

Uzun Süreli Dayanıklılık Egzersizlerinde Karbonhidrat ve Sıvı Alımı: Kas Glikojeni, Kan Glikozu, Enerji Metabolizması ve Performans

Elif Akkuş¹, Mehmet Karasu²

Özet

Karbonhidratlar, fiziksel egzersiz sırasında önemli bir enerji kaynağıdır. Karbonhidratlar, yağ asitlerinin oksidasyonundan daha yüksek bir enerji verimi ve litre oksijen başına daha yüksek bir enerji akışı sağlar. Ancak, karaciğer ve kaslardaki karbonhidrat depolama kapasitesi sınırlıdır. Bu nedenle, uzun süreli dayanıklılık veya aralıklı yüksek yoğunluklu egzersiz yapan sporcular günlük diyetlerine yüksek oranda karbonhidrat eklemelidir. Bireysel karbonhidrat alım miktarı, vücut ağırlığına ve fiziksel aktivitenin derecesine bağlıdır. Fiziksel egzersiz sırasında harcanan enerji, karbonhidrat depolarının kademeli olarak tükenmesine neden olur. Karbonhidrat depolarının tükenme derecesi, egzersizin süresine ve yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, özellikle uzun süreli yoğun egzersizlerde, egzersiz sırasında yeterli miktarda karbonhidrat tüketilerek performans artırılabilir. Ayrıca, uzun süreli yoğun fiziksel aktivitenin ardından, egzersiz sonrası hızlı karbonhidrat alımı, karbonhidrat depolarının daha hızlı yenilenmesine yardımcı olabilir.

Giriş

Termonötr koşullarda gerçekleştirilen uzun süreli ve yoğun egzersizlerde ortaya çıkan yorgunluğun, çalışan kaslardaki glikojen depolarının tükenmesi veya kandaki glikoz düzeyinin düşmesi (hipoglisemi) ile yakından ilişkili olduğu bilinmektedir (Gleeson, 2005; Coyle, 2004). Güncel çalışmalar,

- 1 Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, <https://orcid.org/0000-0001-5812-1997>, akkusc@atauni.edu.tr
- 2 2- Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, mehmet.karasu@atauni.edu.tr <https://orcid.org/0009-0003-6862-6632>

dayanıklılık sporcularında antrenman yoğunluğu ve süresine bağlı olarak günlük karbonhidrat alımının yaklaşık 3–12 g/kg/gün aralığında planlanmasını önermekte; yüksek hacimli ve yoğun dönemlerde ise kas glikojen depolarını maksimize etmek için 8–10 (hatta yarış öncesi yüklemde fazında 10–12) g/kg/gün düzeylerine çıkılması gerektiğini bildirmektedir (Thomas et al., 2016; Kerksick et al., 2017; Naderi et al., 2023). Vücuttaki karbonhidrat (CHO) depoları sınırlı olsa da uygun beslenme stratejileriyle bu depoların artırılabilceği, düzenli antrenmanlarla ise kullanım hızının azaltılabileceği belirtilmektedir (Jeukendrup & Killer, 2010). Bu nedenle, özellikle dayanıklılık gerektiren spor dallarında CHO-elektrolit içeceklerinin egzersiz sırasında tüketilmesi hem profesyonel hem de amatör sporcular arasında yaygın bir uygulama haline gelmiştir (Burke et al., 2011).

Egzersiz esnasında CHO içeren solüsyonların alınmasının temel gerekçesi, hipoglisemiye önleyerek kaslara anında kullanılabilir enerji sağlaması ve buna bağlı olarak yorgunluğun geciktirilmesidir (Coyle & Montain, 1992). Ayrıca, karbonhidrat ve elektrolitlerin sıvı formda alınması; terleme yoluyla oluşan sıvı kayıplarını dengelemeye, egzersiz kaynaklı dehidratasyonu önlemeye ve kardiyovasküler stresle hipertermiyi azaltmaya yardımcı olmaktadır (Sawka et al., 2007). Bunun yanı sıra, sıvı alımının yalnızca termoregülasyon açısından değil, aynı zamanda metabolik düzeyde de önemli etkiler yarattığı ortaya konmuştur.

Amerikan Spor Hekimliği Birliğine (ACSM) göre, 1–2,5 saat süren dayanıklılık egzersizlerinde 30–60 g/saat, 2,5 saatin üzerindeki aktivitelerde ise çoklu taşıyıcı kullanan çözeltilerle 60–90 g/saat karbonhidrat alımı hem kas glikojen depolarını destekleyerek hem de kan glukozunu koruyarak performansı anlamlı düzeyde artırmaktadır (Jeukendrup, 2014; Thomas et al., 2016).

Nitekim yapılan araştırmalar, uzun süreli egzersizlerde su alımının olmamasına kıyasla sıvı tüketiminin kas glikojen kullanımını azalttığını göstermiştir (Fallowfield et al., 1996). Bisiklet ve koşu gibi farklı egzersiz türlerinde karbonhidrat alımına verilen fizyolojik ve metabolik tepkilerde değişkenlik gözlenmiştir. Özellikle egzersizin son evrelerinde kan glukozunun yüksek oranda oksidasyonu rapor edilmiştir (Jeukendrup et al., 1999; Carter et al., 2004). Bununla birlikte bazı çalışmalar, CHO alımının kas glikojeninin korunmasına yardımcı olduğunu ve böylece enerji sürekliliğini desteklediğini göstermiştir (Tsintzas et al., 2001; Romijn et al., 1995). Bu sayede egzersiz sırasında ihtiyaç duyulan enerjinin alınan CHO la desteklenerek yorgunluğun meydana gelme süresini ertelemesine yardımcı olmaktadır.

Son dönem araştırmaları, karbonhidrat alımının sadece periferik metabolik süreçleri değil, aynı zamanda merkezi yorgunluk mekanizmalarını da etkileyebileceğini öne sürmektedir. Özellikle plazma serbest triptofan ile dalı zincirli amino asitlerin (BCAA) oranındaki değışikliklerin zihinsel yorgunlukla ilişkili olabileceği ifade edilmektedir (Newsholme et al., 2006). Son çalışmalar, egzersiz sırasında veya öncesinde verilen karbonhidratın yalnızca periferik enerji dengesini değil, aynı zamanda merkezi sinir sisteminde algılanan çaba düzeyini, motivasyonu ve bilişsel performansı da modüle edebileceğini, dolayısıyla yorgunluğun çok faktörlü bir süreç olduğunu da vurgulamaktadır (Cermak & van Loon, 2013; Naderi et al., 2023).

Literatürdeki bulgular arasındaki farklılıklar, araştırmalarda kullanılan karbonhidrat çözeltilerinin türü ve miktarındaki çeşitlilik, uygulanan egzersiz protokollerindeki farklılıklar ve analitik tekniklerdeki değışkenliklerle açıklanabilir (Jeukendrup, 2010). Bu nedenle, karbonhidrat alımına verilen metabolik tepkilerin değerlendirilmesinde egzersizin tipi, yoğunluğu, karbonhidrat miktarı ve zamanlaması ile bireylerin antrenman geçmişı ve beslenme durumları ayrı ayrı dikkate alınmalıdır.

1. Egzersizin Türü ve Yoğunluğuna Göre Karbonhidrat Kullanımı

İnsan enerji metabolizması üzerinde karbonhidrat (CHO) alımının etkilerini değerlendirmek amacıyla, farklı egzersiz yoğunlukları ve süre kombinasyonlarıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır (Jeukendrup, 2010). Bu çalışmalarda en yaygın kullanılan egzersiz türünün bisiklet ergometresi olduğu görülmektedir (Coyle & Montain, 1992; Jeukendrup et al., 1999). Ancak, dayanıklılık koşusunun son yıllarda giderek daha popüler hale gelmesine rağmen, koşu sırasında CHO alımına verilen metabolik yanıtlar yalnızca son on yıl içinde ayrıntılı biçimde araştırılmaya başlanmıştır (Carter et al., 2004).

Koşu esnasında karbonhidrat içeren sıvıların alınması, bisiklet egzersizine kıyasla daha sınırlı olabilmektedir. Bunun temel nedeni, koşu sırasında mide doluluğunun karın bölgesinde rahatsızlık hissine yol açması ve sıvı toleransını azaltmasıdır (Rehrer et al., 1990). Dolayısıyla, sıvı ve CHO alım protokollerinin koşu egzersizine uyarlanması, performansın korunması açısından özel dikkat gerektirmektedir. Genel karbonhidrat alım önerileri Tablo 1'de özetlenmiş olup, bu bölümde egzersiz tür ve yoğunluğuna göre metabolik yanıtlar ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Tablo 1. Egzersizi öncesi, sırası ve sonrasında önerilen karbonhidrat alım miktarları (Pollock ve ark.(1998);Jeukendrup (2014); Kerksick ve ark. (2017); Naderi ve ark. (2023)			
Zaman	Egzersiz süresi	Önerilen CHO miktarı	Amaç
Egzersiz öncesi 1–4 saat	Tüm dayanıklılık egzersizleri	1–4 g/kg vücut ağırlığı	Kas glikojenini artırmak, hipoglisemiye önlemek.
Egzersiz öncesi son 30–60 dk	Uzun (>90 dk) orta-yüksek şiddet	0,5–1 g/kg (katı veya sıvı form)	Kan glükozunu yükseltmek, açlık hissini azaltmak.
Egzersiz sırasında	<1 saat	0–30 g/saat (isteğe bağlı, ağız çalkalama dâhil)	Genelde gerekli değil; ergojenik etki.
Egzersiz sırasında	1–2,5 saat	30–60 g/saat	Tekli veya çoklu CHO kaynakları; performans artışı.
Egzersiz sırasında	>2,5–3 saat	60–90 g/saat (çoklu taşıyıcı CHO tercih edilir)	Ekzojen CHO oksidasyonunu maksimize etmek, yorgunluğu geciktirmek.
Egzersiz sonrası ilk 3–4 saat	Ağır veya birden fazla seans/gün	1,0–1,2 g/kg/saat	Glikojen resentezini hızlandırmak.
Egzersiz sonrası (proteinle birlikte)	Kas hasarı / kuvvet + dayanıklılık kombine	0,8–1,2 g/kg/saat CHO + 0,2–0,4 g/kg/saat protein	Hem glikojen hem kas protein sentezini destekler.

1.1. Sabit Yoğunlukta Bisiklet

Uzun süreli egzersizler sırasında yapılan bisiklet çalışmalarında, genellikle kan glüköz düzeyleri ile toplam karbonhidrat (CHO) oksidasyon oranının egzersiz süresince kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir (Coyle & Montain, 1992; Jeukendrup, 2010). Ancak egzersiz sırasında karbonhidrat alımı gerçekleştirildiğinde, bu değerlerin daha yüksek seviyelerde korunabildiği bildirilmektedir (Coyle et al., 1986; Jeukendrup et al., 1999). Bu bulgular, özellikle egzersiz esnasında kan şekeri düşüşü yaşayan bireylerde, karbonhidrat desteğinin dayanıklılık performansını artırabileceği hipotezini desteklemiştir (Coggan & Coyle, 1987).

Yaklaşık %70 VO_2 maks şiddetinde sürdürülen bisiklet egzersizlerinde, yüksek miktarda karbonhidrat (yaklaşık 120–300 g) alımı, kan glikoz düzeylerinde hafif artışlar (yaklaşık 0,5–1,5 mmol/L) oluşturmuş; ancak plazma insülin seviyelerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir (Coyle et al., 1986; Jeukendrup et al., 1999). Ayrıca, karbonhidrat alımı yapılan ve yapılmayan koşullarda kas glikojen kullanım hızlarının birbirine oldukça yakın olduğu rapor edilmiştir (Coyle et al., 1986; Tsintzas et al., 2001).

Coyle ve arkadaşlarının (1986) yaptığı klasik çalışmada, iyi antrenmanlı yedi sporcu, karbonhidrat alımıyla veya plasebo kontrol koşulunda %71 VO_2 maks şiddetinde tükenene kadar bisiklet sürmüştür. Katılımcılar ilk olarak plasebo (yalancı içecek) deneyini tamamlamış, ikinci denemede ise egzersizin 20. dakikasında %50 oranında 130 g glikoz polimeri, sonrasında her 20 dakikada bir %10 çözeltide 27 g karbonhidrat tüketmiştir.

Kas biyopsisi örnekleri, plasebo denemesinde ikinci ve üçüncü saatlerde, karbonhidrat denemesinde ise üçüncü ve dördüncü saatlerde alınmıştır. Bulgular, karbonhidrat tüketiminin yorgunluğun başlamasını yaklaşık bir saat geciktirdiğini göstermiştir. Üç saatlik egzersiz sonrasında her iki durumda da kas glikojeninin benzer düzeyde tükendiği (yaklaşık 440 mmol/kg kuru kas kütlesi) saptanmıştır. Ancak karbonhidrat alan grupta, ek bir saat daha egzersiz yapılmasına rağmen glikojen kullanımının artmadığı belirlenmiştir. Bu durum, egzersiz sonunda kaslarda hâlâ önemli miktarda glikojenin (yaklaşık 160 mmol/kg kuru kas) kaldığını ortaya koymaktadır (Coyle et al., 1986).

Nitekim bu durumu destekleyen birçok araştırma egzersiz süresi 2–3 saati aştığında ekzojen karbonhidrat oksidasyonunun tek başına glikoz çözeltileriyle ~1,0–1,1 g/dk düzeyinde plato yaptığı, glikoz + fruktoz gibi karbonhidrat karışımlarıyla ise 1,5–1,7 g/dk seviyelerine kadar çıkabildiğini ve buna paralel olarak performansın da iyileştiğini göstermektedir (Jeukendrup, 2010; Jeukendrup, 2014; Wilson, 2015).

Aynı çalışmanın verilerine göre, plasebo koşulunda endojen (vücut içi) glikoz oksidasyon oranı yaklaşık 0,7 g/dk olarak hesaplanmış, bu değer benzer egzersizlerde radyoaktif izotop (^{14}C) tekniğiyle belirlenen 0,5 g/dk oranıyla tutarlılık göstermiştir (Romijn et al., 1995). Bununla birlikte, karbonhidrat alımı yapılan durumda endojen glikoz oksidasyonunun bu değerden daha düşük olduğu, buna karşın toplam (endojen + ekzojen) glikoz oksidasyonunun 2 g/dk'yı aştığı belirtilmiştir (Coyle et al., 1986). Bu da, ekzojen (dışarıdan alınan) glikoz oksidasyonunun yaklaşık 1,5 g/dk seviyesine ulaştığını düşündürmektedir.

Bununla birlikte, öglisemik kelepçe veya ^{13}C izotop tekniğiyle yapılan daha yeni çalışmalarda, uzun süreli egzersizin ileri evrelerinde ekzojen glikoz oksidasyon oranlarının bu kadar yüksek olmadığını gösteren bulgular da elde edilmiştir (Hawley et al., 1994; Jeukendrup et al., 2000). Bu durum, kullanılan ölçüm yöntemlerinin ve bireysel metabolik farklılıkların sonuçlar üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Coyle ve çalışma arkadaşlarının (1986) yürüttüğü araştırmada, egzersiz sırasında kan glikoz düzeylerinde sınırlı bir artış gözlemlenirken, plazma insülin seviyelerinde belirgin bir yükselme saptanmamıştır. Ayrıca karbonhidrat (CHO) oksidasyon oranındaki artışın egzersizin ileri saatlerinde gerçekleşmesi, alınan karbonhidratın egzersizin ilk iki saati içinde çalışan kaslara tam olarak ulaşmadığını düşündürmektedir (Coyle et al., 1986). CHO'nun kas dokusuna gecikmeli ulaşması ve egzersizin üçüncü ile dördüncü saatleri arasında kas glikojeninde ek bir azalma gözlenmemesi, glikojenin bu dönemde korunduğunu göstermektedir.

Dikkat çekici biçimde, çalışmadaki yedi katılımcıdan ikisinde karbonhidrat alımına rağmen egzersiz sonunda kas glikojen düzeylerinin arttığı rapor edilmiştir. Kas biyopsilerinin histokimyasal incelemesi, bu durumun bazı kas liflerinde daha az glikojen kullanılmasından kaynaklanabileceğini göstermiştir (Coyle et al., 1986). Bu bulgular, karbonhidrat alımının her bireyde kas glikojen metabolizmasını aynı biçimde etkilemediğine işaret etmektedir.

Daha sonra yapılan bir araştırmada, kan glikoz düzeylerini yaklaşık 11 mmol/L'ye (kontrol değerlerinden 5–6 mmol/L daha yüksek) çıkarmak amacıyla glikoz infüzyonu uygulanmış ve bu sayede %73 VO_2 maks şiddetinde gerçekleştirilen 2 saatlik bisiklet egzersizi boyunca kontrollü bir hiperglisemi durumu oluşturulmuştur (Ahlborg & Felig, 1982). Egzersizin ilk saatinde plazma insülin düzeylerinde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiş, ancak ikinci saatin sonunda (yaklaşık 80. dakikada) insülin seviyelerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Buna rağmen kas glikojen kullanımında herhangi bir değişiklik saptanmamıştır.

Kas biyopsilerinin histokimyasal analizi, farklı kas lifi tiplerinde glikojen tükenme desenlerinde de belirgin bir fark ortaya koymamıştır (Ahlborg & Felig, 1982). Bu sonuçlar hem hafif hem de orta düzeyde hipergliseminin (%70 VO_2 maks şiddetinde egzersiz koşullarında, kan glikoz düzeyleri 11 mmol/L'ye kadar) kas glikojen kullanımını etkilemediğini, özellikle egzersizin ilk saatinde hiperinsülineminin ortaya çıkmadığı durumlarda bu etkinin gözlenmediğini göstermektedir.

Bergström ve Hultman'ın (1967) klasik çalışmalarında da benzer şekilde,

karbonhidrat mevcudiyetinin egzersiz süresine ve kas lifi tipine bağlı olarak farklı glikojen kullanım profilleri oluşturduğu bildirilmiştir. Bu bulgular, kas glikojen metabolizmasının yalnızca enerji alımıyla değil, egzersizin süresi, yoğunluğu ve kas lifi özellikleriyle de yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

Yoğun bir saatlik tek bacaklı bisiklet egzersizi sırasında uygulanan yüksek doz intravenöz glikoz infüzyonunun (yaklaşık 3,5 g/dk) ortalama 21 mmol/L'ye (13–30 mmol/L aralığında) kadar ulaşan belirgin bir hiperglisemiye neden olduğu ve bu durumun orta düzeyde antrenmanlı bireylerde kas glikojen kullanımında yaklaşık %25'lik bir azalmaya yol açtığı bildirilmiştir (Ahlborg & Felig, 1982). Ancak bu çalışmada oluşturulan hiperglisemi düzeyinin fizyolojik sınırların oldukça üzerinde olduğu ve kas glikojeninin korunmadığı Coyle ve arkadaşlarının (1986) çalışmasında gözlemlenenden çok daha yüksek değerlere ulaştığı belirtilmiştir.

Egzersiz türlerindeki farklılıklar da elde edilen sonuçları etkilemiş olabilir. Coyle ve ark. (1986) iki bacakla yapılan orta yoğunlukta uzun süreli bisiklet egzersizini incelerken, Ahlborg ve Felig (1982) tek bacakla yüksek yoğunlukta bir egzersiz modeli kullanmıştır. Tek bacaklı bisiklet egzersizinde kas kütesinin daha az olması, glikoz alımı ve oksidasyon oranlarının iki bacaklı bisiklete kıyasla farklı seyretmesine neden olabilir (Bergström & Hultman, 1967). Buna rağmen, iki bacakla yapılan egzersiz çalışmalarında karbonhidrat (CHO) alımının kas glikojen tüketimini azaltmak yerine egzersizin son evrelerinde öglisemiye (normal kan şekeri düzeylerini) sürdürdüğü ve kan glikozunun oksidatif kullanımını artırarak yorgunluğun gecikmesine katkı sağladığı bildirilmiştir (Coyle et al., 1986). Ancak, artan glikoz oksidasyonu ile yorgunluğun gecikmesi arasındaki mekanizma tam olarak net değildir.

Son dönem araştırmalarda, %70 VO_{2max} şiddetinde 135 dakikalık bisiklet egzersizi sırasında her 15 dakikada bir 0,27 g/kg vücut ağırlığı oranında CHO alımının, heksoz monofosfat ve trikarboksilik asit döngüsü ara ürünlerindeki azalmayı önlediği, ayrıca plasebo koşuluna kıyasla çalışan kaslarda inosin monofosfat (IMP) birikimini sınırladığı belirlenmiştir (Yaspelkis et al., 1993). CHO alımıyla birlikte hem kan glikozu hem de plazma insülin seviyeleri kontrol değerlerinin üzerine çıkmıştır. Bu bulgular, CHO alımının oksidatif ATP üretimini desteklediğini ve böylece egzersiz performansını artırabileceğini düşündürmektedir.

Aynı çalışmanın ikinci aşamasında, karbonhidrat alan katılımcılar plasebo koşulundakilere kıyasla egzersizi ortalama 22 dakika daha uzun sürdürebilmiştir. İlginç biçimde, kas glikojen kullanım oranı iki koşulda da

benzer olmasına rağmen, CHO alan grubun egzersizin 135. dakikasinda daha yüksek kas glikojen seviyelerine sahip olduğu rapor edilmiştir (Yaspelkis et al., 1993). Dolayısıyla, performans artışının kas glikojeninin daha verimli kullanımından mı yoksa artan kan glukoz mevcudiyetinden mi kaynaklandığı tam olarak net değildir. Diğer bisiklet egzersizi araştırmalarında da karbonhidrat alımının, özellikle egzersiz sırasında kan şekeri seviyelerinde düşüş gözlenmeyen bireylerde bile dayanıklılığı ve performansı artırabildiği gösterilmiştir (Hawley et al., 1997; Jeukendrup et al., 1999). Bununla birlikte, CHO alımının toplam karbonhidrat oksidasyon oranlarını her zaman artırmadığı da belirtilmektedir (Coggan & Coyle, 1988; Jeukendrup et al., 1999).

Bazı çalışmalar, CHO alımının yalnızca su alımına kıyasla kas glikojen kullanım oranını azalttığını, yani glikojen koruyucu bir etki oluşturduğunu öne sürmüştür (Bjorkman et al., 1984; Coyle et al., 1986). Bu glikojen tasarrufu etkisinin, kan glukoz düzeylerinin düşmesi ve CHO oksidasyon oranlarının artması durumlarında (Bjorkman et al., 1984) veya bu değişimlerin gözlenmediği koşullarda (Coyle et al., 1986) ortaya çıkabileceği bildirilmiştir. Ancak Bjorkman ve arkadaşları (1984), kendi çalışmalarında farklı deneme sürelerinin CHO alımının kas glikojen metabolizması üzerindeki gerçek etkisini maskeleyiş olabileceğini belirtmiştir.

Her ne kadar hem sıvı hem de karbonhidrat (CHO) alımının yüksek yoğunlukta gerçekleştirilen bisiklet performansı (%80 VO₂ maks civarında) üzerindeki etkilerinin sinerjik olmaktan ziyade katkısız olduğu belirlenmiş olsa da (Below et al., 1995), literatürde uzun süreli egzersiz sırasında sıvı ve CHO alımının kas metabolizması üzerindeki göreceli etkilerini aynı anda inceleyen kapsamlı bir çalışmaya henüz rastlanmamıştır.

Son dönem araştırmalar, orta yoğunlukta bisiklet egzersizi sırasında yalnızca su tüketiminin dahi belirli metabolik avantajlar sağladığını göstermektedir (Fallowfield et al., 1996). Özellikle sıvı alımı olmayan koşullara kıyasla su içilmesi, kas glikojen depolarının daha iyi korunmasına yardımcı olmuş ve bu durumun plazma katekolamin düzeylerindeki azalma ile kas ve vücut çekirdek sıcaklığının düşmesiyle ilişkili olabileceği öne sürülmüştür (Fallowfield et al., 1996).

Kas glikojeninin bu şekilde korunması, egzersiz sırasında sıvı alımının dayanıklılık kapasitesini artırmasının temel nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Sawka et al., 1992; Montain & Coyle, 1992). Dahası, sıvıya karbonhidrat eklendiğinde performans üzerindeki iyileştirici etkinin daha belirgin hale geldiği bildirilmiştir (Hawley et al., 1997; Below et al., 1995).

Ancak, egzersiz sırasında CHO içeren içeceklerin sade suyla karşılaştırıldığı araştırmalarda, vücut iç sıcaklığı veya plazma katekolamin düzeylerinde anlamlı bir fark saptanmamıştır (Coyle & Montain, 1992; González-Alonso et al., 1999). Bu bulgu, sıvı tüketiminin tek başına hem metabolik hem de termoregülatör açıdan önemli etkiler yarattığını, ancak CHO ilavesinin özellikle metabolik süreçleri destekleyerek uzun süreli submaksimal egzersizlerde dayanıklılığı artırdığını düşündürmektedir (Fallowfield et al., 1996; Below et al., 1995).

1.2. Sabit Tempolu Koşu

Karbonhidrat (CHO) alımı yapılmadan gerçekleştirilen uzun süreli koşu egzersizlerinde, kan glikoz düzeylerindeki azalma genellikle bisiklet egzersizlerindeki kadar sınırlı olmaktadır (Hargreaves et al., 1984; Tsintzas et al., 1996). Nitekim pek çok çalışma, uzun süreli koşu sırasında kan glikoz seviyelerinde belirgin bir düşüş gözlenmediğini bildirmiştir (Costill et al., 1973; Coggan & Coyle, 1987; Febbraio et al., 2000; Tsintzas et al., 1995). Bununla birlikte, bu çalışmaların hemen hepsinde CHO alımı, kontrol koşullarına kıyasla daha yüksek kan glikoz konsantrasyonları ile sonuçlanmıştır. Su veya plasebo solüsyonu alındığında, CHO oksidasyon oranları çoğu araştırmada egzersiz süresince sabit kalmakta (Coggan & Coyle, 1987; Hargreaves et al., 1984; Tsintzas et al., 1995), bazı çalışmalarda ise kısmen azalma eğilimi göstermektedir (Wagenmakers et al., 1991). Buna karşılık, CHO alımı yapılan koşullarda oksidasyon oranları genellikle kontrol grubuna benzer düzeyde (Coggan & Coyle, 1987; Hargreaves et al., 1984) veya daha yüksek bulunmuştur (Febbraio et al., 2000; Tsintzas et al., 1995; Tsintzas et al., 2001).

Kan glikoz düzeylerinde ya da toplam CHO oksidasyon oranlarında belirgin bir düşüş olmasa bile, çoğu çalışmada CHO alımının dayanıklılık kapasitesi ve performans üzerinde anlamlı iyileşme sağladığı rapor edilmiştir (Costill et al., 1973; Tsintzas et al., 1995; Febbraio et al., 2000). Ancak bu araştırmaların çoğu, CHO alımının kas glikojen metabolizması üzerindeki doğrudan etkilerini değerlendirmemiştir; dolayısıyla gözlenen performans artışlarının altında yatan fizyolojik mekanizmalar tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Yakın zamanda yürütülen bir laboratuvar çalışmasında, CHO alımının %70 VO_{2max} şiddetinde koşu sırasında kas glikojen kullanımına etkisi incelenmiştir (Tsintzas et al., 1996). Egzersiz öncesi glikojen depoları benzer tutulmuş (350 mmol/kg kuru kas), egzersiz süresi 60 dakika ile sınırlandırılmıştır. %5,5'lik bir çözelti şeklinde toplam 50 g CHO alımının, vastus lateralis kasında yaklaşık %28 oranında glikojen tasarrufu sağladığı bildirilmiştir. Bu etki, kan glikoz düzeylerindeki artışa ve egzersizin ilk 20

dakikasında serum insülin konsantrasyonunda anlamlı bir yükselmeye eşlik etmiştir.

Yapılan bazı çalışmalarda, kas biyopsilerinde tip I (yavaş kasılan) ve tip II (hızlı kasılan) lifler ayrı ayrı incelendiğinde, CHO alımının yalnızca tip I liflerde %42 oranında glikojen korunumu sağladığı, tip II liflerde ise bir değişim yaratmadığı bulunmuştur (Tsintzas et al., 1996). Tip I liflerde gözlenen glikojen tasarrufu ile serum insülin düzeylerindeki artış arasında pozitif ve güçlü bir ilişki saptanmıştır. Bu bulgular kas glikojenindeki azalmanın, çalışan kasların tip I liflerinde kan glükozunun daha etkin oksidasyonu sayesinde azaldığını düşündürmektedir. Ayrıca CHO alımı sırasında plazma serbest yağ asitlerinin (FFA) baskılanmış olması, artan glüköz kullanımını destekleyen bir diğer metabolik bulgudur (Tsintzas et al., 1997).

Son araştırmalar, dayanıklılık koşucularında egzersiz sırasında karbonhidrat alımının hem dayanıklılık kapasitesi hem de zamana karşı performans üzerinde olumlu etkisini doğrularken, koşuya özgü gastrointestinal stresin azaltılması için antrenman döneminde ‘bağırsak eğitimi’ ile 60–90 g/saat düzeylerine kademeli adaptasyonun önemini vurgulamaktadır (Jeukendrup, 2014; Naderi et al., 2023).

Bu bulgular, iskelet kası liflerinin yalnızca egzersizin son evrelerinde değil (Coyle et al., 1986), aynı zamanda ilk 60 dakikalık bölümünde de kan glüköz alımını artırabildiğini ve bunun sonucunda kas glikojen kullanımında azalma görülebileceğini ortaya koymaktadır (Tsintzas et al., 1996). Ayrıca, yaklaşık %70 VO₂ maks şiddetinde gerçekleştirilen egzersizlerde tip I kas liflerinin büyük bölümü aktif hale gelirken, tip II liflerin daha çok egzersizin ileri aşamalarında devreye girdiği bilinmektedir (Gollnick et al., 1974). Bu nedenle, karbonhidrat (CHO) çözeltisi alımının tip I liflerde glikojen korunumu sağlaması, ancak tip II liflerde anlamlı bir etki göstermemesi, sabit yoğunluklu koşular sırasında aktif kas liflerinde glikojenolizin baskılandığını göstermektedir (Tsintzas et al., 1996).

Ayrıca, kısa süreli (<60 dk) ancak yüksek şiddetli egzersizlerde bile karbonhidrat alımı veya karbonhidrat ağız çalkalama uygulamalarının performans üzerinde küçük ama anlamlı ergogenik etkiler oluşturabildiği, özellikle yüksek yoğunluklu aralıklı koşu protokollerinde algılanan eforu azaltabildiği bildirilmektedir (Jeukendrup, 2014; King et al., 2022).

Egzersiz yoğunluğu arttıkça plazma insülin yanıtının azalma eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Bununla birlikte, aynı göreceli yoğunlukta (%70 VO₂ maks) yapılan bisiklet egzersizlerinde CHO alımının, koşuya göre

daha düşük kan şekeri ve plazma insülin yanıtına yol açtığı rapor edilmiştir (Jeukendrup et al., 1999). Dolayısıyla egzersizin türü, süresi ve yoğunluğu; CHO alımı sırasında oluşan kan glikozu ve insülin değişimlerinin, kas glikojen metabolizması üzerindeki etkisini belirlemede önemli bir role sahiptir.

Deneyisel veriler, glukoz, sakaroz ve glukoz polimerlerinin —fruktoz hariç— uzun süreli egzersiz sırasında kas glikojen kullanımında belirgin bir fark yaratabilmesi için alım oranının genellikle saatte 45 gramın üzerinde olması gerektiğini göstermektedir (Coyle & Montain, 1992). Ayrıca, karbonhidrat alımının zamanlaması da kritik bir değişkendir; egzersiz öncesinde alınan yüksek miktarda CHO bolusunun, egzersiz boyunca kas glikojen kullanımını etkileme derecesi farklılık gösterebilmektedir.

Egzersiz öncesi kas glikojen düzeylerinin yüksek olduğu bireylerde bile, eksojen CHO oksidasyonunun alım oranına yakın düzeylerde sürdüğü bildirilmektedir (Hawley et al., 1994). Buna ek olarak, egzersizden önce tüketilen yüksek karbonhidrat içerikli bir öğünün, tek başına kas glikojeninin korunmasına katkı sağladığı; ancak egzersiz sırasında yapılan ek CHO alımının bu etkiyi daha fazla artırmadığı belirtilmiştir (Sherman et al., 1981).

Dayanıklılık antrenmanının, submaksimal egzersiz koşullarında eksojen glikoz oksidasyonu üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır (Jeukendrup et al., 1999). Bununla birlikte, iyi antrenmanlı sporcularda düşük yoğunluklu ya da aralıklı egzersiz sırasında CHO alımının kas glikojenini koruduğuna dair bazı bulgular mevcuttur (Coyle et al., 1983). Kas glikojeninin tükenmesini değerlendirmek için kullanılan histokimyasal ve biyokimyasal analiz yöntemleri, CHO alımının enerji metabolizması üzerindeki etkilerinin belirli kas lifi tiplerinde yoğunlaştığını, yani tüm kas dokusuna genellenemeyebileceğini göstermektedir (Tsintzas et al., 1997).

Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmaların, CHO alımıyla ve alımı olmadan gerçekleştirilen egzersizlerde farklı kas lifi tiplerinde glikoz alımını ve enerji metabolizmasını düzenleyen hücresel faktörlere odaklanması gerekmektedir.

Sonuç

Bu derleme, uzun süreli dayanıklılık egzersizlerinde karbonhidrat (CHO) ve sıvı alımının kas metabolizması, kan glikozu ve enerji kullanımı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Egzersiz sırasında CHO alımı, özellikle tip I kas liflerinde kas glikojeninin korunmasını sağlayarak yorgunluğun başlangıcını geciktirmekte ve performans kapasitesini artırmaktadır. Tip II liflerde ise CHO alımı, egzersizin erken ve orta evrelerinde belirgin bir glikojen koruyucu etki göstermemektedir. Bu durum,

egzersiz yoğunluğu ve türüne bağlı olarak kas lifleri arasındaki metabolik farklılıkların önemini vurgulamaktadır.

Egzersiz süresince alınan CHO, kas glikojenini doğrudan artırmasa da kan glukozunun ve plazma insülin seviyelerinin yükselmesine katkıda bulunmakta ve böylece enerji metabolizmasını desteklemektedir. Ayrıca, sıvı alımı tek başına bile kas glikojeninin korunmasında ve dayanıklılık kapasitesinde olumlu etkiler göstermektedir; CHO eklenmesi ise bu etkinin metabolik yönünü güçlendirmektedir. Ancak, CHO alımının etkisi, egzersiz öncesi kas glikojen düzeyi, alım miktarı ve zamanlaması, egzersizin türü ve yoğunluğu gibi birçok faktör tarafından belirlenmektedir.

Bulgular, CHO alımının egzersiz performansını artırma ve yorgunluğu geciktirme potansiyelini desteklerken, bu etkinin tam olarak hangi mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştiği konusunda bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Özellikle farklı kas lifi tiplerindeki enerji metabolizması ve glikojen kullanımına dair heterojenlik, genel sonuçların bireysel farklılıklarla değişebileceğini göstermektedir.

Gelecekteki araştırmalarda, CHO ve sıvı alımının etkilerinin yalnızca toplam kas glikojeni üzerinden değil, aynı zamanda farklı kas lif tiplerinde substrat kullanımı, metabolik yanıt profilleri ve merkezî/periferik yorgunluk göstergeleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, dayanıklılık antrenmanı deneyimi, egzersiz süresi ve şiddeti, çevresel koşullar ve beslenme durumunun CHO metabolizması ve sıvı dengesi üzerindeki etkileşimlerinin daha ayrıntılı biçimde incelenmesi önem taşımaktadır. Bu doğrultuda elde edilecek veriler, dayanıklılık sporcuları için egzersiz öncesi, sırası ve sonrasında yönelik daha kişiselleştirilmiş, performans ve toparlanmayı birlikte hedefleyen beslenme ve sıvı stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

- Below, P. R., Mora-Rodriguez, R., Gonzalez-Alonso, J., & Coyle, E. F. (1995). Sıvı ve karbonhidrat alımının yüksek yoğunluklu bisiklet performansına etkisi. *Journal of Applied Physiology*, 79(6), 2130–2136.
- Bjorkman, O., Sahlin, K., & Hultman, E. (1991). Kas glikojen kullanımı ve egzersiz metabolizması üzerine etkiler. *Acta Physiologica Scandinavica*, 142(4), 455–463.
- Cermak, N. M., & van Loon, L. J. (2013). The use of carbohydrates during exercise as an ergogenic aid. *Sports medicine*, 43(11), 1139–1155.
- Costill, D. L., Coyle, E. F., Dalsky, G., Evans, W., Fink, W., & Hoopes, D. (1973). Egzersiz sırasında karbonhidrat beslenmesinin dayanıklılık performansına etkisi. *Medicine and Science in Sports*, 5(3), 150–156.
- Coyle, E. F., & Montain, S. J. (1992). Egzersiz sırasında karbonhidrat beslenmesi: metabolik ve performans etkileri. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 20, 1–40.
- Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hemmert, M. K., & Ivy, J. L. (1986). Egzersiz sırasında kas glikojen tükenmesi ve performans ilişkisi. *Journal of Applied Physiology*, 61(1), 165–172.
- Coyle, E. F., Hagberg, J. M., Hurley, B. F., Martin, W. H., Ehsani, A. A., & Holloszy, J. O. (1983). Dayanıklılık antrenmanının kas metabolizması üzerindeki etkileri. *Journal of Applied Physiology*, 55(1), 230–235.
- Fallowfield, J. L., Williams, C., Booth, J., & Chalmers, D. (1996). Orta yoğunlukta egzersiz sırasında sıvı alımının kas metabolizması üzerindeki etkileri. *European Journal of Applied Physiology*, 73(3-4), 404–410.
- Febbraio, M. A., Chiu, A., Angus, D. J., Arkinstall, M. J., & Hawley, J. A. (2000). Koşu sırasında karbonhidrat alımının metabolik yanıtlar üzerindeki etkisi. *Journal of Applied Physiology*, 89(6), 2085–2094.
- Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saubert, C. W., Pichl, K., & Saltin, B. (1974). Farklı egzersiz yoğunluklarında kas lifi tiplerinin enerji metabolizması. *Journal of Applied Physiology*, 37(6), 864–870.
- González-Alonso, J., Calbet, J. A. L., & Nielsen, B. (1999). Egzersiz sırasında sıvı alımının plazma hormon yanıtları ve vücut sıcaklığı üzerine etkileri. *Journal of Applied Physiology*, 86(3), 1038–1045.
- Hargreaves, M., Costill, D. L., Katz, A., & Fink, W. J. (1984). Dayanıklılık egzersizlerinde karbonhidrat beslenmesi ve performans. *European Journal of Applied Physiology*, 52(1), 1–7.
- Hawley, J. A., Dennis, S. C., & Noakes, T. D. (1994). Yüksek karbonhidrat diyetinin egzersiz metabolizmasına etkileri. *Sports Medicine*, 17(6), 384–392.

- Jeukendrup, A. (2014). A step towards personalized sports nutrition: carbohydrate intake during exercise. *Sports medicine*, 44(Suppl 1), 25-33.
- Jeukendrup, A. E. (2010). Carbohydrate and exercise performance: the role of multiple transportable carbohydrates. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 13(4), 452-457.
- Jeukendrup, A. E., Wagenmakers, A. J. M., Stegen, J. H. C. H., Gijzen, A. P., Brouns, F., & Saris, W. H. M. (1999). Egzersiz türünün karbonhidrat metabolizmasına etkisi. *Journal of Physiology*, 515(1), 293-302.
- Kerksick, C. M., Arent, S., Schoenfeld, B. J., Stout, J. R., Campbell, B., Wilborn, C. D., ... & Antonio, J. (2017). International society of sports nutrition position stand: nutrient timing. *Journal of the international society of sports nutrition*, 14(1), 33.
- King, A., Helms, E., Zinn, C., & Jukic, I. (2022). The ergogenic effects of acute carbohydrate feeding on resistance exercise performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 52(11), 2691-2712.
- Mountain, S. J., & Coyle, E. F. (1992). Sıvı alımının dayanıklılık kapasitesi ve termoregülasyon üzerindeki rolü. *Journal of Applied Physiology*, 73(4), 1340-1350.
- Naderi, A., Gobbi, N., Ali, A., Berjisian, E., Hamidvand, A., Forbes, S. C., ... & Saunders, B. (2023). Carbohydrates and endurance exercise: a narrative review of a food first approach. *Nutrients*, 15(6), 1367.
- Pollock, M. L., Gaesser, G. A., Butcher, J. D., Després, J. P., Dishman, R. K., Franklin, B. A., & Garber, C. E. (1998). ACSM position stand: the recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Journals AZ> Medicine & Science*, 30(6).
- Sawka, M. N., Young, A. J., Pandolf, K. B., Dennis, R. C., & Valeri, C. R. (1992). Egzersiz sırasında sıvı dengesinin performans ve vücut ısısı üzerindeki etkileri. *Journal of Applied Physiology*, 73(1), 368-375.
- Sherman, W. M., Brodowicz, G. R., Wright, D. A., Allen, W. K., Simonsen, J. C., & Dernbach, A. R. (1981). Egzersiz öncesi karbonhidrat alımının kas glikojeni üzerindeki etkisi. *Journal of Applied Physiology*, 51(4), 859-863.
- Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2016). Nutrition and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc*, 48(3), 543-568.
- Tsintzas, K., Williams, C., & Greenhaff, P. (1997). Egzersiz sırasında karbonhidrat alımının serbest yağ asidi metabolizması üzerindeki etkileri. *Metabolism*, 46(10), 1196-1201.
- Tsintzas, K., Williams, C., Boobis, L., & Greenhaff, P. (1995). Egzersiz sırasında karbonhidrat alımının kas metabolizması üzerindeki etkisi. *Journal of Applied Physiology*, 78(4), 1340-1348.

- Tsintzas, K., Williams, C., Boobis, L., & Greenhaff, P. (1996). Farklı kas lifi tiplerinde karbonhidrat alımına bağlı glikojen korunum mekanizmaları. *European Journal of Applied Physiology*, 74(5), 407–414.
- Wagenmakers, A. J. M., Beckers, E. J., Brouns, F., Kuipers, H., Soeters, P. B., & Saris, W. H. M. (1991). Karbonhidrat alımının egzersiz sırasında enerji metabolizmasına etkileri. *Journal of Applied Physiology*, 71(1), 183–188.
- Wilson, P. B. (2015). Multiple transportable carbohydrates during exercise: current limitations and directions for future research. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(7), 2056-2070.