki

gibi 5 mmol/l üstüne çıktığı görülmüştür⁵⁹. Hücre dışındaki $[K^+]$ artışını Na-K ATPaz pompa aktivitesindeki azalma ile açıklamak mümkündür. Çalışmamızda yorgunluk sonrasında serum $[K^+]$ artışı literatür bilgisi ile uyumlu olup, gözlemlediğimiz kas kuvveti azalmasının etkenlerinden birisi olarak yorumlanabilir. Nitekim yorgunluk testi sonrası $[K^+]$ değerleri antrenmanlardan etkilenmemiştir. Literatürde submaksimal tempoda yapılan antrenmanların yorgunluktaki $[K^+]$ artışını bir miktar baskıladığı, bazı çalışmalarda ise antrenmanlardan sonra aynı iş yükünde hiperkalemiye neden olduğu ifade edilmektedir¹⁰⁵. Bizim çalışmamızda antrenman sonrasında denekler antrenman öncesi döneme göre daha fazla bisiklet yükü çevirmişlerdir. Deneklerin benzer $[K^+]$ oranlarında daha fazla bisiklet yükünü tolere etmeleri potasyum klirensinin artması ile ilişkilendirilmektedir¹⁰⁶. K^+ klirensine etki yapan bileşenlerden Na-K ATPaz pompa sayısının ve-veya aktivitesinin artması bu değişikliği açıklayabilir¹⁰⁶. Nitekim maksimal sprintleri de içeren yüksek şiddetli yüklemelerde, Na-K ATPaz pompa aktivitesinin arttığı gösterilmiştir^{105,107,108}. Yüksek dayanıklılık kapasitesine sahip sporculara yaptırılan kısa süreli yüksek şiddetli antrenmanların yorgunluğun azalmasına adaptif olarak Na-K ATPaz pompa aktivitesini artırdığı gösterilmiştir¹⁰⁹.

Çalışmamızda değerlendirdiğimiz serum $[Na^+]$ değerlerinin hem antrenmandan önce ve hem de sonra yorgunlukta arttığı tespit edilmiştir. Nitekim literatürde¹¹⁰ kasılmalar sırasında kas içi $[Na^+]$ artmasına rağmen egzersizlerden sonra plazma $[Na^+]$ hafif bir artış olduğu belirtilmiştir. Literatürde bizim yorgunluk protokolüne benzer yüklemelerin yapıldığı çalışmalarda^{111,112} benzer bulgular karşımıza çıkmaktadır. Yüksek şiddetli yüklemelerden sonra plazma hacminde meydana gelen değişikliklerin serum $[Na^+]$ da bir miktar artışa neden olduğu ifade edilmiştir⁵⁹. Hem izole kas preparasyonlarında ve hem de insan kas biyopsisi çalışmalarında tükenme sırasında kas hücrelerinde $[Na^+]$ nun yükseldiği gösterilmiştir^{59,112}.

Çalışmamızda antrenmanlar öncesi ve sonrasında yorgunlukla bir arada gözlemlenen bir diğer önemli değişiklik serumda P_i konsantrasyonunun artmasıdır. Literatürde tekrarlı tetanik uyarıların verildiği deney düzeneklerinde P_i artışından dolayı kas kuvvetinin azaldığı gösterilmiştir^{113,114}. Artan P_i iyonlarının SR 'a girerek Ca^{+2} ile $Ca(HPO_4)$ oluşturduğu ve serbest Ca^{+2} miktarını azalttığı, böylece kasılmayı olumsuz etkilediği belirtilmektedir³¹.

Çalışmamızda yorgunluk sırasında serum CK ve LDH seviyelerinin anlamlı oranda arttığı görülmüştür. Literatürde maraton gibi ağır egzersizlerde veya vücudun alışık olmadığı tarzdaki yüklemelerde kastan enzim geçişinin artabileceği belirtilmiştir¹⁵³. Tükeninceye kadar bisiklet çevirirken, yüklenme aralarında maksimal izometrik kasılma yapma ve aynı kasılmayı elektrik uyarısı ile beraber tekrarlamadan oluşan deney protokolünün, deneklerimizin çok da alışık olmadıkları bir düzenek olduğunu söylemek mümkündür.

Araştırmamızda yorgunlukla beraber serum CK miktarının arttığı gözlenmiştir. Serumda CK artışı yorgunluğun irdelendiği birçok araştırmada kas hasarının önemli bir işareti olarak yorumlanmıştır. Yüklenmenin çeşidine, kasılmanın tipine, bireysel farklılıklara göre serum CK konsantrasyonu değişebilmektedir⁵⁴. İzometrik kasılmaların ön planda olduğu yüklemelerden sonraki ilk 24 saatte en yüksek değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan ekzantrik kasılmalarından oluşan yüklemelerde 3-7 gün süre ile serum CK seviyesi yüksek kalabilmektedir¹¹⁵. Bizim uyguladığımız yükleme protokolündeki gibi sürekli artan bisiklet yüklemelerinden oluşan yorgunluk modellerinde kasta bir miktar hasar oluşabilmektedir. Bazı kaynaklarda kuvvet azalmasında bu değişikliklerin de etkisinin olduğunu belirtmektedir. Ancak bu konu uzun süreli yorgunluk ve kas hasarını inceleyen araştırmalarda ön plana çıkmaktadır. Bizim çalışmamızda akut yorgunluk değerlendirmesi için yorgunluk testinden hemen sonra alınan kan örneklerinden CK değerlendirmesi yapılmıştır. Bu bağlamda çalışmamızdaki CK değerleri yüklenmeden sonraki günlerde de kas hasarını takip eden araştırmalardan daha düşük kaydedilmiştir. Öte yandan antrenmanlardan sonra yorgunluk CK değerlerinin antrenman öncesi değerlerle farklılık göstermemiş olması, buna karşın daha fazla yükün tolere edilebilmesi antrenmanlara uyum sürecinde kas hasarından bağımsız bileşenlerin de olabileceğini düşündürmektedir.

Sprint antrenmanlarından sonra aynı şiddetteki yüklenmede LDH miktarının değişmediği belirtilmiştir⁹⁰. Bizim çalışmamızda antrenmanlardan önce ve sonra bisiklet yüklemelerinin bitiminde kan LDH değerlerinin arttığı bulunmuştur. Ancak antrenmanlardan sonra denekler daha fazla yükü tolere etmişlerdir. Doku bütünlüğünün bozulması yanında, katekolamin konsantrasyon artışı, doku düzeyindeki oksijen parsiyel basıncının azalması, sinir uyarı değişiklikleri gibi etkenler serumda LDH konsantrasyonunun artışından sorumlu tutulmuştur^{151,152}. Yorgunluk sonrası serumda

meydana gelen kas enzim konsantrasyonlarındaki artışın, yorgunluk sonrası toparlanma döneminde yeni enzim sentezini uyarabileceği de ifade edilmektedir¹⁵¹.

5.2.2. Antrenman ve Yorgunluk Süreçlerinin Laktat Değerlerine Etkisi

Laktat artışının kuvvet azalması ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir^{31,119}. Antrenmanlardan önce ve sonra yapılan yorgunluk testinde egzersiz şiddetinin artması ile birlikte kan laktat değerinin de yükseldiği ve yüklemeler arasındaki laktat değerlerinin bir önceki laktat değerinden anlamlı oranda yüksek olduğu tespit edilmiştir. Hem antrenmandan önce ve hem de sonra yorgunluk protokolünün başlangıcında kan laktat değerinin 1 mmol'ün altında tespit edilmesi, deneklerin teste dinlenik olarak başladıklarını göstermesi bakımından önemlidir. Antrenmandan sonra test sonu laktat değerleri antrenmandan önceki değerlerden anlamlı oranda yüksek bulunmuştur. Bu farklılığın olası nedenlerinden bir tanesi, katılımcıların daha fazla iş üretmeleridir. Nitekim yapılan yüklemeler ve tükenme süreleri değerlendirildiğinde antrenmanlardan sonra anlamlı bir artışın olduğu tespit edilmiştir. Deneklerin daha fazla laktat konsantrasyonlarına karşın teste devam edebilmeleri antrenmana uyumun bir yansıması olarak değerlendirilebilir.

Farelerde yapılan bir çalışmada¹⁰² tek bir tüketici yüklenmeden sonra kastaki laktat taşıyıcı protein doygunluğunun değiştiği bulunmuştur. Nitekim literatürde tek bir tüketici koşu yüklemesinden insan kasında da benzer değişikliklerin olduğu gözlemlenmiştir¹¹⁶. Literatürde dayanıklılık ve sprint antrenmanlarından sonra laktat taşıma kapasitesinde değişme olmadığını ifade eden kaynakların yanı sıra^{107,118} artış bulan araştırmalar da bulunmaktadır^{118,119,120}. Birçok çalışmada dayanıklılık antrenmanı ile MCT1 miktarında farklılık olabileceği ve kasa laktat giriş ve-veya çıkışının artabileceği ifade edilmektedir^{121,122}. Laktat taşıyıcı proteinlerin miktarında görülen artışlar, kastan hücre dışına daha fazla laktat çıkışını kolaylaştırarak kası laktatın olası olumsuz etkilerinden koruyacaktır¹²³. Laktat taşınmasındaki olası değişiklikler hücre içi-hücre dışı arasındaki konsantrasyonların birbirine yaklaşmasını kolaylaştırabilir.

7 hafta süre ile 30 sn maksimal bisiklet yüklemeleri ile antrenmanın yaptırıldığı bir araştırmada⁸⁹, antrenmanlardan sonra deneklere bizim çalışmadakine benzer şekilde gibi bisiklet yükleme testi yaptırılmış ve pik güç ile VO_{2max}'ın önemli oranda arttığı

gözlenmiştir. Bu çalışmada alınan kas örneklerinde antrenman öncesi-sonrasında anaerobik metabolizmanın göstergesi olan kas hidrojeni, laktat ve glikojen miktarı değişmemesine rağmen test süresinin uzadığı görülmüştür. Araştırmacılar test süresinin uzamasını sprint antrenmanlarının aerobik performans üzerindeki etkisiyle açıklamışlardır⁸⁹. Bu araştırmada bizim bulgularımıza benzer şekilde yükleme sonrası plazma laktat konsantrasyonunun daha yüksek bulunması, sprint antrenmanlarının kas kan akımını artırdığını ve-veya laktat taşıma mekanizmasını geliştirdiğini düşündürmüştür. Nitekim bizim çalışmamızda anaerobik metabolizma son ürünü olan laktat konsantrasyonlarının antrenman sonrası dönemde arttığı görülmüştür.

Literatürde sprint antrenmanları sonrası daha fazla iş kapasitesine rağmen kan laktat miktarı üzerindeki etkileriyle ilgili karışık görüşlere rastlanmaktadır^{123,124}. Bulgulardaki bu uyumsuzluk sprint ve dinlenme sürelerindeki farklılık ile açıklanabilir. Uzun dinlenme aralıkları yeterli dinlenme sağladığından bir sonraki yüklenmenin de anaerobik olarak yapılması mümkün olmaktadır¹²⁶.

7 hafta boyunca haftada 3 gün maksimal yüklenme olarak Wingate testi yaptırılan deneklerde⁹³ antrenmanlardan sonra üretilen gücün artışı yanında daha az yorgunluk olduğu görülmüştür. Nitekim bizim çalışmamızda da sprint antrenmanlarından sonra katılımcılarımızın 30 sn maksimal sprint performansı, 30 sn maksimal izometrik kasılma kuvveti ve yorgunluk testi sırasındaki bisiklet performansının geliştiği bulunmuştur. Bu veriler antrenmanlar sonrasında deneklerin artan kan laktat konsantrasyonlarına karşın yorgunluğa karşı dayanıklılık kazandığını düşündürmektedir. Bulgularımız yaptırdığımız antrenmanların kasın kendinde yorgunluğa karşı direnci artıran uyum yanıtlarını tetiklediğini işaret etmektedir.

5.3. EMG Bulgularının Değerlendirilmesi

Yorgunluk sırasında kas EMG' sinde gözlemlenen en belirgin nitelik ortalama ateşleme frekansının azalmasıdır^{126,127,128}. Bu özelliğinden dolayı frekans değerlerindeki değişim kas kuvvetinin zamana bağlı değişimini yorumlamada kullanılabilir niteliktedir^{126,139}. Submaksimal kasılmalarda motor yolda meydana gelen değişimler kasın bütününde kuvvet çıktısını sabit tutmada yeterli olabilir. Ancak maksimal

kasılmalarda yorgunluk sırasında kuvvet azalırken motor nöronların etkinlik örüntüsü bu aşamada kuvveti sabit tutmak için yeterli olmayabilir. Bizim çalışmamızda bütün kaslarda kuvvet değişimi ile frekans değişimleri incelendiğinde kuvvet azalmasının ortalama frekans azalması ile ilişkili olduğu görülmüştür. Maksimal kasılmalarda, submaksimal kasılmalara oranla tip II lifler aktive edildiğinden, EMG ölçümlerinde daha yüksek frekans değerleri kaydedilmektedir. Ancak maksimal kasılmalar sırasındaki yorgunlukta EMG frekansının azalması kasın aktivasyon örüntüsünde meydana gelen değişikliği ve etkin lif sayısının azaldığını düşündürür. Maksimal ve maksimale yakın kasılmalarda kasılma kuvveti ve uyarı frekansı saniyeler içinde azalmaya başlar¹²⁶. Nitekim bizim çalışmamızda da quadriceps kas grubunda kuvvet kaybının uyarı frekansı ile eş zamanlı olarak azalıyor olması literatürle uyumlu bir bulgudur.

Literatürde frekans azalması santral yorgunlukta beyinden gelen efferent deşarjın azalması yanında¹²⁸, periferik yorgunlukta biriken metabolitler nedeni ile ileti hızının azalması^{126,129,130} ile ilişkilendirilmektedir. Tip II kas liflerindeki biyokimyasal değişikliklerin ortalama frekansı azaltan önemli bir etken olduğu belirtilmektedir^{126,131,132}. Kasta laktat ve K^+ birikimi, pH azalması gibi biyokimyasal değişikliklerden dolayı aksiyon potansiyellerinin iletiminin yavaşladığı belirtilmektedir. Ancak frekans azalmasında ileti hızından başka faktörlerin de etkili olabileceği unutulmamalıdır¹³².

Çalışmamızda rektus kasının ortalama frekansları antrenman öncesi dönemde diğer iki kasta daha yüksek bulunmuştur. Bu anlamlı farklılık bizim test düzeneğimizde rektus kasının kasılmada en etkin kas olduğuna işaret etmektedir. Ortalama frekanstaki azalma iki fazda irdelenir: yorgunluğun başlangıcına karşılık gelen doğrusal evre ile ilerleyen sürede karşılaşılan plato fazı. Plato fazı ortalama frekansın olası en alt sınırını gösterdiğinden platonun gözlemlenebilmesi için kasılma süresinin yeterince uzun olması gereklidir¹³². Bizim çalışmamızda kasılmalar 30 sn devam etmiş ve bu süre boyunca her üç kasta da ortalama frekans doğrusal olarak azalmıştır.

RMS ve IEMG verileri değerlendirildiğinde her üç kasta da frekans değişimindeki gibi benzer bulgulara ulaşılmamıştır. Rektus femoris kasında IEMG değerlendirmesinde antrenman öncesinde dinlenime göre yorgunlukta anlamlı artış görülmüştür. Buna karşın vastus medialis ve lateralis kaslarında anlamlı değişimler

kaydedilmemiştir. RMS kayıtlarında da yorgunlukla beraber rektus femoris kasında antrenmanlardan önce anlamlı artışlar kaydedilmiştir. Yorgunluk sırasında EMG genliği azalmış olduğundan IEMG ölçümleri de buna paralel olarak azalmaktadır⁷³. Her üç kasta da EMG aktivitesini gösteren IEMG ve RMS değerlerinde yukarıda söz edilen rektus değişikliği dışında değişme olmamıştır. Maksimal kasılma sırasında kuvvet azalmasına rağmen IEMG aktivitesinin artması ya da değişmemesinin periferik yorgunluğu gösterdiği belirtilmektedir¹³⁴.

Quadriceps grubunu oluşturan kaslar kasılmaya eşit oranda katılmadığı için kaslar arasında farklı bulgular kaydedilmektedir. Biartiküler bir kas olan rektus femoris kasının hem izometrik kasılmalar hem de bisiklet gibi döngüsel hareketlerde vastus grubu kaslardan daha çabuk yorulduğu ifade edilmektedir¹²⁶. Bu bulgu diğer kaslardan daha büyük olan rektusun kasılma sırasındaki kuvvet üretiminde daha etkin rol alması ve yüksek tip II lif içeriği ile açıklanabilir¹²⁶. Nitekim yapılan çalışmalarda rektus kasının ortalama frekansının vastus kaslarından daha yüksek olduğu bulunmuştur¹²⁶. Bizim araştırmamızda da rektus kasının maksimum ateşleme frekansı bütün ölçümlerde diğer kaslardan daha yüksek bulunmuş olup, veriler literatürle uyumludur. Ayrıca rektus femoris kasının EMG veri grubunun değerlendirmesinin daha güvenilir sonuçlar verdiği ifade edilmiştir^{126,133}. Kasılma sırasında dizin konumundaki çok küçük bir değişiklik (internal veya eksternal rotasyon gibi) vastus grubu kasların ölçümlerinde değişikliklere neden olabilmekte ve bu kaslara ait EMG değerlendirmesinde zorluklara yol açabilmektedir.

5.4. Elektrik Uyarısının Değerlendirmesi

Periferik yorgunluğu ölçmenin en nesnel yöntemlerinden birisi de yorgunluk sonrasında verilen elektrik uyarısının kas kuvvetinde yarattığı değişikliği değerlendirmektir⁷³. Yorgunluk oluşturan aktivitelerden sonra iskelet kasının eksternal uyarıya verdiği yanıtta azalma görülmektedir. Çalışmamızda eksternal uyarının etkilerini değerlendirmek anlamında, hem kontraksiyon sırasında hem de herhangi bir kontraksiyonun yapılmadığı dinlenim koşullarında iskelet kasına elektriksel uyarı verilmiştir. Bu sayede kontraktil uyarıların dışardan verilen uyarılara verdiği yanıtı

somutlaştırmak ve bu etkinin yorgunluk ile olan ilişkisini irdelemek mümkün olmuştur. İstemli kasılma sırasında kasa uyarılar vererek, iskelet kasının yarattığı kuvvete dışardan verilen uyarının herhangi bir etkisinin olup olmayacağını değerlendirmek amaçlanmıştır.

5.4.1. İstemli Kasılma Olmadan Kasa Uygulanan Elektriksel Uyarının Etkisi

Bu modelde deneklerden istemli olarak herhangi bir kasılma yapmamaları istenmiştir. Dışarıdan verilen elektriksel uyarıların oluşturduğu kasılma kuvvetin kaydı, ilgili kas grubunun kontraktıl elemanlarının performansını değerlendirmek anlamında önemli olmuştur. Deney modelinin kurgusu gereği kontraksiyon sırasında SSS den gelen uyarılar, yerini stimulatörün verdiği uyarılara bırakmıştır ve olası santral yorgunluk bileşenleri belirli bir oranda devre dışı kalmıştır^{134,136}. Çalışmamızda elektrik uyarısının oluşturduğu istemsiz kuvvet değeri yorgunluk sonrasında anlamlı olarak azalmıştır. Aynı nitelikteki elektriksel uyarının oluşturduğu kuvvet yanıtının yorgunlukta dinlenme değerine göre azalmış olması periferel yorgunluğun ortaya çıkmış olduğunu işaret etmektedir⁷³. Öte yandan bulgularımız yaptırdığımız sprint antrenmanlarının gözlemlenen yanıt örüntüsünde herhangi bir etkisinin olmadığını düşündürmektedir.

Çalışmamızda istemli kasılmalar sırasında kaydedilen kuvvet değerleri sadece elektrik uyarısı sonrası elde edilen kuvvet değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. İstemli maksimal kasılmalar sırasında teorik olarak ilgili motor yolakta yerleşmiş motor liflerinin çok önemli bir bölümünün etkinleşmeye başladığı düşünülür. Motor yolaktaki etkinleşme ilgili kas grubunun tama yakın bölümünde kasılmayı başlatacaktır. Buna karşın dışardan verilen elektriksel uyarılar sırasında etkinleşen kas kitlesi elektrodun ulaşabildiği oranla kısıtlı kalacaktır. Her iki uyarı tipi birbirleriyle karşılaştırıldığında, kuvvetini ölçtüğümüz kas gruplarında elektriksel uyarıyla çok daha düşük oranda etkinleşmenin olması, ölçülen kas kuvvetinin de daha düşük bulunmasını açıklayabilir. Ek olarak SSS uyarılarının olası değişken frekansı ve etkinleşen motor lif bileşenlerinin spasiyal ve temporal farklılıkları, dışardan verilen uyarılar sırasında tekrarlanması mümkün olmayan bir örüntü sergiler. Dış kaynaklı uyarı yöntemlerinden birisi olan korteksin direkt stimulyasyonlarında elde edilen örüntünün farklı metodolojisi nedeniyle, modelimizdeki olası etkisi konusunda herhangi bir yorum yapmak mümkün değildir.

Nöromusküler elektriksel uyarı klinikte kas atrofisine neden olabilecek istemli kas kontraksiyonlarının yapılmasının mümkün olmadığı hastalıklarda, tedavi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır^{135,136}. Yapılan çalışmalarda 50 Hz'lik uyarı frekansının istemsiz kasılmalar sırasında maksimum kuvveti yarattığı ve bu özelliği nedeniyle de kas kuvvetini artıran optimal frekans olduğu gösterilmiştir¹³⁶. Ayrıca kas kuvvetini artırmak için kullanılan Russian tipi uyarılarda optimal döngü süresinin %10(kasılma/dinlenme aralığı 1/10) olduğu kaydedilmiştir. Çalışmalarda Russian elektrik uyarı örüntüsünün istenilen etkinliği gösterdiği bildirilmekle beraber, bazı kaynaklarda aşırı uyarı nedeni ile kasta hasar meydana gelebileceği belirtilmektedir¹³⁷. Çalışmamızda maksimal kas kuvvetini oluşturmak amacıyla kullanılan bu elektriksel uyarı örüntüsünün, kısa süreli uygulamalar yapılmış olması nedeniyle kas harabiyetine yol açtığı düşünülmemektedir¹³⁷. Öte yandan bu türlü uyarıların kas kuvvetini artırdığına dair veriler yayınlanmış olmakla beraber¹³⁶, uygulamanın kısa sürelerle yapılmış olması, sporcularda gördüğümüz kuvvet kazanımının antrenmanlar sonrasında ortaya çıktığını düşündürmektedir.

Eksternal uyarılar sonrasında oluşan kontraksiyonları istemli kontraksiyonlardan ayıran önemli bir diğer fark, elektriksel uyarılarda programlanmış uyarı örüntüsüne bağlı olarak iskelet kasında senkron kasılmaların oluşturulmasıdır¹³⁷. Elektrik uyarısının ulaştığı kas kesit alanında bulunan bütün lifler uyarı sonrasında aynı anda kasılmak zorunda kalır. Bu senkron aktivite istemli kasılmadaki kontrol mekanizmalarını ortadan kaldırdığı için liflerin daha hızlı ve çok yorulmasına neden olmaktadır. Kasın bütününde yorgunluğu belirleyen değişkenler arasında uyarılan kasın kesit alanı ile uyarı frekansının ve elektrot özelliklerinin etkin olduğu belirtilmektedir^{138,141,140,141}. Elektrot kesit alanındaki artış yorgunluk oluşumunu hızlandıran bir unsurdur. Öte yandan düşük frekanslı uyarılar (20 Hz) yüksek frekanslı uyarılardan (50-80 Hz) daha az yorgunluk oluşturmaktadır¹³⁹. Akımın büyüklüğü de elektriksel uyarının yorgunluk yapıcı özelliklerini etkileyen değişkenlerden bir tanesidir. Akımdaki değişikliklerin yorgunluk yapıcı etkisinin yukarıda anlatılan temel özelliklerden farklı olarak bireysel farklılıklar gösterebileceği bildirilmektedir¹⁴¹.

İstemli kasılmaları elektriksel uyarılar sonrası oluşturulan kasılmalardan ayıran farklılıklardan bir tanesi de kasılmaya katılan kas liflerinin örüntüsündeki ayrımdır. Normal koşullar altında istemli kasılmalar sırasında öncelikli olarak yavaş

kasılan kas lifler devreye girerken, ilerleyen süreçte hızlı kasılan kas liflerinin katılımı gözlemlenir. Buna karşın dışardan verilen elektriksel uyarılarda bu sıra gözetilmeksizin kas liflerinin tümünün eş zamanlı etkinleşmesi söz konusu olur. Hızlı kasılan kas liflerinin kasılmaya istemli kasılmalara oranla çok daha erken evrelerde başlaması, yorgunluk oluşumunu hızlandırır^{125,142}. Elektriksel uyarılardan sonra alınan biyopsilerde tip I liflerde değişme olmazken tip II liflerde glikojen içeriğinin azalması uyarıların tip II lifleri aktive ettiğini göstermektedir¹²⁵.

5.4.2. Maksimal İstemli Kasılma Sırasında Kasa Verilen Elektrik Uyarısının Etkisi

Maksimal kasılma sırasında dışarıdan kasa veya motor sinire elektriksel uyarı verilmesi sayesinde yorgunluk bileşenlerini yorumlamak mümkün olabilmektedir. Maksimal istemli kasılma sırasında kasa dışarıdan uyarı verildiğinde kasta bir miktar kuvvet artışı olması, kastaki motor ünitelerin hepsinin göreve katılamadığını göstermektedir¹⁴³.

Çalışmamızda antrenman sonrası dönemde istemli kasılmaların elektriksel uyarılarla bir arada gerçekleştirildiği zaman aralıklarındaki kuvvet değerleri antrenman öncesine göre yüksek bulunmuştur. Bu artışların olası nedeni antrenman sonrası istemli kasılma kuvvetinin artmasıdır. Çünkü antrenman öncesi ve sonrasında dinlenim ve yorgunluk testi sonrasında yapılan MVC sırasında verilen elektriksel uyarılar, kuvvette anlamlı bir artış oluşturmamış aksine kuvvet istemli kasılmalardekine benzer şekilde azalmaya devam etmiştir. Uyarı gelmesine rağmen kuvvetteki bu azalma yorgunluk testinden sonra da değişmemiştir. Bu veriler sporcuların istemli olarak kaslarını tama yakın oranda aktive edebildiklerini düşündürmektedir.

Bazı bireylerde uyarıyla birlikte görülen kuvvet artışı ortalamada istatistiksel bir anlamlılık yaratmamıştır. Deneklerin elektriksel uyarılar geldikten sonraki subjektif duygulanımları sorgulandığında birçoğu elektrik uyarısının geldiği ilk anda kuvvet üretiminde bir baskılanma hissettiklerini ifade etmişlerdir. Nitekim bu durum bazı kasılmalarda uyarının kasa ulaştığı bilinen zaman aralığında kuvvet kaybı olarak da kaydedilmiştir. Ancak bu küçük değişimler de istatistiksel olarak anlamlı bir değişikliğe neden olmamıştır. Katılımcıların bir diğer subjektif yakınması da maksimal kasılma

sırasında verilen elektrik uyarısının, dinlenim koşullarına oranla daha ağırlı olduğıdur. Nitekim literatürde de istemli kas kasılmaları sırasında verilen elektrik uyarılarının benzer sorunlara neden olduğı belirtmektedirler¹⁴⁴. Bu olumsuz tablo çalışmamızda elektriksel uyarılar sonrasında kuvvet artışı görememiş olmamızın olası nedenlerini tartışırken göz önünde tutulması gereken bir diğerk etken olarak kabul edilebilir.

Yapılan çalışmalarda elektrik uyarısının istemli kasılmalarından farklı olarak tip II kas liflerini aktive etmesi sonucunda, submaksimal şiddetteki kasılmalarda bile PCr yıkımını hızlandırdığı ve laktat birikimini artırdığı gösterilmiştir^{142,145,146}. Buna ek olarak glikolizi hızlandırması nedeniyle bu kas liflerindeki depo glikojen miktarını da olumsuz etkileyen bir durumun ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.¹⁴⁷ Bütün bu olumsuz etkilerine karşın, istemli kasılmalar sırasında elde edilen kuvvet değerkleri ile dışardan verilen uyarılarla elde edilen kuvvet değerklerinde benzer sonuçların gözlenmiş olması, modelimizde elektriksel uyarıların olumsuz bir etki yaratmadığını göstermiştir. Nitekim literatürde bu frekansta verilen uyarılarda kuvvet artışı kaydetmeyen çalışmalar mevcuttur^{148,149}.

Dışarıdan uyarı verilmesine rağmen kas kuvvetinde herhangi bir değerişiklik yaratmamış olması, yorgunluğun periferik kaynaklardan oluştuğunu destekleyen bir diğerk gösterge olarak yorumlanabilir. Çalışmamızda kullandığımız uyarı modeli sporcularımızda gözlemlediğimiz yorgunlukta baskın olarak periferik etkenlerin sorumlu olabileceğini düşündürmektedir.

6.SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bu çalışmada 30 metre sprintleri içeren yüksek şiddetli yüklenmelerin başta maksimal sprint performansı olmak üzere sportif performans üzerinde önemli etkilerinin olduğunu göstermiştir. Bu açıdan genel antrenman kapsamı uzun süreli ve devamlı yüklenmelere oranla oldukça kısa olan bu tarz yüklenmelerin sonuçları sportif performans açısından göz önünde bulundurulmalıdır.
- 5 haftalık bu yüklenmeler VO_{2max} artışının yanı sıra bisiklet yüklemelerini içeren yorgunluk testinde dayanıklılığı da geliştirmiştir. Bu açıdan sprint antrenmanların aerobik adaptasyonlar da sağladığı gösterilmiştir.
- Sprint antrenmanları maksimal kasılma kuvvetinde artış sağlamıştır.
- Çalışmamızda yorgunlukta kas kuvvetinin önemli oranda azaldığı gösterilmiştir. Antrenmanlar maksimal kas kuvvetini artırdığı halde yorgunluk örüntüsünde herhangi bir değişiklik yapmamıştır.
- Bu çalışmada kaslara ait EMG ölçümlerinde ortalama frekansların kas kuvveti ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Frekans azalması ile kuvvet azalması arasındaki korelasyon bu bulguyu desteklemektedir.
- Rektus kasının maksimal kuvvet ölçüm protokolümüzde en etkin kas olduğu ortaya konmuştur.
- Dışarıdan kasa uygulanan elektrik uyarısının yorgun kasta oluşturduğu yanıt önemli oranda azalmıştır. Bu durum kasa optimal uyarı gelse dahi yorgunlukta kontraktıl elemanların cevap yanıtının azaldığını ve periferik kaynaklı yorgunluğu işaret etmektedir.
- Maksimal istemli kasılma sırasında dışarıdan kasa verilen elektrik uyarıları kas kuvvetini artırmamıştır. Bu durum yorgun kasta da değişmemiş olup, deneklerin kaslarını maksimale yakın oranda aktive ettiklerini düşündürmektedir. Ayrıca bu ölçümler sırasında deneklerin iyi motive edilmeleri gerekliliği de unutulmamalıdır.
- Çalışmamızda antrenmanlardan sonra kan laktat düzeyleri artmıştır. Bu durum kasta laktat klirensinin arttığını düşündürmektedir.

- Yorgunluk durumunda kanda LDH, CK enzimleri ile K^+ , Na^+ ve P_i iyonları artmıştır. Antrenmanların bu durum üzerinde bir etkisi olmamıştır.
- Kasın kendinde meydana gelen değişiklikler yorgunlukta etkin rol aldığına göre sportif performansta yorgunluğun kısıtlayıcı etkisinden kurtulmak için kasın performansının yüksek tutulması gerekliliği açıktır. Bunun için vücutta yorgunluğa toleransın gelişmesini sağlayacak yeterli dinlenme aralıkları verilmesi ve yarışma yüklenmelerinin önceden vücuda tanıtılması gerekmektedir.
- Yorgunluk periferik kaynaklardan dolayı gelişerek kas performansını kısıtlamaktadır.

7. KAYNAKLAR

1. **Guyton & Hall.** *Tıbbi Fizyoloji:* Çavuşoğlu H, Yeğen BÇ, Nobel Tıp Kitapları, 11.basım, **2007**.
2. **Bern RM, Levy ML, Koeppen BM, Stanton BA.** *Sinir Sistemi,Özgünen T.:*Türk Fizyolojik Bilimler Derneği. *Fizyoloji,* Mosby, **2008**.
3. **Widmaier EP, Raff H, Strang KT.** *Vander İnsan Fizyolojisi.* Demirgören S. Güven Kitabevi, **2010**.
4. **Gandevia SG.** Spinal and Supraspinal Factors in Human Muscle Fatigue,**2001**; *Physiol Rev* 81: 1725–1789, 2001.
5. **Duchateau J, Semler JG, Enoka RM.** Training Adaptations in The Behavior of Human Motor Units, **2006**, *J Appl Physiol* 101:1766-1775
6. **Burke AA, Strick PL, Kanda K, Kim CC, Walmsley B.** Anatomy of Medial Gastrocnemius and Soleus Motor Nuclei in Cat Spinal Cord, *J Neurophysiol*,**1977**, 40: 667-748.
7. **Belanger AY, McComas AJ.** Extent of Motor Unit Activation During Effort, *J Appl Physiol*, 1981, 51:1131-1135.
8. **Binder MD, Heckman CJ, Powers RK.** The Physiological Control of Motoneuron Activity, *Handbook of Physiology, Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*, Bethesda MD, Am Physiol Soc, 1996, 12(1):1-53.
9. **Kellis E.** Quantification of Quadriceps and Hamstring Antagonist Activity,1998, *Sports Med*, 25:37-62.
10. **Kamen G, Knight CA.** Trainig-Related Adaptations in Motor Unit Discharge Rate in Young and Olders Adults, *J Geontal A Sci Med Sci*, 2004, 59: 1334-1338.

11. **Klas M, Baudry S,Duchateau J.** Contractile Properties of Single Motor Units in Elderly, *Comp Meth Biomech Eng*, **2005**, **1**:167-168.
12. **Åstrand PO, Rodahl K, Dahl H, Strømme SB.** *Textbook of Work Physiology*, 4th ed, Champaign, IL: Human Kinetics, **2003**.
13. **Budgett R.** Overtraining syndrome. *J. Sports Med*, **1990**; 24(4):231-236.
14. **Halsen SL, Matthew WB, Romain M, Bart B, Michael G, David AJ, Asker EJ.** Time course of performance changes and fatigue markers during intensified training in trained cyclists. *J Appl Physiol*, **2002**; 93:947-956.
15. **Ganong WF.** *Tıbbi fizyoloji*. 20. baskı. Ankara: Nobel Kitapevi, **2002**.
16. **Maughan R, Gleeson M.** *The Biochemical Basis of Sports Performance*, Oxford Univrsity Pres, **2004**.
17. **Gaitanos GC.** Human Muscle Metabolism During Intermittent Maximal Exercise,*Journal of Appl Physiol*, 1993, 75:712-719.
18. **Prokop L.** *Spor Hekimliğine Giriş*. 3. Baskı, İstanbul: **1983**.
19. **Sharon AP, Denise LS.** *Exercise Physiology for Health, Fitness and Performance*. 2th ed, San Francisco: Benjamin Cummings Publishing, **2003**.
20. **Billat LV.** Interval Training for Performance: A Scientific and Empirical Practice, *Sports Med*,**2001**, 31(1):13-31.
21. **Olaru MA, Öztürk F.** *Sportif Antrenman Teori ve Medoloji*, Çukurova Üniversitesi Basımevi,**1994**.
22. **McComas AJ.** *Skeletal Muscle Form and Function*,Human Kinetics, **1996**.

23. **Ament W, Gijsbertus JV.** Exercise and Fatigue, *Sports Med*, 2009, 39(5): 369-422.
24. **Bigland RB, Furbush F, Woods JJ.** Fatigue of Submaximal Static Contractions, *Acta Physiol Scand Suppl*, 1986, 556:137-148.
25. **Allen DG, Lamb GD, Westerblad H.** Skeletal Muscle Fatigue: Cellular Mechanism, *Physiol Rev*, 2008, 88:287-332.
26. **Bigland RB, Johansson R, Lippold OC, Woods JJ.** Contractile Speed and EMG Changes During Fatigue of Sustained Maximal Voluntary Contractions, *Journal of Neurophysiology*, **1983**,50;1;313-324.
27. **Edgerton VR, Roy RR.** The Nervous System and Movement, *edt by Tipton CM, ACSM's Advanced Physiology*, Lipincott Williams&Wilkins, **2006**.
28. **Bigland RB, Ritchie B.** EMG and fatigue of human voluntary and stimulated contractions, *Ciba Found Symp* 82: 130–156, **1981**.
29. **Westerblad H, Lee JA, Lännergren J, Allen DG.** Cellular Mechanism of Muscle Fatigue, *Am J Appl Physiol(cell Physiol 30)* **1991** , 261:195-209.
30. **Fitts RH.** The Muscular System: Fatigue Processes, *edt by Tipton CM, ACSM's Advanced Physiology*, Lipincott Williams&Wilkins, **2006**.
31. **Juel C, Pilegaard H.** Lactate Exchange and pH Regulation in Skeletal Muscle, *edited by Hargreaves, Thompson M, Biochemistry of Exercise*, Human Kinetics, **1997**.
32. **Gren HJ.** Mechanism of Muscle Fatigue in Intense Exercise, *Journal of Sport Science*, **1997**, 15:247-256.
33. **Gandevia SC.** Mind Over Muscle: The Role of The CNS in Human Muscle Performance, *edited by Hargreaves, Thompson M, Biochemistry of Exercise*, Human Kinetics, **1997**.

34. **Noakes TD, Gibson AC, Lambert EV.** From Catastrophe to Complexity: a Novel Model of Integrative Central Neural Regulation of Effort and Fatigue During Exercise in Humans: Summary and Conclusions, *Br J Sports Med*, **2005**, 39:120-124.
35. **Noakes TD, St Clair Gibson A.** Logical Limitations to The “Catastrophe” Models of Fatigue During Exercise in Humans, *Br J Sports Med*, 2004, 38: 648-649.
36. **Sahlin K, Tonkonogi M, Söderlund K.** Energy Supply and Muscle Fatigue in Humans, *Acta Physiol Scand*, 1998, 162:261-266.
37. **Lamb GD.** Excitation-Contraction Coupling and Fatigue in Skeletal Muscle, *edited by Hargreaves, Thompson M, Biochemistry of Exercise*, Human Kinetics, **1997**.
38. **Allen DG, Balnave CD, Chin ER, Westerblad H.** Failure of Calcium Release in Muscle Fatigue, *edited by Hargreaves, Thompson M, Biochemistry of Exercise*, Human Kinetics, **1997**.
39. **Westerblad H.** The Role of pH and Inorganic Phosphate Ions in Skeletal Muscle Fatigue, *edited by Hargreaves, Thompson M, Biochemistry of Exercise*, Human Kinetics, **1997**.
40. **Haan AD, Koudijs JC.** A Linear Relationship Between Atp Degradation and Fatigue During High-Intensity Dynamic Exercise In Rat Skeletal Muscle, *Experimental Physiol*, **1994**, 79:865-868.
41. **Brooks GA, Fahey TD, Baldwin KM.** Exercise Physiology, *Mc Graw Hill*, **2005**
42. **Gladden LB.** Muscle as a Consumer of Lactate, *Med Sci Sports Exer*, **1998**, 32(4);764-771.
43. **Roberts RA, Ghiasvand F, Parker D.** Biochemistry of Exercise-Induced Metabolic Acidosis, *Am J Physiol Regul Integr*, 2004, 287:502-516.
44. **Hall GV.** Lactate as a Fuel For Mitochondrial Respiration, *Acta Physiol Scand*, **2000**, 168:643-656.

45. **Pösö AR.** Monocarboxylate Transporters and Lactate Metabolism in Equine Athletes: A Review, *Acta Vet.Scand*, **2002**, 43;63-74.
46. **Westerblad H, Allen GA, Lännergren J.** Muscle Fatigue: Lactic Acid or Inorganic Phosphate The Major Cause?, *News Physiol Sci*, **2002**, 17;17-21.
47. **Gladden LB.** Lactate Metabolism: A New Paradigm for The Third Millenium, *J Physiol*, 2004, 558(1):5-30.
48. **Pilegaard I, Bangsbo J, Richter EA, Juel C.** Lactate Transport Studied in Sarcolemmal Giant Vesicles From Human Muscle Biopsies: Relation to Training Status, *J Appl Physiol*, **1994**, 77(4): 1858-1862.
49. **Dahlstedt AJ, Katz A, Westerblad H.** Role of Myoplasmic Phosphate in Contractile Function of Skeletal Muscle: Studies on Creatine Kinase- Deficient Mice, *J Physiol*, **2001**, 533: 379-388.
50. **Cairns SP.** Lactic Acid and Exercise Performance, Culprit or Friend?, *Sport Med*, **2006**, 36(4):279-291.
51. **Abbiss CR, Laursen PB.** Models to Explain During Prolonged Endurance Cycling, *Sports Med*, **2005**, 35(10):865-898.
52. **Lieber RL.** *Skeletal muscle structure and function: implications for rehabilitation and sports medicine*. Philadelphia: Williams and Wilkins, **1992**: 280-283
53. **Totsuka M, Nakaji S, Suzuki K, Sugawara K, Sato K.** Break point of serum creatine kinase after endurance exercise. *J Appl Physiol*, **2002**: 93:1280-1286.
54. **Young A.** Plasma creatine kinase after the marathon a diagnostic dilemma, *Br J Sports Med*, **1984**; 18(4):269-272.
55. **Havas E, Komulainen J, Vihko V.** Exercise-induced increase in serum creatine kinase is modified by subsequent bed rest. *Int J Sports Med*, **1997**; 18:578-82.

56. **Brancaccio P, Maffulli N, Limongelli FM.** Creatine kinase monitoring in sport medicine. *British Medical Bulletin*, **2007**; 14:1-22.
57. **Rose LI, Bousser JE, Cooper KH.** Serum enzymes after marathon running. *J Appl Physiol*, **1970**; 29(3):355-357.
58. **Lieber RL.** *Skeletal muscle structure and function: implications for rehabilitation and sports medicine*. Philadelphia: Williams and Wilkins, **1992**: 280-283.
59. **Sjøgaard G, Adams RP, Saltin B.** Water and I on Shifts in Skeletal Muscle of Humans With Intense Dynamic Knee Extension, *Am J Physiol*, **1985**, 248(17): 190-196.
60. **Sahlin K.** *Energy Metabolism and Muscle Fatigue During Exercise; The Physiology and a Pathophysiology of Exercise Tolerance*: **Steinacker JM, Ward SA**, Plenum Press, **1996**.
61. **Posterino GS, Fryer MW.** Effects of High Myoplasmic L-Lactate Concentration on E-C Coupling in Mammalian Skeletal Muscle, *J Appl Physiol*, **2000**, 89:517-528.
62. **Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK.** Contribution of Phosphocreatine and Aerobic Metabolism to Energy Supply During Repeated Sprint Exercise, *J Appl Physiol*, **1996**, 80(3):876-884.
63. **McArdle WD, Frank IK, Victor LK.** *Essentials of Exercise Physiology*. 2th ed, Lippincott Williams, **2000**.
64. **Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P.** The repeated bout of reduced-load eccentric exercise on elbow flexor muscle damage. *Eur J Appl Physiol*, **2001**; 85:34-40.
65. **Nicol C, Komi PV, Horita T, Kyrolainen H, Takala TES.** Reduced stretch-reflex sensitivity after exhausting stretch-shortening cycle exercise. *Eur J Appl Physiol*, **1996**; 72:401-409.

66. **Nybo L, Rasmussen P.** Inadequate Cerebral Oxygen Delivery and Central Fatigue During Strenuous Exercise, *Exerc Sport Sci Rev*, 2007, 35(3):110-118.
67. **Ide K, Horn A, Secher NH.** Cerebral Metabolic Response to Submaximal Exercise, *J Appl Physiol*, 1999, 87:1604-1608.49
68. **Eydoux N, Py Guillaume, Lambert K, Dubouchaud H, Prefaut C, Mercier J.** Training Does not Protect Against Exhaustive Exercise-Induced Lactate Transport Capacity Alterations, *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2000, 278:1045-1052.
69. **Basmajian JV, De Luca CJ.** Muscles Alive Their Functions Revealed by Electromyography, Williams & Wilkins, 1985.
70. **Arabadzhiev TI, Dimitrov VG, Dimitrova NA, Dimitrov GV.** Interpretation of EMG Integral or RMS and Estimates of “ Neuromuscular Efficiency” Can be Misleading in Fatiguing Contraction, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2009.
71. **Igor Š, Tomaž J, Vojko S.** Evolution of the Mean Power Frequency of The EMG Signal Power Spectrum at Endurance Levels During Fatiguing Isometric Muscle Contractions. *Kinesiologia Slovenica*, 2008; 14(1);28-38.
72. **Enoka RM, Stuart DG.** Neurobiology of Muscle Fatigue, *J Appl Physiol*, 1992, 72(5): 1631-1648.
73. **Zwarts MJ, Bleijenberg G, Vhan Engelen BG.** Clinical Neurophysiology of Fatigue, *Clinical Neurophysiology*, 2008, 119;2-10.
74. **Delitto A, Synder-Mackler L.** Two Theories of Muscle Strength Augmentation Using Percutaneous Electrical Stimulation, *Physical Therapy*, 1990, 70: 158-164.
75. **Belanger AY, McComas AJ.** Extent of Motor Unit Activation During Effort, *J Appl Physiol*, 1981, 51(5):1131-1135.

76. **Maassen N.** *Mechanism of Fatigue in Small Muscle Groups: The Physiology and Pathophysiology of Exercise Tolerance*; Steinacker JM, Ward SA; Plenum Press, **1996**.
77. **Bompa TO.** *Sporda Çabuk Kuvvet Antrenmanı*. Bağırhan Yayınevi, Ankara: **2001**
78. **Billat LV.** Interval Training for Performance: A Scientific and Empirical Practice, *Sports Med*, 2001, 31(1): 13-31.
79. **Ball D, Herrington L.** Training and overload: adaptation and failure in the musculoskeletal system. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, **1998**; 2(3); 161-167
80. **Pottelger JA, Wilson GD.** Training the pitcher: a hypothetical model. *NSCA Journal*, **1989**; 11:3.
81. **Kellman M.** *Enhancing Recovery*, Human Kinetics, **2002**.
82. **Casaburi R.** Principles of exercise training. *American college of Chest physicians*, **1992**; 101:263-267.
83. **Fox and Mathews.** *Interval Training Conditioning for Sports and General Fitness*, W.B.Saunders Company, **1974**.
84. **Nevill ME, Boobis LH, Brooks S, Williams C.** Effect of Training on Muscle Metabolism During Treadmill Sprinting, *J Appl Physiol*, **1989**, 67(6):2376-2382.
85. **Dodd S, Powers SK, Callender T, Brooks E.** Blood lactate disappearance at various intensities of recovery exercise. *J Appl Physiol*, **1984**; 57:1462-1465.
86. **Alon G, Smith GV.** Tolerance and Conditioning to Neuro-Muscular Electrical Stimulation Within and Between Sessions and Gender, *Journal Sports Sci and Med*, **2005**, 4:395-405.

87. **Gibala BJ, Little JP, Essen M, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, Tarnopolsky MA.** Short Term Sprint Interval Versus Traditional Endurance Training: Similar Initial Adaptations in Human Skeletal Muscle and Exercise Performance, *J Appl Physiol*, 2006, 575(3):901-911.

88. **Nevill ME, Boobis LH, Brooks S, Williams C.** Effect of Training on Muscle Metabolism During Treadmill Sprinting, *J Appl Physiol*, 1989, 67(6):2376-2382. s15

89. **Harmer AR, McKenna MJ, Sutton JR, Snow RJ, Ruell PA, Booth J, Thompson MW, Mackay NA, Stathis CG, Crameri RM, Carey MF, Eager DM.** Skeletal Muscle Metabolic and Ionic Adaptations During Intense Exercise Following Sprint Training in Humans, *J Appl Physiol*, 2000, 89:1793-1803.

90. **MacDougall JD, Hicks AL, Macdonald JR, McKelvie RS, Green HJ, Smith KM.** Muscle Performance An Enzymatic Adaptations To Sprint Interval Training, *J Appl Physiol*, 1998, 84(6):2138-2142

91. **Jacobs I, Tesch PA, Bar-Or O, Karlsson J, Dotan R.** Lactate in Human Skeletal Muscle After 10 and 30 s of Supramaximal Exercise, *J Appl Physiol*, 1983, 55(2):365-367.

92. **Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH, Brooks S.** Human Muscle Metabolism During Intermittent Maximal Exercise, *J Appl Physiol*, 1993, 75(2): 712-719.

93. **McKenna MJ, Heigenhauser GF, McKelvie RS, MacDougall JD, Jones NL.** Sprint Training Enhances Ionic Regulation During Intense Exercise in Men, *Journal of Physiol*, 1997, 501(3): 687-702.

94. **Spencer M, Bishop D, Dawson B, Goodman C, Duffield R.** Metabolism and Performance in Repeated Cycle Sprints: Active Versus Passive Recover, *Med Sci in Sports Exer*, 2006, 38(8): 1492-1499.

95. **Iaia FM, Hellsten Y, Nielsen JJ, Fernström M, Sahlin K, Bansbo J.** Four Weeks of Speed Endurance Training Reduces Energy Expenditure During Exercise and Maintains Muscle Oxidative Capacity Despite a Reduction in Training Volume, *J Appl Physiol*, 2009, 106:73-80.

96. **Hargreaves M, McKenna MJ, Jenkins DG, Warmington SA, Li JL, Snow RJ, Febbraio MA.** Muscle Metabolites and Performance During High-Intensity, Intermittent Exercise, *J Appl Physiol*, **1998**, 84(5): 1687-1691.

97. **Liljedahl ME, Sundberg CJ, Norman B, Jansson E.** Metabolic Response in Type I and Type II Muscle Fibers During a 30-s Cycle Sprint in Men and Women, *J Appl Physiol*, **1999**, 87(4):1326-1332.

98. **Burgomaster KA, Hughes SC, Heigenhauser GJ, Bradwell SN, Gibala MJ.** Six Sessions of Sprint Interval Training Increases Muscle Oxidative Potential and Cycle Endurance Capacity in Humans, *J Appl Physiol*, **2005**, 98:1985-1990.

99. **Krustrup P, Hellsten Y, Bangsbo J.** Intense Interval Training Enhances Human Skeletal Muscle Oxygen Uptake in The Initial Phase of Dynamic Exercise at High But not Low Intensities, *J Physiol*, **2004**, 559:335-345.

100. **Ortenblad N, Lunde PK, Levin K, Andersen JL, Pedersen PK.** Enhanced Sarcoplasmic Reticulum Ca^{+2} Release Following Intermittent Sprint Training, *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, **2000**, 279: 152-160.

101. **Anderson de SC, Mauro G.** EMG Amplitude and Frequency Parameters of Muscular Activity: Effects of Resistance Training Based on Electromyographic Fatigue Threshold. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, **2009**; 19:295-303.

102. **Eydoux N, Py G, Lambert K, Dubouchaud H, Prefaut C, Mercier J.** Training Does Not Protect Against Exhaustive Exercise-Induced Lactate Transport Capacity Alterations, *Am J Physiol Endocrinol Metab*, **2000**, 278: 1045-1052.

103. **Buse MW, Maassen N.** Effect of Consecutive Exercise Bouts on Plasma Potassium Concentration During Exercise and Recovery, *Med Sci Sports Exerc*, **1989**, 21:489-499.

104. **Medbo H, Sejersted OM.** Plasma K^{+} Changes During Intense Exercise in Endurance Trained and Sprint-Trained Subjects, *Acta Physiol Scand*, **1994**, 150:363-371.

105. McKenna MJ, Schmidt TA, Hargreaves M, Cameron L, Skinner SL, Kjeldsen K. Sprint Training Increases Human Skeletal Muscle Na⁺-K⁺ ATPase Concentration and Improves K⁺ Regulation, *J Appl Physiol*, **1993** ,75(1):173-180.

106. Nielsen OB, Paoli F, Overgaard K. Protective Effects of Lactic Acid on Force Production in Rat Skeletal Muscle, *Journal of Physiology*, **2001**, 536(1):161-166.

107. Thomassen M, Christensen PM, Gunnarston TP, Nybo Lars, Bangsbo Jens. Effect of 2 Weeks Intensified Training and Inactivity on Na⁺/K⁺ Pump Expression, Phospholemman(FXYD1) Phosphorylation and Performance in Soccer Players, *J Appl Physiol*, **2010**.

108. Green HJ, Barr DJ, Fowles JR, Sandiford SD, Ouyang J. Malleability of Human Skeletal Muscle Na⁺- K⁺ ATPase Pump With Short-Term Training, *J Appl Physiol*, **2004**,97:143-148.

109. Aughey RJ, Murphy KT, Clark SA, Garnham AP, Snow RJ, Smith DC, Hawley JA, McKenna MJ. Muscle Na⁺-K⁺ ATPase Activity and Isoform Adaptations to Intense Interval Exercise and Training in Well-Trained Athletes, *J Appl Physiol*, **2007**, 103:39-47.

110. McKenna MJ, Bangsbo J, Renaud JM. Muscle Na⁺, K⁺, and Cl⁻ Disturbances and Na⁺-K⁺ Pump Inactivation: Implications for Fatigue, *J Appl Physiol*, **2008**, 104:288-295.

111. Wasseman K, Stringer WW, Casaburi R, Zhang Y. Mechanism of The Exercise Hyperkalemia: An Alternate Hypothesis, *J Appl Physiol*, **1997**, 83(2): 631-643.

112. Hiroshi N, Takaamta A, Mack GV, Oda Y, Okuno T, Kang D, Morimoto T. Water and Electrolyte Balance in The Vascular Space During Graded Exercise in Humans, *J Appl Physiol*, **1993** ,70(6): 2757-2762.

113. Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal Muscle Fatigue: Cellular Mechanism *Physiol Rev*, , **2008**, 88: 287-332.

114. **Allen DG, Westerblad H.** Role of Phosphate and Calcium Stores in Muscle Fatigue, *J Physiol*, **2001**, 536:657-665.
115. **Totsuka M, Nakaji S, Suzuki K, Sugawara K, Sato K.** Break Point of Serum Creatine Kinase Release After Endurance Exercise, *J Appl Physiol*, **2002** , 93:1280-1286.
116. **Dubouchaud H, Eydoux N, Granier P, Prefaut C, Mercier J.** Effect of Acute Exhaustive Exercise on Lactate Transport Activity in Rat Skeletal Muscle Sarcolemmal Vsicules, *J Appl Physiol*, **1999**, 87:416-421.
117. **Roth DA, Brooks GA.** Training Does Not Affect Zero-Trans Lactate Transport Across Mixed Rat Skeletal Muscle Sarcolemmal Vesicles, *J Appl Physiol*, **1993** , 75:1559-1565.
118. **Pilegaard H, Domino K, Noland T, Juel C, Hellsten Y, Halestrap AP, Bangsbo J.** Effect of High-Intensity Exercise Training on Lactate/H⁺ Transport Capacity in Human Skeletal Muscle, *Am J Physiol*, **1999**, 276(Endocrinol Metab 39); 255-261.
119. **McDermott JC, Bonen A.** Endurance Training Increases Skeletal Muscle Lactate Transport, *Acta Physiol Scand*, **1993**, 147:323-327.
120. **Pilegaard H, Juel C, Wibrand F.** Lactate Transport Studied in Sarcolemmal Giant Vesicles From Rats: Effects of Training, *Am J Physiol Endocrinol Metab*, **1993**, 264:156-160.
121. **Baker SK, McCullagh KJ, Bonen A.** Training Intensity- Dependent and Tissue-Specific Increases in Lactate Uptake and MCT-1 in Heart and Muscle, *J Appl Physiol*, **1998** , 84:987-994.
122. **McCullagh KJ, Poole RC, Halestrap AP, O'Brien M, Bonen A.** Role of The Lactate Transporter (MCT1) in Skeletal Muscles, *Am J Physiol Endocrinol Metab*, **1996**, 271:143-150.

123. McKenna MJ, Heigenhauser GJ, McKelvie RS, Obminski G, McDougall JD, Jones NL. Enhanced Pulmonary and Active Skeletal Muscle Gas Exchange During Intense Exercise After Sprint Training in Men, *J Physiol(London)*, 1997, 501:703-716.

124. Pilegaard H, Domino K, Noland T, Juel C, Hellsten Y, Halestrap A, Bangbo J. Effect of High Intensity Exercise Training on Lactate/H⁺ Transport Capacity in Human Skeletal Muscle, *Am J Physiol Endocrinol Metab* ,1999, 276:255-261. s1 de 32

125. Gregory CM, Bickel CS. Recruitment Patterns in Human Skeletal Muscle During Electrical Stimulation, *Physical Therapy*, 2005, 85: 358-364.

126. Mathur S, Eng JJ, MacIntyre DL. Reliability of Surface EMG During Sustained Contractions of The Quadriceps, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2005, 15; 102-110.

127. Thorlund JB, Michalsik LB, Madsen K, Aagard P. Acute Fatigue-Induced Changes in Muscle Mechanical Properties and Neuromuscular Activity in Elite Handball Players Following a Handball Match, *Scandinavian Journal of Medicine&Science in Sports*, 2008, 18;462-472.

128. Bigland-Ritchie B, Johansson R, Lippold OC, Woods JJ. Contractile Speed and EMG Changes During Fatigue of Sustained Maximal Voluntary Contractions, *Journal of Neurophysiology*, 1983, 50(1):313-324.

129. Ravier P, Buttelli O, Jennane R, Couratier P. An EMG Fractal Indicator Having Different Sensitivities to Changes in Force and Muscle Fatigue During Voluntary Static Muscle Contractions, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2005, 15;210-221.

130. Linssen WH, Stegeman DF, Joosten EM, Hof MA, Binkhorst RA, Notermans SL. Variability and Interrelationships of Surface EMG Parameters During Local Muscle Fatigue, *Muscle&Nerve*, 1993, 16;849-856.

131. Štirn I, Jarm T, Strojnik V. Evaluation of The Mean Power Frequency of The EMG Signal Power Spectrum at Endurance Levels During Fatiguing Isometric Muscle Contractions, *Kinesiologica Slovenica*, 2008 , 14(1):28-38.

132. **Crenshaw AG, Karlsson S, Gerdle B, Friden J.** Differential Responses in Intramuscular Pressure and EMG Fatigue Indicators During Low-vs.High-Level Isometric Contractions to Fatigue,*Acta Physiol Scand*, **1997**, 160;353-361.

133. **Gibson ST, Noakes TD.** Evidence for Complex System Integration and Dynamic Neural Regulation of Skeletal Muscle Recruitment During Exercise in Humans,*Br J Sports Med*, **2004**, 38: 797-806.

134. **MacIntyre DL, Slawnych MP, Reid WD, McKenzie DC.** Fatigue of The Knee Extensor Muscle Following Eccentric Exercise, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, **1998**, 38:3-9.

135. **Spriet LL, Söderlund K, Bergström M, Hultman E.** Anaerobic Energy Release in Skeletal Muscle During Electrical Stimulation in Men, *J Appl Physiol*, **1987**, 62(2): 611-615.

136. **McLoda TA, Carmarck JA.** Optimal Burst Duration a Facilitated Quadriceps Femoris Contraction, *Journal of Athletic Training*, **2000**, 35(2):145-150.

137. **Parker MG, Keller L, Evenson J.** Torque Responses in Human Quadriceps to Burst-Modulated Alternating Current at 3 Carrier Frequencies, *Journal of Orthopedic Sports Physical Therapy*,**2005**,35(4):239-245.

138. **Slade JM, Bickel CS, Warren GL, Dudley GA.** Variable Frequency Trains Enhance Torque Independent of Stimulation Amplitude, *Acta Physiol Scand*, **2003**,177:87-92.

139. **Blinder –Macleod SA, Guerin T.** Preservation of Force Output Through Progressive Reduction of Stimulation Frequency in Human Quadriceps Femoris Muscle, *Physical Therapy*, **1990**, 70(10):619-625.

140. **Macleod SA, McDermond LR.** Changes in The Force-Frequency Relationship of The Human Quadriceps Femoris Muscle Following Electrically and Voluntary Induced Fatigue, *Physical Therapy*, **1992**, 72(2):95-104.

141. **Lieber RL, Kelly MJ.** Factors Influencing Quadriceps Femoris Muscle Torque Using Transcutaneous Neuromuscular Electrical Stimulation, *Physical Therapy*, **1991**, 71(10):715-721.

142. **Hamada T, Hayashi T, Kimura T, Nakao K, Moritani T.** Electrical Stimulation of Human Lower Extremities Enhances Energy Consumption, Carbonhydrate Oxidation and Whole Body Glucose Uptake, *J Appl Physiol*, **2004**, 96:911-916.

143. **Yoon T, De-Lap BS, Griffith EE, Hunter SK.** Age-Related Muscle Fatigue After a Low-Force Fatiguing Contraction is Explained by Cnetral Fatigue, *Muscle Neve*, **2008**, 37:457-466.

144. **Bergström M, Hultman E.** Energy Cost and Fatigue During Intermittent Electrical Stimulation of Human Skeletal Muscle, *J Appl Physiol*, **1988** , 65(4):1500-1505.

145. **Binder-Macleod SA, Synder-Mackler LS.** Muscle Fatigue: Clinical Implications for Fatigue Assesment and Neuromuscular Electrical Stimulation, *Phys Ther*, **1993**, 73:902-910.

146. **Sinacore DR, Delitto A, King DS, Rose SJ.** Type II Fiber Activation With Electrical Stimulation:A Preliminary Report, *Phys Ther*, **1990** , 70:416-422.

147. **Greenhaff PL, Soderlund K, Ren JM, Hultman E.** Energy Metabolism in Single Human Muscle Fibers During Intermittent Contraction With Occluded Circulation, *J Physiol*, **1993**, 460:443-453.

148. **Kramer JF.** Effect of Electrical Stimulation Current Frequencies on Isometric Knee Extension Torque, *Phys Therp*, **1987** ,67(1):31-38.

149. **Sinacore DR, Jacobson RB, Delitto A.** Quadriceps Femoris Muscle Resistance to Fatigue Using an Electrically Elicited Fatigue Test Following Intense Endurance Exercise Training, *Phys Therp*, **1994** ,74(10):38-50.

- 150. Jarek M, Antonio C, Prit P, Sergio R, Jaak J and Toivo J.** Electromyographic and Neuromuscular Fatigue Thresholds as Concepts of Fatigue. *Journal of Strength and Conditioning Research*,**2006**;20(4):824-828.
- 151. Fowler WM, Chowdhury SR, Pearson CM, Gardner G, Bratton R.** Changes in Serum Enzyme Levels After Exercise in Trained and Untrained Subjects, *J Appl Physiol*,**1962**, 17(6):943-946.
- 152. Raven PB, Connors TC, Evonuk E.** Effects of Exercise on Plasma Lactic Dehydrogenase Isozymes and Catecholamines, *Jour Appl Physiol*,**1970**, 29(3):374-377.
- 153. Morton RH, Carter MR.** Elevated Serum Enzyme Activity: An Explanation-Based Model, *J Appl Physiol*,**1992**, 73(5):2192-2200.

ÖZGEÇMİŞ

04.02.1979 tarihinde Konya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini aynı şehirde tamamladı. 2001 yılında Selçuk Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu’ndan mezun oldu. 2004 yılında Selçuk Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Anabilim dalında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2004 tarihinde doktora eğitimine Çukurova Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Beden Eğitimi ve Spor Anabilim Dalında başladı.

SPORCULARI BİLGİLENDİRME ve OLUR (RIZA) FORMU

Bu araştırmanın amacı yorgunluğun santral ve periferik kaynaklı bileşenlerini incelemek ve yorgunluk sürecinin anaerobik antrenmanlardan sonraki değişimini araştırmaktır.

Çalışmanın antrenmandan önceki bölümünde sporcuların performanslarının belirlenmesi için bazı testler uygulanacaktır. Maksimum oksijen tüketimlerinin belirleneceği test Quark b² ile gerçekleştirilecek olup, koşu bandının hızı 1 dk lık aralıklarla denekler tükeninceye kadar artırılacaktır. Bu test sırasında kalp atım hızı da kaydedilecektir. 30 m sprint derecesi ve maksimal izometrik kas kuvveti de diğer performans kriterleridir. Kasın birey tarafından ne kadar aktive edilebildiğinin gözlemlenmesi amacı ile hem dinlenme halinde ve hem de maksimal kasılma sırasında quadriceps kasına dışarıdan elektirsel uyarı verilerek kuvvet değerleri kaydedilecektir.

Yorgunluk testi olarak da bisikletle 60 W ile başlayan ve her dakika 10 W artan yüklemeler uygulanacaktır. Yüklemeler 3'erli paketler halinde 3 dk dinlenme aralıkları ile uygulanacaktır. Dinlenme aralarında kulak memesinden kılcal kan örneği alınarak kan Laktat değeri ölçülecek ve 10 san maksimal kas kuvveti alınacaktır. Bu yorgunluk testi denekler tamamen tükeninceye kadar devam edecektir.

1 hafta aranın bitiminde denekler sprint antrenman programına başlayacaktır. Antrenmanlar 5 hafta süresince ve haftada 3 gün olarak uygulanacaktır. Antrenmanın şiddeti her hafta artırılacaktır. Antrenmanların bitiminde antrenman öncesi ölçümler ve yorgunluk testi tekrarlanacaktır.

Yukarda çalışma ile ilgili verilmesi gereken bilgileri gösteren metni okudum. Çalışmanın nasıl yapılacağı hakkında bana yazılı ve sözlü açıklamalar yapıldı. Söz konusu çalışmaya katılmayı kabul ediyorum.

Tarih :.....

Gönüllü Sporcunun Adı Soyadı:.....İmzası:.....

Adresi :.....

Ev Telefonu:.....

Cep Telefonu:.....

Açıklamaları Yapan Araştırmacının Adı Soyadı:.....İmzası:.....