

Direnç Antrenmanı Fizyolojik Yanıtları ve Kuvvet Gelişimi

 Celal GENÇOĞLU¹

Doç. Dr. - Dokuz Eylül Üniversitesi Necat Hepkon Spor Bilimleri Fakültesi – E-Posta:

celal.gencoglu@deu.edu.tr, Sorumlu Yazar

 Hikmet GÜMÜŞ²

Doç. Dr. - Dokuz Eylül Üniversitesi Necat Hepkon Spor Bilimleri Fakültesi – E-Posta:

hikmet.gumus@deu.edu.tr

ÖZET

Sportif performans için gerekli ana biyomotor yetilerden kuvvetin geliştirilmesi için antrenmanın fizyolojik mekanizmalarının anlaşılması kritik önem taşımaktadır. Bu nonsistemik derleme makalesi kuvvet antrenmanı sonrası akut fizyolojik etkileri ve uzun dönem adaptasyonlarını anlamak üzere mevcut bilimsel literatürü incelemeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, agonist ve sinerjist kaslarda aktivasyon artışı ve nöral inhibisyon mekanizmalarıyla birlikte antagonist kas koaktivasyonu direnç antrenmanına nöral adaptasyonlarla ilişkilendirilmiştir. Buna göre motor nöronların uyarım frekansı artışı, motor ünite senkronizasyonu ve ikili uyarım, golgi tendon organı aracılığıyla otojenik inhibisyon yine direnç antrenmanı ile kuvvet kazanımının altında yatan fizyolojik mekanizmalar olarak öne çıkmaktadır. Yüksek şiddetli direnç egzersizi sonrası testosteron ve büyüme hormonu (GH) konsantrasyonlarında artış olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, direnç antrenmanı hacminin, akut hormonal tepkilerin modülasyonunda önemli bir faktör olabileceği söylenebilir. Kuvvet antrenmanının kas dokusuyla yakın ilişkili bağ ve kemik doku üzerine kollajen seviyesi artışı ya da kemik mineral yoğunluğu artışı gibi yararlı etkileri olabileceği gösterilmiştir. Bu derlemede kuvvet performansını geliştirmek isteyen tüm paydaşlar için kuvvet antrenmanının fizyolojik temelini inceleyen bir Türkçe kaynak oluşturulması spor bilimleri lisans öğrencilerine, aktif antrenörlere ve spor profesyonellerine pratik uygulamaların etkilerini göstereceği ve faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Direnç antrenmanı, nöral adaptasyonlar, maksimal istemli kasılma, testosteron, endokrin yanıtlar

Physiological Responses to Resistance Training and Strength Development

ABSTRACT

It is critical to understand the physiological mechanisms of training to develop strength, one of the main biomotor abilities required for athletic performance. This nonsystematic review article aimed to review the existing scientific literature to understand the acute physiological effects and long-term adaptations after strength training. In this study, increased activation of agonist and synergist muscles and antagonist muscle coactivation along with neural inhibition mechanisms were associated with neural adaptations to resistance training. Accordingly, increasing the stimulation frequency of motor neurons, motor unit synchronization and dual stimulation, and autogenic inhibition through the Golgi tendon organ stand out as the physiological mechanisms underlying strength gain with resistance training. It appears that there is an increase in testosterone and growth hormone (GH) concentrations after high-intensity resistance exercise. Additionally, resistance training volume may be an important factor in the modulation of acute hormonal responses. It has been shown that strength training may have beneficial effects on connective and bone tissue, which are closely related to muscle tissue, such as increasing collagen levels or increasing bone mineral density. In this review, it is thought that creating a Turkish resource examining the physiological basis of strength training for all stakeholders who want to improve strength performance will show the effects of practical applications and be beneficial to sports science undergraduate students, active coaches and sports professionals.

Keywords: Resistance training, neural adaptations, maximal volunteer contraction, testosterone, endocrine responses

GİRİŞ

Sporda fiziksel performansı geliştirmek, kuvvet ve güç kazanımı yanında kassal dayanıklılık sağlamak için kuvvet antrenmanları geçmişten bu yana atletik performans fenomeninin önemli bir bileşeni olmuştur. Kuvvet antrenmanının, kas kütlelerini ve kemik yoğunluğunu artırmak, metabolizmayı hızlandırmak ya da yaralanma riskini azaltmak gibi olumlu etkiler sağladığı bilinmektedir. Son dönemde kuvvet antrenmanı etkilerini araştıran ve farklı antrenman metotlarını karşılaştıran çok sayıda bilimsel yayın literatüre eklenmektedir. Kuvvet performansı, kaslar ve sinir sisteminin ortak çalışmasının bir ürünüdür. Kuvvet performansında antrenmanla ortaya çıkan değişiklikler hem kasların hem de sinir sisteminin adaptasyonlarıyla gerçekleşmektedir (Judge ve Burke 2003; Santos ve ark. 2023).

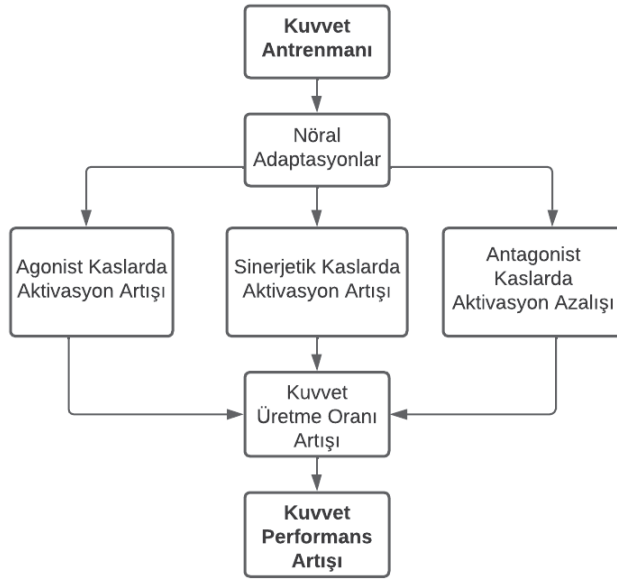
Spor bilimleri alanında performans gelişiminde kritik rol oynayan kassal kuvvet gelişimi birçok bilimsel araştırmaya konu olmuş ve kuvvet üretimindeki gelişimin yanı sıra nöromusküler veya endokrin yanıtları gibi kuvvet antrenmanının temel fizyolojik etkileri incelenmiş ve bu antrenman türünün vücut üzerindeki adaptasyon mekanizmaları ortaya koyulmuştur. Bu sistematik olmayan derleme ile mevcut bilimsel literatür kuvvet antrenmanının fizyolojik temellerine odaklanmış ve kuvvet antrenmanına () adaptasyonlar, kuvvet antrenmanının bağ ve kemik dokuya etkileri ve kuvvet antrenman sonrası endokrin yanıtlar ve uyum başlıklarında literatürü ele almayı hedeflemiştir. Bu derlemede spor bilimleri alanı lisans öğrencileri ve aktif antrenörler ve spor profesyonellerinin temel alabileceği bir Türkçe kaynak oluşturulması amaçlanmıştır.

Kuvvet Antrenmanına Nöral Adaptasyon

Direnç antrenmanlarıyla elde edilen kuvvet artışının altında yatan mekanizmalar literatürde çoğunlukla kas kütlelerinin rolüne atıf yapsa da kas kasılma özelliklerinde ve kas mimarisinde oluşan değişimler de kuvvet kazanımını etkileyebilmektedir. Ancak, kas kuvveti için kas kütlelerinin önemi tartışılmaz. Ayrıca, sinirsel faktörlerin kas kuvveti kazanımlarında önemli bir rolü olduğunu biliyoruz (Carroll ve ark. 2001). Bu bölümde, kuvvet antrenmanı sonrasında oluşan nöral adaptasyonlar ele alınmıştır. Bu nöral faktörlerin rolü, özellikle kuvvet antrenmanının ilk aşamasında güçlüdür. Protein sentezi, tek bir kuvvet antrenmanı seansından sonra fark edilebilir olmasına rağmen, egzersiz antrenmanının sekizinci haftasına kadar kas hipertrofisinde belirgin değişiklikler gözlenmez. Diğer bir deyişle kasta fizyolojik kesitsel alan artışı için en az sekiz hafta gereklidir. Hipertrofiye bağlı olmayan ilk sekiz haftadaki yüzeysel

elektromiyografi amplitüt artışları, nöral sistemdeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Santos ve ark. 2023; Judge ve ark. 2003; Gabriel ve ark. 2006).

Bir kuvvet antrenmanı sonrasında kasal ve nöral adaptasyonları Maksimal İstemli Kasılma (MVC) ve elektriksel uyarılmış tetanus sırasında kaydedilen kuvvet kazanımı ile açıklanabilir. Artmış agonist aktivasyonuna ilişkin kanıtların çoğu, EMG çalışmalarında elde edilir. EMG kasın elektriksel aktivitesini (aksiyon potansiyeli) ölçen ve kaydeden bir metottür. EMG işe katılan motor ünite sayısını ve uyarım frekansını belirlemede kullanılır. Eğer EMG sinyallerinde artış varsa bu motor ünite aktivasyonunda artış olduğu anlamına gelir. Bu da nöral adaptasyonu gösterir. İki EMG türü vardır: Yüzeysel EMG (sEMG) ve Kas İçi EMG (iEMG). Yüzey EMG ile kasın MÜ aktivasyonundaki artışın, işe katılan Motor Ünite (MÜ) sayısındaki artışa mı bağlı olduğu yoksa uyarım frekansındaki artışa mı bağlı olduğu belirlenemez. Kuvvet antrenmanı ile performans artışı elde edilmesinin altında yatan sinir sistemi etkileri temelde hareketi gerçekleştiren birincil kasların (agonist) aktivasyon artışı, harekete yardımcı kasların (sinerjetik) aktivasyon artışı ve antagonist kasların koaktivasyonunda azalma halinde özetlenebilir (Şekil 1).



Şekil 1. Kuvvet antrenmanı ile elde edilen kuvvet performans artışında nöral adaptasyonlar

Agonist Kaslarda Aktivasyon Artışı

Direnç antrenmanları sonrası elde edilen kazanımlar içinde en iyi bilinen nöral adaptasyon mekanizması, birincil kasların aktivasyon artışıdır. Bu süreçte motor ünitelerin işe katılımı ve motor ünite uyarım frekansı artışı nöral uyum mekanizmasından sorumlu katkı

sağlayan etkenler olarak sıralanabilir. Henneman boyut prensibi'nden de açıkça bildiğimiz gibi direnç antrenmanı ile yüksek eşikli motor ünitelerin işe katılımı artmaktadır. Yüksek eşikli büyük motor ünitelerin işe katılımı çok sayıda kas lifi inerve etmeleri nedeniyle önemlidir (Tablo1). Buna Triceps brachii kasındaki tüm motor ünitelerin %5'inin Tip II b olması ancak bu az sayıdaki motor üniteye bağlı kas liflerinin toplam kas liflerinin %20'sini oluşturması örnek verilebilir (Komi 2008; Suetta ve ark. 2004).

Tablo 1. Kas Fibril Tipleri ve belirgin özellikleri (Wilmore ve ark., 2004)

	Tip I	Tip II a	Tip II b
Motor ünitedeki kas lifi sayısı	10-180	300-800	300-800
Motor nöron büyüklüğü	Küçük	Büyük	Büyük
Sinir iletim hızı	Yavaş	Hızlı	Hızlı
Kasılma hızı (ms)	110	50	50

Ayrıca direnç antrenmanı ile motor nöronların uyarım frekansı da artar ve bu artışla birlikte agonist kas aktivasyonu da artar. Düşük eşikli motor ünitelerin uyarım frekansı ortalama 20-30 Hz, yüksek eşikli motor ünitelerin uyarım frekansı ise 60-100 Hz olarak bildirilmiştir. Kuvvet ve motor ünite ateşleme hızı arasındaki ilişki net olmamakla birlikte, kuvvet antrenmanı başlangıcında kas kuvvetindeki hızlı artışı açıklayabilecek olası bir faktör motor ünite ateşleme hızı olarak görülmektedir. Motor nöronda uyarım frekansı artışı (kuvvet-frekans ilişkisi) sonucu kasal güç üretimi yaklaşık 10 kat artış gösterebilir (Gabriel ve ark. 2006; Komi 2008).

Kuvvet antrenmanı ile, motor ünite uyarım frekansı birim zamanda daha yükseğe ulaşır ya da daha yüksekten başlar. Balistik (hızlı kasılmalar) çalışmalar ile, uyarım frekansı daha kısa sürede maksimuma çıkacağından, kasın kasılma hızı artar. Literatürde altı haftalık kuvvet antrenman girişimi ile vastus lateralis kası uyarım frekansı gençlerde %15 ve yaşlılarda %49 artmıştır (Knight ve Kamen 2001). Maksimal İstemli Kasılmanın %50'si altındaki şiddetlerde uygulanan egzersizler uyarım frekansında artışa yol açmazken, MVC %50 ve üzeri şiddette yapılan kuvvet egzersizlerinde uyarım frekansının arttığı gösterilmiştir (Rich ve Cafarelli 2000).

Uyarım frekansındaki artışın daha çok güç üretimini etkileyecek bir sonuca yol açtığı söylenebilir. Araştırmalara göre uyarım frekans artışı maksimal kuvvet üretiminden çok maksimal güç üretimine fayda sağlamaktadır (Edwards, 2017). Örneğin, 100 Hz'lik uyarılarla güç üretiminde anlamlı artış belirlenirken, maksimal izokinetik kuvvet üretiminde 50 Hz ve 100 Hz frekanstaki uyarımlar arasında anlamlı fark bulunmadığı gösterilmiştir (Gabriel 2006).

Sinerjist Kaslarda Aktivasyon Artışı

Agonsit kasın hareketini destekleyen kaslara sinerjist kaslar denmektedir. Sinerjist kaslar hareketi doğrudan ya da fiksator olarak destekleyebilir. Geçmiş çalışma bulguları, kuvvet antrenmanı sonrasında eksantrik, konsantrik ve statik kasılmalar sırasında sinerjist kasların sEMG aktivitelerinin arttığını ortaya koymuştur.

Kuvvet artışına yol açabilecek başka bir motor ünite aktivasyon modeli, “senkronizasyon” olarak adlandırılan çok sayıda motor ünitenin aynı anda aktivasyonunu içerir. Motor ünite aktivasyon modelinin, aktifleşen motor ünite sayısı veya frekans kadar, kassal güç çıktısı artışında önemli etkisi olabileceğine dair bazı kanıtlar vardır. Motor Ünite Senkronizasyonu basitçe motor ünitelerin eş zamanlı olarak (aynı anda) ateşlenmeleridir. Motor ünite senkronizasyonu bulguları tartışmalı olmasına rağmen, kas kuvveti artışının nöral mekanizmalarından biri sayılmaktadır. Halter sporcularında kontrol grubuna göre daha yüksek senkronizasyon oranı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca motor üniteler arasındaki senkronizasyon kuvvet antrenmanı ile artmaktadır. Senkronizasyonun hangi mekanizma ile maksimal kuvveti artırdığını açıklamak zor olsa da bu mekanizmanın gerim üretme oranındaki artışla ilişkili olması muhtemeldir. Kasta aynı tipteki motor üniteler arasında senkronizasyon olduğuna dair bulgular vardır (Moritani 2003).

Literatürde, kuvvet antrenmanı ile motor nöron havuzundaki sinaptik etkinliğin arttığı gösterilmiş ve motor ünitelerin senkron ateşlenme eğilimlerinin arttığı bildirilmiştir. Çoğunlukla intramüsküler EMG kayıtlarında görüldüğü üzere kimi aktivitelerde motor ünite ikili ateşleme yapar. Genel olarak 2,5-20 ms aralığıyla oluşan iki ardışık uyarımları ifade eder ve bu mekanizmaya ikili uyarım (ikili deşarj) denir. Bu tür ikili uyarımlar kademeli artış ya da sürekli submaksimal yükler sırasında oluşmaktadır. Ancak, ikili uyarımı objektif olarak tespit etmek oldukça zordur. Bu sebeple 5ms'ye eşit ya da daha az sürede oluşan uyarımlar ikili uyarım kabul edilmektedir. Antrenman öncesinde EMG kaydında motor ünitelerde sadece %5,2 ikili uyarım görülmüştür. Antrenmanlı kaslarda motor ünitelerin %32,7'sinde 2-5ms ateşleme aralığıyla uyarıma başladıkları kaydedilmiştir. Antrenman kişilerde iskelet kaslarında maksimal gerim üretme oranına ulaşabilmek için motor ünite ateşleme oranı optimal seviyeye çıkamamaktadır. Bunu açıklar şekilde tetanus şeklindeki kasılmalar sırasında maksimal gerim üretme oranı 200-250 Hz elektriksel uyarım frekansında gerçekleştiği gösterilmiştir. Bu nedenle dinamik kuvvet antrenmanı sonrasında erken motor ünite aktivasyonu ve artmış maksimal ateşleme oranı istemli kasılma hızındaki artışla ilişkili olabilir (Moritani 2003).

Nöral İnhibisyon Mekanizmaları ve Antagonist Kas Koaktivasyon

Nöromuskular sistemdeki inhibitör mekanizmalar (örn: golgi tendon organı) kas, kemik ve tendon üzerinde oluşan tolere etmenin mümkün olmadığı kadar yüksek gerimler oluşmasını engellemek için gereklidir. Bu refleks otojenik inhibisyon olarak diğer bir deyişle antagonisit kasların koaktivasyonu olarak bilinmektedir. Otojenik inhibisyon, eklem hareket açıklığının sonlarına gelindiğinde eklemi korumak için gereklidir. Sekiz haftalık kuvvet antrenmanı sonunda, kuvvette anlamlı artışla birlikte koaktivasyonda anlamlı azalma bildirilmiştir (Carolan ve Cafarelli 1992). Kuvvet antrenmanı, otojenik inhibisyonun & antagonisit kas koaktivasyon azaldığına ya da ortadan kalktığına dair bulgular mevcuttur. Kuvvet üretimini sınırlayan bu faktör ortadan kalkınca, daha yüksek kuvvet üretimi mümkün olabilir. Azalmış antagonist koaktivasyonu, agonist kasa daha fazla tork sağladığı için, olumlu gibi görünse de eklem stabilizasyonunun azalması eklem sağlığı açısından riskli olabilir.

Kuvvet Antrenmanının Bağ ve Kemik Dokuya Etkileri

Bağ Doku Etkileri

Tendonlar ve ligamentlerin de dahil olduğu önemli miktarlarda bağ doku kasın içinde ve çevresinde bulunmaktadır. Bağ doku primer olarak kasın yapısal bütünlüğünü korumakla görevli olmakla birlikte kasların ürettiği kuvveti kemiğe ileterek hareketin oluşmasında da rol sahibidir. Bağ dokuda oluşan egzersiz ve antrenman sonrası adaptasyonlar bir takım morfolojik ve biyokimyasal değişikliklerle gerçekleşmektedir (Stone ve Karatzaferi 2003).

Biyokimyasal Değişiklikler

Egzersiz, özellikle de şiddetli eksantrik egzersiz kas ve bağ dokuya büyük bir yük bindirmektedir. Gecikmiş kas yorgunluğu oluşturan eksantrik egzersizler, serum hidroksprolin konsantrasyonunun artışıyla doğru orantılıdır. Çalışmalar sıçan kasının zorlanarak esnetilmesi sonucunda belirgin bir yapısal hasar oluştuğunu göstermektedir. Bu girişimi takip eden beş gün içinde proteoglikan lokalizasyonu artmaktadır. Bu da hasarlanan bağ dokunun yenilenmesine işaret olarak kabul edilmektedir. Aslında tekrarlanan şiddetli kasılmalar hasarlanma ve yenilenme göstergelerinin artışıyla sonuçlanır. Örneğin, uzun süreli dayanıklılık egzersizi tip III kolajenin sentezinde kullanılan enzimin artışı tetiklemektedir. Tendon ve ligamentler üzerinde antrenmanın etkisini araştıran pek çok çalışma, dayanıklılık antrenmanlarını ve hayvan modellerini konu almıştır. Geçmiş araştırma sonuçları, dayanıklılık antrenmanı ile genç sıçanlarda bağ dokudaki hücrelerin çekirdek sayısının ve tendon ağırlığının arttığını

göstermiştir. Ancak, aynı etkinin yetişkin sıçanlarda görülmediği belirtilmektedir. Cinsiyetler arası fark olduğu ise dayanıklılık antrenmanı ile erkek sıçanlarda ligament ağırlığı artışı olmasına rağmen, dişi sıçanlarda değişim olmamasıyla gösterilmiştir. Deney hayvanlarında uygulanan dayanıklılık antrenmanı sonrasında tendonda aerobik enzim aktivitesi ve kolajen sentez hızı artışı rapor edilmiştir. Buna paralel olarak, genç horozlarda 8- hafta dayanıklılık antrenmanı uygulanmasıyla aşil tendonu kollajen miktarında %46'lık artış gerçekleştiği gösterilmiş ancak DNA ve tendon ağırlığında bu antrenman girişiminin etkisi olmadığı rapor edilmiştir. Ayrıca, antrene horozların kontrol grubuna göre %50 daha az piridinolin konsantrasyonuna sahip oldukları gösterilmiştir. Bu çalışma sonucunda antrenmanın daha fazla matriks-kollajen değişimi olabileceği, tendon kollajeninde gelişimin yavaşlamasına yol açabileceği ve azalmış tendon sertliğine neden olabileceği anlaşılmaktadır. Literatürde (Babraj ve ark. 2005), erkek ve kadınlar arasındaki kollajen sentez farkını in-vivo yöntemle işaretlenmiş prolin aminoasitini spektrometre analizi yapılmıştır. Araştırma bulguları, dinlenimde ve tek bacak vuruş egzersizinden 72-saat sonrasında, kollajenin dinlenme sentez hızının kadınlarda düşük ölçülürken, erkeklerin egzersize anlamlı olarak daha hızlı kollajen sentezi yanıtı verdikleri belirlenmiştir (Zernicke & Loitz-Ramage 2003)

Araştırma sonucunda ulaşılan diğer bir bulgu, menstrüel dönem başındaki kadınların kollajen sentez hızlarında artış eğilimi olduğudur. Bu sonucu hormon seviyesinin egzersiz sonrası bağ doku yanıtını etkilediği anlaşılmaktadır. Benzer yönde sonuçlara ulaşan Magnusson ve ark. (2003) menopoz sonrası kadınların, genç kadınlara göre aşil tendonunda daha geniş çapraz kesit alanına sahip olduklarını belirlemiştir. Altında yatan fizyolojik mekanizmanın estradiol kaynaklı azalmış inhibitör etkisi işaret edilmiştir.

Mekanik Değişiklikler

Uzun süreli egzersiz tendon kalınlığında artışla sonuçlanmaktadır (Magnusson 2007). Yapılan bir çalışmada 5 yıldır düzenli olarak koşan (haftada 50 km) erkeklerin, patellar tendon çapraz kesit alanının sedanter gruba göre anlamlı olarak daha geniş olduğu bildirilmiştir (Magnusson 2003). Magnusson ve arkadaşları, aktif ve sedanter kadınlar arasında patellar tendon kalınlığı bakımından anlamlı fark olmadığını bildirmişlerdir. Sakatlanmış tendon ve ligamentler egzersizle, dinlenimden daha hızlı biçimde eski durumlarına geri dönmektedir. Yetişkin hayvanların çoğunda, fleksör kaslar, ekstansör kaslardan daha güçlüdür. Domuz fleksör kas tendonlarındaki kolajen miktarı ekstansör kas tendonlarından daha fazla bulunmuştur. Antrenman ile domuz ekstansör kas tendonlarının kolajen içeriği artmakta ve

fleksörlerinkine yakın hale gelmektedir (Woo ve ark. 1981). Kas kuvvetindeki artış, tendondaki elastik enerji depolama kapasitesini ve maksimum gerilme kuvvetini etkilemektedir.

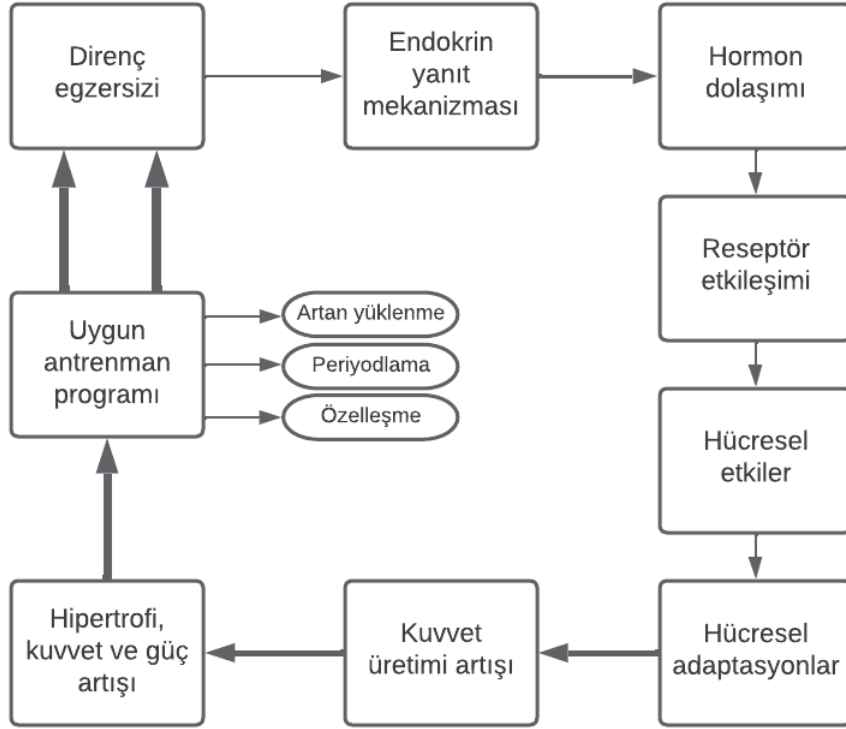
Kemik Doku Etkileri

Kemiğe yük uygulanmaması ve immobilizasyon, kemik yoğunluğunun ve kütlesinin azalmasına ayrıca, idrarla kalsiyum atılımında artışa neden olmaktadır. Düşük şiddetli egzersizler, immobilize kişilerde idrarla atılan kalsiyum miktarında azalma sağlamamaktadır. Üç saat ayakta durmak idrarla atılan kalsiyum miktarını azaltırken, tekerlekli sandalyede ya da yatarak yapılan egzersizler böyle bir etki yaratmamaktadır. Buna göre, kemik yoğunluğunu korumak için antigravite kaslarını çalıştırılmalıdır. Direnç antrenmanının, yer çekimine karşı yapılması gerektiğini öne sürmektedir. Yaşlanmayla birlikte kemik doku kaybı artmaktadır. Osteoporoz süreci başlamadan önce kemik yoğunluğu ve kas kuvveti artırılabilirse, bu sürecin komplikasyonları en aza indirilebilir. Antrenmanın kemik dokuyu artırdığı pek çok çalışma ile kanıtlanmıştır (Tsuzuku 1998). Hem erkeklerde hem de kadınlarda, fiziksel aktivite düzeyi ile kemik doku yoğunluğu arasında pozitif korelasyon vardır. Çocukluktaki fiziksel aktivitenin, erişkinlikteki kemik kütlesini olumlu etkilediğine dair kanıtlar da bulunmaktadır. Egzersizin kemik yoğunluğunu artırdığına ilişkin en güçlü kanıtlar, sporcuların dominant ekstremitedeki kemik yoğunluğunun dominant olmayan ekstremiteye göre daha fazla olmasıdır. Elit tenis oyuncularının dominant kollarındaki humerus kemiğinin kütlesinin diğerine göre daha büyük olduğu ve mineral yoğunluğunun daha fazla olduğu bildirilmiştir. Direnç egzersizi ve pliometrik egzersiz gibi yüksek şiddetli aktivitelerin, yüklenilen bölgedeki kemik geometrisindeki değişim ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Notomi 2001). Alt ekstremitte kemik mineral yoğunluğu, yerel atletlerde sedanterlere göre, uluslararası atletlerde ise her iki gruba göre anlamlı olarak fazla bulunmuştur. Haltercilerin kemik yoğunluğu, futbol oyuncularına ve mesafe koşucularına göre daha fazla bulunmuştur. Yüzücüler değerlendirilen branşlar içinde en düşük kemik yoğunluğuna sahip gruptur (Stone ve Karatzaferi 2003).

Kuvvet Antrenman Sonrası Endokrin Yanıtlar ve Uyum

Direnç antrenmanları akut fizyolojik yanıtlara ve kassal dayanıklılık ve güç, hipertrofi, kuvvet gibi parametrelerde kritik artışlara neden olan kronik adaptasyonlara sebep olurlar. Nöroendokrin sistem akut egzersiz performansı artışı ve devamında doku yenilenmesinde önemli bir rol oynar. Kan hormon seviyesindeki akut artış (sekresyonun artışı, hepatik temizlenmenin, plazma hacminin ve degradasyon-yarılma hızının azalması gibi nedenlerle) hedef dokuda membran veya çekirdek/stoplazmik yerleşimdeki reseptörlerle ilişkilidir. Uygun

reseptör sayısı ve kan hormon konsantrasyonundaki artış bağlanma ve sonrasındaki hücresel değişimler için eş zamanlı olmalıdır (Wilmore 2004).



Şekil 2. Direnç egzersizi ve hormon yanıtlarıyla kuvvet artışı ilişkisi

Endokrin sistem antrenmanla oluşan kuvvet gelişiminde önemli bir yere sahiptir. Erken dönem kuvvet gelişiminde nöromusküler değişiklikler daha baskındır. Kuvvet antrenmanı ile sağlanan uyarım antrenmanın başlangıcından hipertrofiye yol açan protein sentezine kadar birçok süreç için hormonal sekresyonu başlatır (Şekil 2). Direnç antrenmanı ile salınımı uyarılan ve kas protein sentezinin artmasıyla ilişkili hormonlar testosteron, büyüme hormonu (hGH) ve Insulin-like growth factor-1 (IGF-1) olarak listelenmektedir (Kraemer ve ark. 2008; 2020).

Direnç egzersizi testosteron akut yanıtları

Kuvvet antrenmanının toplam testosteron konsantrasyonuna akut etkisi cinsiyetlere göre değişmekte; erkeklerde testosteron artışı ile sonuçlanırken genç kadınlarda değişmediği gösterilmiştir. Erkeklerde görülen toplam testosteron artışı plazma hacmi azalması, adrenerjik uyarım ve laktat konsantrasyon artışı mekanizmalarıyla düzenlenmektedir. Bunun yanında, testislerde testosteron sentezleme ve sekresyon kapasitesindeki potansiyel cevaplar da bu hormonun artışıyla ilişkili olabilir. Testosteronun anabolik süreçteki rolüne katkı veren IGF-1

ve GH gibi diğer hormon düzenleme mekanizmalarındaki artış gösterilebilir. Ancak, potansiyel olarak testosteron akut kuvvet çıktısı artışında başlıca faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Erkeklerde toplam serum testosteron konsantrasyonu ile diğer faktör arasındaki ilişki incelendiğinde, işe katılan kas kütlesi, seçili egzersiz, kapsam ve şiddet, beslenme ve antrenman geçmişi etkenleri farka yol açarken bireysel mutlak kas kuvveti toplam serum testosteron konsantrasyonunu etkilememektedir. Uygulanan direnç antrenmanına ait şiddet ve hacim parametrelerinin akut testosteron yanıtı için önemli bir etken olduğunu gösteren araştırma bulguları vardır (Kramaer ve ark. 2020). Buna göre bir dakika dinlenme aralığıyla 10TM şiddetine ve 3-set hacimde görülen testosteron artışı 10TM şiddet ve 1-set kapsam protokolüne göre daha fazladır. Benzer olarak, dört hareketten oluşan direnç egzersizlerinin 1TM'in %80 şiddetinde 3-set uygulanması (2 dakika dinlenme aralığıyla) serum testosteron seviyesinde anlamlı artışla sonuçlanmıştır. Dahası, farklı bir araştırmaya göre, 3-6TM'in %100 şiddetinde uygulanan direnç antrenman protokolü aynı kapsamda (3-6TM) %70 yük protokolüne göre girişimden 1-saat sonrasında daha yüksek testosteron artışına yol açtığı ortaya konmuştur. Bir başka araştırmada, squat hareketinde 4-set 6-tekrar ve 6TM'in %90-95 şiddetinde yüklenme protokolü ile 4-set 6-tekrar ancak 6TM'in %60 şiddetinde yüklenme protokolünde benzer testosteron artışı ölçülmüştür. Buna göre testosteron seviyesinde istenilen artış için belirli bir antrenman kapsamına ulaşmak gerekliliği gözde çarpılmaktadır (Komi 2008; Kraemer ve Ratamess 2005).

Akut testosteron yanıtını etkilediği bilinen bir diğer unsur ise besin destekleridir. Literatürde (Kraemer ve ark. 1985) protein-karbonhidrat desteği ile plasebo alan gruplarda 3-gün arka arkaya direnç antrenmanına endokrin yanıtları ölçmüş ve ilginç olarak plasebo grubunda besin desteği alan gruba göre daha çok testosteron artışı bulmuştur. Ancak, çalışma metodolojisine paralel olarak fazla kalori alımının yol açtığı dolaşım testosteron seviye azalması fizyolojik açıklama olabileceği belirtilmiştir. Ek olarak, besin desteğine rağmen daha az testosteron yanıtının sebebi androjen öncüllerinin kullanımının artmasına bağlı görülmüştür. Diğer bir araştırma bulgusu (Volek ve ark. 1997) protein ve karbonhidrat zengin ve düşük yağ miktarı içeren bir diyetin dolaşım testosteron konsantrasyonunu düşürdüğünü göstermiştir.

Direnç antrenmanında seçili egzersizlerde aktif kas kütlesi de toplam testosteronun akut cevabını etkilemektedir. Daha geniş kas kütlelerine hitap eden olimpik kaldırış ve deadlift egzersizleri sonrasında testosteron seviyesinde anlamlı artış sağlandığı gösterilmiştir (Judge ve Burke 2003). En basit haliyle, daha fazla kas kütlelerini aktif kullanmayı sağlayan egzersizler metabolik stres açısından daha büyük bir potansiyeldir. Güçlü bir metabolik stres testosteron

salınımının yükselmesine yardımcı olabilir. Araştırma bulguları, tüm vücut katılımının olduğu skuat sıçrama egzersizinin daha kısıtlı bir kas kütleini çalıştıran bench pres egzersizine göre testosteron konsantrasyonu artışını daha fazla tetiklediğini (yaklaşık Skuat %15 ve bench pres %7) göstermiştir (Kraemer ve Ratamess, 2005).

Son olarak akut testosteron yanıtına etki eden bir diğer faktör antrenman geçmişiştir. Direnç antrenmanı yapan gruplar karşılaştırıldığında üniversiteye giden yaş grubu erkeklerde lise yaş grubu erkeklere göre daha yüksek testosteron yanıtı bulunmuştur. Buna göre, Kraemer ve ark. (1992) 2 yıl tecrübeli küçük haltercilerde tecrübesizlere göre daha çok akut testosteron artışı bulmuşlardır. Kraemer ve ark. (1998) antrenmansız erkeklerde 8 haftalık direnç antrenmanı programının 6. haftasına kadar akut artış bulamamışlardır. Craig ve ark. (1989) 12 haftalık direnç antrenman programında akut testosteron cevabının değişmediğini göstermiştir.

Dinlenim testosteron konsantrasyonunda kronik değişimler

Direnç antrenmanı sırasında dinlenim testosteron konsantrasyonunda değişim çelişkilidir. Ergenlik dönemi ve öncesi erkeklerde önemli artışlar bildirilmesine rağmen kuvvet yönünden antrene erkek ve kadınlarda dinlenim testosteron konsantrasyonunda tutarlı bir değişim ya da artış görülmemiştir. Dinlenim konsantrasyonu antrenman hacim ve şiddetine bağlı olarak azalıp artabilen kas dokusunun durumu -kuvvet yönünden antrene bireyleri- yanstımadır.

Bazı çalışmalarda dinlenim konsantrasyonu artmış olarak bildirilse de bazı çalışmalarda fark görülmemiştir. İlginç olarak serbest ve toplam testosteron kuvvet üretimiyle yüksek korelasyon göstermiştir ($r=0.81-0.83$). Ancak, sıçanlarda 16 gün yüklenme sonrası testosteron konsantrasyonu kas kütleisiyle yüksek korele bulunmamıştır. Araştırma bulguları 9-12 hafta direnç antrenmanı sırasında dinlenim testosteron konsantrasyonunda değişim olmadığını bildirmişlerdir (Hickson ve ark. 1994; McCall ve ark. 1999). 8 haftalık antrenman programının 4. haftasında testosteron konsantrasyonunda yükselme ve tip 2 fibrillerdeki değişimle dinlenim testosteronu arasında ilişki bulunmuştur. Ayrıca, elit haltercilerde 2 yılın üzerindeki bir periyotta dinlenim testosteronunda artış rapor edilmiş ancak 1 yıl zarfında bu artış gözlenmemiştir. 8 haftalık direnç antrenmanı sonrası veteran sprinterlerde testosteron hormon yanıtı değişmemiştir. Erkek ve kadın sporcularda 24 haftanın üzerindeki antrenman periyodunun dinlenim serum testosteron konsantrasyonunu anlamlı olarak değiştirmediği de hormon yanıtları araştırmalarında gösterilmiştir. Kadınlarda 3-16 haftalık kuvvet ve güç antrenmanları sırasında değişim tespit edilememiştir. Ancak bazı araştırma bulguları dinlenim serum testosteronunda 6 aylık tek setli antrenman programına göre 6 aylık yüksek hacimli, çok

setli antrenmanda daha büyük bir yükselme yanıtı olduğunu bildirmiştir (McCall ve ark. 1999; Kraemer ve Ratamess 2005; Kraemer ve ark. 2008).

Direnç antrenmanına uzun dönem endokrin adaptasyonun önemi androjen reseptörü sayısı (up-regülasyon, down-regülasyon) ve biyolojik aktif serbest testosteronla potansiyel birleşmesi olabilir. Çok az sayıda çalışma reseptör seviyesindeki değişimi araştırmıştır. Sıçanlarda direnç antrenmanının androjen reseptörlerini up-regüle ettiği görülmüştür. Ek olarak Deschenes ve ark. sıçanlarda direnç ve dayanıklılık egzersizlerine tip 1 ve tip 2 fibrillerinin farklı reseptör yanıtı verdiğini göstermiştir. Son dönemde Bamman ve ark. konsantrik ve eksantrik yüklenmeyi karşılaştırmışlar ve serum testosteron konsantrasyonunda artış olmaksızın androjen reseptör mRNA da eksantrik yüklenme sonrasında %63, konsantrik yüklenme sonrasında %102 artış bulmuşlardır. Bu sonuca göre dolaşımdaki hormonlarda anlamlı değişim olmadan hücresele seviyede pozitif bir adaptasyon olduğunu ortaya koymuştur. Kas hasarlanması androjen reseptör sayısını düzenlemede potansiyel etkiye sahip görünmektedir.

Büyüme hormonu ve Direnç antrenmanına akut yanıtı

İnsan büyüme hormonu (GH) ön hipofizden salınan peptid bir hormondur. GH direnç antrenmanı sırasında ve 30 dakika sonrasında seçilen egzersize, şiddete, hacime, setler arasındaki dinlenmeye ve karbonhidrat-protein desteğine bağlı; erkeklerde kas kuvvetinden bağımsız, kadınlarda bağımlı olarak artmaktadır. Akut direnç antrenmanı sırasında ve sonrasında arteriel ve venöz GH konsantrasyonu ölçümü iskelet kaslarında (quadriseps) GH alımının anlamlı olarak arttığını göstermiştir. Bu bilgiye göre GH direkt ya da dolaylı olarak IGF sistemini etkilemektedir.

Kan laktat konsantrasyonu ve serum GH konsantrasyonu arasında yüksek korelasyon olduğu görülmüştür. Hipoksi, nefes tutma, asid-baz değişimi ve protein katabolizması GH salınımını etkilemektedir. Buna göre direnç antrenmanının metabolik gereği GH konsantrasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Tüm direnç antrenmanları serum GH konsantrasyonlarını artırmaz, belirli bir şiddet-hacim eşiği geçilmelidir. Düşük yük çok tekrarlı çalışmada anlamlı GH artışı bulunmazken, aynı glikolitik protokol uygulanan direnç antrenmanlı kadınlarda antrenmansızlara göre daha çok akut artış bulmuşlardır. Ancak, antrene kadınlar daha fazla yük kaldırabilmişlerdir. Fazladan harcanan gücün etkisi olabilir. Yaşlılarda bir şekilde akut GH yanıtı düşüktür. GH cevabını sınırlayan en büyük etken harcama gücü

olabilir. Bu çalışma egzersize bağlı GH salınımı için maksimal efor hipotezini desteklemektedir (Kraemer ve ark. 2008; Kraemer ve Ratamess 2005).

Kortizol & Direnç antrenmanına akut etkileri

Glukokortikoidler egzersize cevap olarak adrenal korteksten salınırlar. Kortizol tüm glukokortikoid aktivitenin yaklaşık %95'ini kapsar. Kortizol tip 2 kas fibrillerine daha büyük olmak üzere katabolik bir etkiye sahiptir. Çalışmalarda erkek ve kadınlarda benzer olarak akut direnç antrenmanına kortizol ve adrenokortikotrofik hormonda (ACTH) anlamlı yükselik gösterdiği belirtilmiştir. Aynı protokolde sadece bir çalışmada erkeklerde kortizolde anlamlı artış varken kadınlarda olmadığını göstermiştir. Akut kortizol cevabı genç haltercilerde antrenman durumundan bağımsız gibi görünmektedir. Direnç antrenmanı sırasında akut kortizol salınımı artışı anabolik steroid kullananlarda azalabileceği rapor edilmiştir. İlginç olarak yüksek kortizol cevabı oluşturan çalışmalar aynı zamanda yüksek akut GH ve laktat cevabı da oluşturmuştur. Kan laktatı ve kortizol arasında anlamlı korelasyon ($r=0.64$) olduğu görülmüştür. Ek olarak serum kortizoldeki akut artışla egzersizden 24 saat sonraki CK konsantrasyonu arasında yüksek korelasyon ($r=0.84$) görülmüştür (Kraemer ve ark. 2008).

Dinlenim kortizol konsantrasyonunda kronik adaptasyonlar

Kortizol konsantrasyonunun genellikle uzun dönem antrenman stresini yansıttığı düşünülmektedir. Kronik direnç antrenmanı sabit bir kortizol salınım paterni üretmemektedir. Erkek ve kadınlarda normal ve over-reaching tip protokolde güç-kuvvet antrenmanı sırasında kortizol salınımı değiştirmemekte azaltmakta ve artırmakta olduğu çelişkili sonuçlar bildirilmiştir (Kraemer ve ark. 2008; 2020). Akut kortizol cevabı metabolik stresi yansıtırken, kronik adaptasyonprotein metabolizmasıyla ilgili doku homeostazisini göstermektedir. Testosteron/kortizol oranı (T/C) ve serbest testosteron/kortizol oranının direnç antrenmanı sırasında anabolik-katabolik durumun belirteci olduğu düşünülmektedir. Yani, testosteronda artış, kortizolde düşüş veya ikisi birlikte doku anabolizmini göstermektedir. Ancak bu açıklama oldukça basittir ve sadece iskelet kasının anabolik/katabolik niteliklerinin indirekt ölçümü içindir. Bazı çalışmalar T/C oranının kuvvet-güç antrenmanları sırasında değiştiğini ve bu oranın performansla pozitif korele olduğunu göstermiştir. Overreaching tipindeki antrenmanın elit haltercilerde T/C oranını düşürdüğü görülmüştür. Yüksek hacimli programlar tek setli düşük hacimli programlara göre T/C oranında daha büyük bir artış sağladığı gösterilmiştir (Kraemer ve ark. 2008; Kraemer ve Ratamess 2005).

Insulin-benzeri büyüme faktörü & direnç antrenmanına akut yanıtlar

GH'nun birçok aksiyonu insülin benzeri büyüme faktörü I ve II (IGF-I ve IGF-II) tarafından düzenlenir. IGF'ler GH uyarımıyla DNA sentezine yanıt olarak karaciğerden salınırlar. Direnç antrenmanına IGF-I in akut yanıtı belirsizdir. Çoğu çalışma direnç antrenmanı sırasında ya da hemen sonrasında IGF-I de değişim olmadığını gösterirken bazı çalışmalar direnç antrenmanı sırasında veya sonrasında akut artış olduğunu göstermiştir (Kraemer ve ark. 2008). Akut direnç antrenmanı dolaşımdaki IGF-I konsantrasyonunu artırır ya da artırmasın bağlanma proteinleri için affinitesini modifiye ederek aktivasyonunu etkilediği görülmektedir.

IGF-I kas hücrelerinde otokrin ve parakrin etkiye sahiptir. IGF-I in kastaki bu izoformu Mekanogrowth Faktör (MGF) olarak adlandırılır (Goldspink 1999). Direnç antrenmanı, mekanik hasar, aşırı yüklenilmiş kaslar tarafından üretildiği ve doku onarımını düzenlediği açıktır. Bamman ve ark. (2001) direnç antrenmanı sonrasında (kısmen eksantrik egzersiz) kas IGF-I mRNA sında anlamlı artış görmüşlerdir. Brahm ve ark. (1997) şiddetli egzersiz sırasında IGF-I arterial konsantrasyonlarını sabit kaldığını göstermiştir. Ancak venöz konsantrasyonu artmıştır. Bu da artmış konsantrasyonun büyük bir kısmının kaslardan salındığına işaret eder.

Araştırmacılar direnç antrenmanı sırasında serum IGF-I deki artışın hücre hasarı ve yüksek kan akımı sonucu oluştuğunu ve bu nedenle depo bölgelerden salındığını düşünmektedir. Daha çok çalışma yapılması gerekirken birlikte IGF-I in kas izoformunun doku onarımında açık bir rolü olduğu görülmektedir. Dahası, egzersiz öncesi mutlak IGF-I konsantrasyonu egzersiz stresine verilecek cevabı etkileyebilir (Kraemer ve ark. 2020).

İnsülin-benzeri büyüme faktörü & direnç antrenmanına kronik uyumlar

Kısa dönem direnç egzersizi sırasında karbonhidrat veya protein desteği kullanılmadığı zaman dinlenme IGF-I konsantrasyonunda değişim olmadığı görülmüştür. Ancak uzun dönem çalışmalarda kadınlarda dinlenme IGF-I de artış görülmüştür (yüksek hacim antrenmanlarda). Borst ve ark. (2001) 25 haftalık antrenman programının sadece 13 haftasında dinlenme serum IGF-I de anlamlı artış olduğunu göstermiştir. Bu artış tek set ve çok set çalışan gruplar arasında benzerdir ancak 3 set grubunda en yüksek kuvvet artışı görülmüştür. Marx ve ark. (2001) öncesinde antrenmansız kadınlarda 6 aylık antrenman sonrasında dinlenme serum IGF-I konsantrasyonunda anlamlı artış bildirmişlerdir. Ek olarak çok setli program kullanıldığında tek sete göre artışın etkisi daha büyük olmuştur. Buna göre antrenman hacim ve şiddeti IGF-I kronik adaptasyonları için önemlidir.

İnsülin

İnsülin yeterli amino asit konsantrasyonlarına ulaşılabilirdiği zaman kas protein sentezini anlamlı olarak etkilemektedir. Serum insülin konsantrasyonları kan şekere paralel değişmektedir. Akut bir direnç antrenmanı sırasında serum insülin konsantrasyonu muhtemelen insülin salınımının a-adrenerjik inhibisyonu nedeniyle azalır. Ek olarak, direnç egzersizleri karbonhidrat, protein veya kombine destek kullanılmadıkça insülin salınımını kan şekere konsantrasyonundan bağımsız direkt olarak etkilememektedir. Ayrıca direnç antrenmanları insülin hassasiyetini anlamlı olarak etkilememektedir. Potansiyel anabolik bir hormon olsa da insülin daha çok kan şekere konsantrasyonu ve diyetten etkilenmektedir (Kraemer ve ark. 2008).

Katoşelaminler

Katoşelaminler direnç egzersiz protokolünün akut ihtiyacını ve fiziksel stresi yansıtır. Katoşelaminler kuvvet üretim artışı, kas aktivite hızı ve enerji ulaşılabilirliği için önemlidir (örneğin testosteron artışı). Akut direnç antrenmanı epinefrin, norepinefrin ve dopamin plazma konsantrasyonlarını artırmıştır. Etki kas aktivite hızına, uyarılan kas mitarına, direnç antrenmanı hacmine ve dinlenme aralığına bağlı olabilir. Kuvvet ve güç üretiminin epinefrin ve norepinefrin cevabını anlamlı olarak etkilediğini göstermiştir. Ek olarak, daha şiddetli protokollerde (şiddetli ve kısa dinlenmeli) epinefrin ve norepinefrinde egzersizden 5 dakika sonrası gibi daha uzun süre yükselmeler görülmüştür. Sıklıkla vücut geliştirmecilerin kullandığı protokol Yüksek şiddetli kısa dinlenmeli (10-60 s) direnç antrenmanı egzersizi (10 hareket 3 set, 10TM) toparlanmanın 5 dakikasına doğru plazma epinefrin, norepinefrin ve dopamin seviyelerini artırmıştır. katoşelaminlerin direnç antrenmanına kronik adaptasyonları halen açık değildir. Direnç antrenmanına yanıt olarak katoşelaminlerin azaldığı düşünülmektedir (Kraemer ve ark. 2008).

β -Endorphin

Direnç antrenmanları sırasındaki rolü hakkında bilinenler çok azdır. Elit küçük haltercilerde halter çalışmasının 5 ve 15 dakikasında plazma b-endorfin konsantrasyonunda anlamlı artış görülmüştür. Akut artış çalışan kas kütlesi (çok eklemli hareketler), dinlenme süresi ve antrenman programının şiddet ve hacmiyle ilgilidir. Ayrıca kan laktat konsantrasyonu ile anlamlı korelasyon göstermiştir ($r=0.72-0.82$). Yine araştırmaya sonuçları göstermiştir ki, vücut geliştirme tipi (yüksek hacim, orta yük, kısa dinlenme) protokolün geleneksel kuvvet antrenmanına (yüksek yük, az tekrar, uzun dinlenme) göre plazma β -endorfin konsantrasyonunda daha fazla artışı sağlamaktadır. β -endorfin kortizol ve büyüme hormonuyla birlikte değişir. Bu da hipofiz-adrenal-kortikal axisin direnç antrenmanı sırasında önemli ölçüde

uyarıldığını göstermektedir. Direnç antrenmanı sırasındaki rolü açık olmasa da egzersize ya da zorlu bir direnç antrenmanına uyumda bazı yararları olabilir (Kraemer ve ark. 2008).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu derlemeyle kuvvet antrenmanı araştırmaları bulguları ele alınarak karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve direnç antrenmanları sonrası akut fizyolojik yanıtlar ve uzun dönem uyum mekanizmaları tartışılmıştır. Literatürdeki araştırma bulguları gerim üretme oranındaki artışta nöral adaptasyonun önemini ortaya koymuştur. Ek olarak, direnç antrenmanları kas kuvveti artışının yanında hipertrofi ve kas dokusu yapılanması için kritik önemdeki endokrin yanıtların gelişmesine olanak sağlayabilir. Antrenman yoğunluğu, kapsamı, sıklığı ve dinlenme oranı bu yanıtların oluşmasında önemli parametreler. Direnç egzersizlerine endokrin sistem uzun dönem uyumları oldukça kısıtlı görülmektedir.

KAYNAKLAR

Babraj, J. A., Cuthbertson, D. J., Smith, K., Langberg, H., Miller, B., Krosgaard, M. R., ... & Rennie, M. J. (2005). Collagen synthesis in human musculoskeletal tissues and skin. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 289(5), E864-E869.

Bamman, M. M., Shipp, J. R., Jiang, J., Gower, B. A., Hunter, G. R., Goodman, A., ... & Urban, R. J. (2001). Mechanical load increases muscle IGF-I and androgen receptor mRNA concentrations in humans. *American journal of physiology-endocrinology and metabolism*, 280(3), E383-E390.

Borst SE, De Hoyos DV, Garzarella L, et al. (2001). Effects of resistance training on insulin-like growth factor-I and IGF binding proteins. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(4), 648-653.

Brahm, H., Piehl-Aulin, K., Saltin, B., & Ljunghall, S. (1997). Net fluxes over working thigh of hormones, growth factors and biomarkers of bone metabolism during short lasting dynamic exercise. *Calcified tissue international*, 60, 175-180.

Carolan, B., & Cafarelli, E. (1992). Adaptations in coactivation after isometric resistance training. *Journal of applied physiology*, 73(3), 911-917.

Carroll, T. J., Riek, S., & Carson, R. G. (2001). Neural adaptations to resistance training. *Sports medicine*, 31(12), 829-840.

Craig, B. W., Brown, R., & Everhart, J. (1989). Effects of progressive resistance training on growth hormone and testosterone levels in young and elderly subjects. *Mechanisms of ageing and development*, 49(2), 159-169.

Edwards, F. (2017). *Textbook of Sports Medicine*. Publisher : Larsen and Keller Education.

Gabriel, D. A., Kamen, G., & Frost, G. (2006). Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices. *Sports medicine*, 36, 133-149.

Goldspink, G. (1999). Changes in muscle mass and phenotype and the expression of autocrine and systemic growth factors by muscle in response to stretch and overload. *Journal of anatomy*, 194(3), 323-334.

Hickson, R. C., Hidaka, K., Foster, C., Falduto, M. T., & Chatterton Jr, R. T. (1994). Successive time courses of strength development and steroid hormone responses to heavy-resistance training. *Journal of applied physiology*, 76(2), 663-670.

Judge, L., Moreau, C., & Burke, J. (2003). Neural adaptations with sport-specific resistance training in highly skilled athletes. *Journal of sports sciences*, 21(5), 419-427.

Knight, C. A., & Kamen, G. (2001). Adaptations in muscular activation of the knee extensor muscles with strength training in young and older adults. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11(6), 405-412.

Komi, P. (Ed.). (2008). *Strength and power in sport (Vol. 3)*. John Wiley & Sons.

Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2005). Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports medicine*, 35, 339-361.

Kraemer, W. J., Fry, A. C., Warren, B. J., Stone, M. H., Fleck, S. J., Kearney, J. T., ... & Gordon, S. E. (1992). Acute hormonal responses in elite junior weightlifters. *International journal of sports medicine*, 13(02), 103-109.

Kraemer, W. J., Noble, B., Culver, B., & Lewis, R. V. (1985). Changes in plasma proenkephalin peptide F and catecholamine levels during graded exercise in men. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 82(18), 6349-6351.

Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., Hatfield, D. L., & Vingren, J. L. (2008). The endocrinology of resistance exercise and training. *Essentials of sports nutrition and supplements*, 53-83.

Kraemer, W. J., Volek, J. S., Bush, J. A., Putukian, M., & Sebastianelli, W. J. (1998). Hormonal responses to consecutive days of heavy-resistance exercise with or without nutritional supplementation. *Journal of Applied Physiology*, 85(4), 1544-1555.

Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., Hymer, W. C., Nindl, B. C., & Fragala, M. S. (2020). Growth hormone (s), testosterone, insulin-like growth factors, and cortisol: roles and integration for cellular development and growth with exercise. *Frontiers in endocrinology*, 11, 33.

Magnusson, S. P., Hansen, M., Langberg, H., Miller, B., Haraldsson, B., Kjoeller Westh, E., ... & Kjær, M. (2007). The adaptability of tendon to loading differs in men and women. *International journal of experimental pathology*, 88(4), 237-240.

Magnusson, S. P., Hansen, P., & Kjaer, M. (2003). Tendon properties in relation to muscular activity and physical training. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 13(4), 211-223.

Marx JO, Ratamess NA, Nindl BC, et al. (2001). Low-volume circuit versus high-volume periodized resistance training in women. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(4), 635-643.

McCall, G.E., Byrnes, W.C., Fleck, S.J., Dickinson, A., & Kraemer, W.J. (1999). Acute and chronic hormonal responses to resistance training designed to promote muscle hypertrophy. *Canadian Journal of applied physiology*, 24 (1), 96-107.

Moritani, T. (2003). Motor unit and motoneurone excitability during explosive movement. *Strength and power in sport*, 27-49.

Notomi, T., Okimoto, N., Okazaki, Y., Tanaka, Y., Nakamura, T., & Suzuki, M. (2001). Effects of tower climbing exercise on bone mass, strength, and turnover in growing rats. *Journal of bone and mineral research*, 16(1), 166-174.

Rich, C. & Cafarelli, E. (2000). Submaximal motor unit firing rates after 8 wk of isometric resistance training. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(1), 190-196.

Santos, P. D., Vaz, J. R., Correia, J., Neto, T., & Pezarat-Correia, P. (2023). Long-Term Neurophysiological Adaptations to Strength Training: A Systematic Review With Cross-Sectional Studies. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 37(10), 2091-2105.

Stone, M. H., & Karatzaferi, C. (2003). Connective tissue and bone response to strength training. *Strength and power in sport*, 343-360.

Suetta, C., Aagaard, P., Rosted, A., Jakobsen, A. K., Duus, B., Kjaer, M., & Magnusson, S. P. (2004). Training-induced changes in muscle CSA, muscle strength, EMG, and rate of force development in elderly subjects after long-term unilateral disuse. *Journal of Applied Physiology*, 97(5), 1954-1961.

Tsuzuku, S., Ikegami, Y., & Yabe, K. (1998). Effects of high-intensity resistance training on bone mineral density in young male powerlifters. *Calcified tissue international*, 63, 283-286.

Volek, J. S., Kraemer, W. J., Bush, J. A., Incledon, T., & Boetes, M. (1997). Testosterone and cortisol in relationship to dietary nutrients and resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*.

Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L. (2004). *Physiology of sport and exercise* (Vol. 20). Champaign, IL: Human kinetics.

Woo, S. L., Gomez, M. A., Amiel, D., Ritter, M. A., Gelberman, R. H., and Akeson, W. H. (1981). "The Effects of Exercise on the Biomechanical and Biochemical Properties of Swine Digital Flexor Tendons." *ASME. J Biomech Eng.* February 1981; 103(1): 51–56. <https://doi.org/10.1115/1.3138246>

Zernicke, R. F., & Loitz-Ramage, B. (2003). Exercise-related adaptations in connective tissue. *Strength and power in sport*, 96.