



## **UČINCI KOFEINA NA MIŠIĆNU JAKOST, SNAGU I IZDRŽLJIVOST – NARATIVNI PREGLED RECENTNE LITERATURE**

### **THE EFFECTS OF CAFFEINE ON MUSCLE STRENGTH, POWER, AND ENDURANCE – A NARRATIVE REVIEW OF RECENT LITERATURE**

Pavle Mikulić

Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu

#### **SAŽETAK**

Kofein je iznimno široko konzumiran stimulans koji je zbog svojih ergogenih učinaka na tjelesnu izvedbu vrlo popularan i među sportašima i rekreativnim vježbačima. Konzumacija kofeina u sportu posebno je porasla nakon 2004. godine kada ga je Svjetska antidopinška agencija obrisala s liste supstanci čija je upotreba na natjecanjima ograničena. Paralelno s tom povećanom konzumacijom kofeina među sportašima povećavao se i interes istraživača za proučavanje učinaka kofeina na razne segmente tjelesne izvedbe, a ovaj narativni pregledni rad specifično je usmjeren na recentna istraživanja koja su proučavala akutni učinak kofeina na izvedbu u treningu s otporom (mišićna jakost, snaga i izdržljivost). Što se tiče učinka kofeina na mišićnu jakost, postoje uvjerljivi dokazi da kofein može poboljšati izvedbu 1RM kao i jakost u izometričkim i izokinetičkim uvjetima mišićnih akcija. Povećanja jakosti nakon konzumacije kofeina generalno su u rasponu 2-5%. Također, kofein može poboljšati izlaz snage kao i brzinu pokreta te mišićnu izdržljivost u treningu s otporom. Povećanja u izlazu snage koja se opažaju nakon konzumacije kofeina generalno su veća naspram povećanja u mišićnoj jakosti i izdržljivosti. Nadalje, istraživanja ukazuju da doze u rasponu 2-6 mg kofeina po kilogramu tjelesne mase, neovisno o izvoru iz kojeg se kofein unosi u tijelo (npr. kapsule, gume za žvakanje, gelovi, kava), mogu biti učinkovite za akutno poboljšanje mišićne jakosti, snage i izdržljivosti. Ergogeni učinci kofeina mogu biti vidljivi i s višim dozama kofeina (raspon 7-11 mg/kg), međutim, kod tako visokih doza povećana je mogućnost izraženijih nuspojava. Habitualna konzumacija kofeina, čini se, nema utjecaja na ergogene učinke akutne suplementacije kofeinom, iako postoje istraživanja koja su pokazala suprotno. Prema tome, moguće je da sportaši i vježbači

#### **SUMMARY**

Caffeine is a widely consumed substance among general population and is, due to its ergogenic effects on physical performance, also highly popular among competitive and recreational athletes. The consumption of caffeine in sports has been on an increase particularly after 2004 when World Antidoping Agency (WADA) removed it from its list of “controlled” substances. Simultaneously with this increase in caffeine consumption among athletes, there has been a growing interest among researchers to elucidate the effects of caffeine on various aspects of physical performance. This narrative review aims to provide an overview of the recent research exploring caffeine’s effects on resistance exercise performance (muscle strength, power, and endurance). Regarding the effects of caffeine on muscle strength, there is convincing evidence that caffeine may enhance 1RM as well as isokinetic and isometric strength. The increases in strength following caffeine consumption generally range from 2% to 5%. Also, caffeine can enhance power output as well as movement velocity in resistance exercise and can enhance muscle endurance. The increases in power output typically observed following caffeine consumption are greater compared to the increases in muscle strength and muscle endurance. Furthermore, research shows that caffeine doses in the 2-6 mg/kg range, independent of the caffeine source (e.g., capsules, chewing gums, caffeinated gels, coffee) can be ergogenic for muscle strength, power, and endurance. The ergogenic effects of caffeine on resistance exercise performance outcomes are also evident with higher doses (i.e., 7-11 mg/kg); however, such doses are typically associated with a higher incidence of side effects. Habitual caffeine intake seems not to have an effect on acute ergogenic effects of caffeine, although it should be stated that there is research that shows otherwise. Therefore, it

koji kroz dan konzumiraju veće količine kofeina trebaju veću dozu za postizanje istog akutnog ergogenog učinka, iako ova teza zahtijeva dodatna istraživanja. Na kraju, treba naglasiti da je fiziološki odgovor na kofein vrlo individualan i iako će kofein poboljšati izvedbu kod većine, to neće biti slučaj sa svim sportašima i rekreativnim vježbačima.

*Ključne riječi: ergogena sredstva, suplementi u sportu, trening s otporom*

may be that competitive and recreational athletes who consume caffeine in larger doses throughout their typical day, need a higher caffeine dose to achieve the same acute ergogenic effect on performance. However, this hypothesis requires further research. Finally, it should be stated that the physiological response to caffeine is highly individualized and although caffeine will enhance performance in most, this will not be the case in all recreational and competitive athletes.

*Keywords: ergogenic aids, sports supplements, resistance exercise*

## UVOD

Kofein je iznimno raširen i popularan stimulans koji je danas praktički neizbježan u svakodnevnom životu. Smatra se da u zapadnim zemljama čak oko 90% odrasle populacije konzumira kofein na dnevnoj bazi (14). Osim u široko konzumiranim prehrambenim namirnicama poput kave, čajeva i bezalkoholnih pića, može ga se naći i u čokoladi ili pak u popularnim energetske pićima (2).

Zbog svojih ergogenih svojstava (svojstava koja se odnose na poboljšanje tjelesne izvedbe), kofein često konzumiraju sportaši i rekreativni vježbači s ciljem poboljšanja svoje izvedbe na treningu ili na natjecanju. Koliko je konzumacija kofeina raširena među sportašima pokazuje nalaz analize otprilike 30 000 uzoraka urina prikupljenih nakon velikih nacionalnih i internacionalnih natjecanja u različitim sportovima u razdoblju 2004. – 2008., te nakon toga ponovo u 2015 (1,11). Tom analizom utvrđeno je da približno 75% sportašica i sportaša konzumira kofein u vrijeme natjecanja na kojem nastupa (1,11). Nadalje, u analiziranom razdoblju posebno se povećala utvrđena koncentracija kofeina u urinu kod sportašica i sportaša koji se natječu u atletici, vodenim sportovima, veslanju, boksu, judu, nogometu i dizanju utega (1).

Sve do 2004. godine, postojalo je ograničenje na koncentraciju kofeina u urinu sportašica i sportaša koja se smatrala dopustivom na službenim natjecanjima, no te godine to je ograničenje ukinuto i u ovom trenutku Međunarodni olimpijski odbor i Svjetska antidopinška agencija smatraju kofein dopuštenom supstancom bez ikakvih ograničenja. Ipak, treba spomenuti da Svjetska antidopinška agencija drži kofein na listi supstanci koje se prate i preporučuje sportašicama i sportašima da im koncentracija kofeina u urinu ne prelazi 12 µg/ml. Ta koncentracija kofeina u urinu odgovara konzumaciji od oko 10 mg kofeina po kilogramu tjelesne mase kroz razdoblje od nekoliko sati, a što je, kako ćemo vidjeti kasnije kroz ovaj rad, tri do pet puta iznad doza kofeina koje su se pokazale ergogenom za tjelesnu izvedbu.

Posljednjih godina objavljen je zaista veliki broj znanstvenih radova koji su nastojali rasvijetliti učinke kofeina na razne vidove tjelesnog vježbanja i sportske izvedbe. Tako je, uz mnogo originalnih znanstvenih radova, samo posljednjih godina objavljen i velik broj preglednih radova i meta analiza koji sažimaju nalaze pojedinačnih znanstvenih radova koji su istraživali akutne učinke kofeina na mišićnu jakost, mišićnu snagu, mišićnu izdržljivost, izvedbu balističkih pokreta (skokovi, bacanja), izvedbu sprinta, aerobnu i anaerobnu izdržljivost, te na segmente izvedbe u timskim sportovima (3,12,16,18,19,21,24,27,28,30,31,34,35,36,37,50,58,63). Pored ovih preglednih radova i meta analiza, treba spomenuti da je Međunarodno društvo za sportsku prehranu (eng. *International society of sports nutrition*) u 2021. godini izdalo i svoje službeno stajalište (eng. *position stand*) na temu učinaka kofeina na tjelesno vježbanje i sportsku izvedbu (38).

Kako se unutar sportske znanosti ovo područje istraživanja razvija zaista brzo, cilj ovog rada je napraviti pregled važnijih recentnih istraživanja koja su proučavala utjecaj kofeina na tjelesno vježbanje i sportsku izvedbu. Kroz nalaze tih istraživanja nastojat će se formulirati i preporuke za konzumaciju kofeina u svrhu akutnog poboljšanja izvedbe u tjelesnom vježbanju i sportu. Ove preporuke mogu biti korisne sportašima i rekreativnim vježbačima zainteresiranim za konzumaciju kofeina u tu svrhu.

Kako pojmovi tjelesno vježbanje i sportska izvedba obuhvaćaju zaista široko područje, ovaj će se rad specifično usmjeriti na akutni učinak kofeina na izvedbu u treningu s otporom. Sukladno tome, prikazat će se istraživanja usmjerena na akutne učinke kofeina na mišićnu jakost i snagu te na mišićnu izdržljivost, što su sve sposobnosti važne za izvedbu raznih motoričkih zadataka kako u okvirima sportskog i rekreativnog treninga i natjecanja tako i u okvirima svakodnevnog života (42,67). Konačno, u tom pravcu će se dati i preporuke za konzumaciju kofeina za sportaše i rekreativne vježbače.

## MEHANIZMI U POZADINI ERGOGENOG UČINKA KOFEINA NA TJELESNU IZVEDBU

Kofein je bijeli prah bez mirisa, ali gorkog okusa. Spada u skupinu biljnih alkaloida. Nakon konzumacije apsorbira se u tijelu gotovo u potpunosti uz prilično veliku brzinu apsorpcije tako da se vršne koncentracije u krvnoj plazmi postižu 30–60 minuta nakon konzumacije (7). Prosječni poluživot kofeina u tijelu procjenjuje se na oko 4–6 sati (7), što konkretno znači da će 4–6 sati nakon konzumacije u tijelu još uvijek biti približno 50% konzumiranog kofeina. Ovo vrijeme poluživota kofeina može biti pod utjecajem raznih čimbenika i jako varirati između pojedinaca pa se tako smatra da je totalni raspon poluživota kofeina od 1,5 do čak 10 sati (7).

Više od 95% konzumiranog kofeina se metabolizira u jetri i to aktivnošću CYP1A2 enzima. Kofein se iz tijela dominantno izlučuje aktivnošću bubrega, dakle, putem urina. Međutim, tijekom tjelesne aktivnosti znojenje postaje važan način eliminacije kofeina iz tijela i procjena je da se u uvjetima tjelesnog vježbanja kofein podjednako izlučuje putem urina i znojenjem (44).

Ključnim mehanizmom putem kojeg konzumacija kofeina akutno poboljšava izvedbu u tjelesnom vježbanju i sportu općenito, a u treningu s otporom specifično, smatra se interakcija kofeina s receptorima adenoizina. Kako je molekularna struktura kofeina slična molekularnoj strukturi adenoizina, nakon konzumacije kofein se u tijelu veže za receptore adenoizina inhibirajući njegovo djelovanje. Ovakvo djelovanje vodi do povećanog otpuštanja neurotransmitera unutar živčanog sustava i povećane brzine aktivacije motoričkih jedinica, te smanjene percepcije umora (6). Sve navedeno za posljedicu može imati poboljšanje tjelesne izvedbe. Ovo je, dakle, mehanizam na razini središnjeg živčanog sustava i taj se mehanizam učinka kofeina na tjelesnu izvedbu smatra dominantnim.

Usprkos dominaciji tog tzv. središnjeg mehanizma utjecaja kofeina, postoje nalazi koji ukazuju da kofein djeluje i lokalno tj. izravno na skeletno mišićje. Iako su ti nalazi dobiveni na životinjskim modelima i sukladno tome treba ih se uzeti s oprezom kad se zaključci prenose na čovjeka, zanimljiva je činjenica da su *in vitro* istraživanja pokazala da primjena kofeina na izolirana mišićna vlakna izravno potencira produkciju mišićne sile. Opres u prijenosu nalaza na čovjeka potreban je i zbog činjenice da su ovakva istraživanja na izoliranim mišićnim vlaknima koristila doze kofeina koje su toksične za ljudsku konzumaciju.

Kao završna misao u kontekstu objašnjenja ergogenog učinka kofeina na tjelesno vježbanje, treba spomenuti da kofein putem spomenutog vezivanja za receptore adenoizina može imati i analgetski učinak tj. može smanjiti percepciju boli. To je uostalom razlog zašto se lijekovima koji spadaju u skupinu nesteroidnih analgetika često dodaje kofein kao sastojak, a samo smanjenje percepcije boli u aktivnom skeletnom mišićju tijekom intenzivne tjelesne aktivnosti

teoretski bi također dijelom moglo objasniti poboljšanje izvedbe nakon konzumacije kofeina. Ipak, za sada se čini da taj mehanizam smanjenja boli nakon konzumacije kofeina i poboljšanje izvedbe u treningu s otporom nema potpunu podršku znanstvenih dokaza (21).

## UČINCI KOFEINA NA MIŠIĆNU JAKOST, SNAGU I IZDRŽLJIVOST

### Akutni učinci kofeina na mišićnu jakost

Mišićna jakost odnosi se na kapacitet mišića za generiranjem maksimalne mišićne sile. Maksimalna mišićna sila može se manifestirati u izotoničkim, izometričkim i izokinetičkim uvjetima mišićnih akcija i stoga su istraživanja akutnih učinaka kofeina na mišićnu jakost usmjerena u pravcu tih vidova jakosti.

U trenažnoj i sportskoj praksi možda i najčešći oblik procjene mišićne jakosti je test jednog maksimalnog ponavljanja (1 RM). Testovima tog tipa nastoji se utvrditi opterećenje u treningu s otporom koje sportaš ili rekreativni vježbač može savladati samo jednom. To su, naravno, uvjeti izotoničke mišićne akcije koji podrazumijevaju koncentrične i ekscentrične mišićne akcije.

Nedavni sveobuhvatni pregledni rad Grgića i suradnika (20) ukazao je da konzumacija kofeina može imati ergogeni učinak na 1RM. Nekoliko istraživanja bavilo se ovom temom, a i naša istraživačka grupa je nedavno ispitivala utjecaj triju doza kofeina (2, 4, 6 mg/kg) na 1RM u vježbama potisak s ravne klupe i čučanj (29). Detektirali smo ergogene učinke kofeina na 1RM u obje vježbe, iako su ti učinci u praktičnom smislu bili mali (Cohenov  $d$ : 0.07–0.15, poboljšanje za 2–3%). Nešto ranije, istražili smo učinke jedinstvene doze kofeina od 6 mg/kg na 1RM u vježbama potisak s ravne klupe i čučanj te uočili poboljšanje u izvedbi 1RM-a u vježbi čučanj za 3% (Cohenov  $d$  = 0.19) (23).

Nalazi naših istraživanja konzistentni su i s nalazima drugih autora koji su nedavno istraživali učinke kofeina na 1RM također u vježbama čučanj i potisak s ravne klupe (13,73). Ova istraživanja su također pokazala da je konzumacija kofeina učinkovita za akutna poboljšanja jakosti. Kofein, dakle, ima potencijal poboljšati jakost mišića donjeg i gornjeg dijela tijela iako je, u praktičnom smislu, to poboljšanje razmjerno malo. Ta mala poboljšanja u mišićnoj jakosti nakon konzumacije kofeina vjerojatno imaju najveću praktičnu značajnost u sportskim aktivnostima kao što su dizanje utega i powerlifting jer su to sportske aktivnosti u kojima je sposobnost mišićne jakosti od presudnog značaja za uspjeh.

Izometričke i, posebice, izokinetičke mišićne akcije rijetke su u uvjetima tjelesnog vježbanja i sportskih natjecanja te se tipično koriste u laboratorijskim uvjetima u svrhu procjene tjelesne izvedbe. Njihova upotreba je također česta u znanstvenim istraživanjima. Jakost u uvjetima izometričkih mišićnih akcija tipično se procjenjuje putem mjerenja maksimalne voljne mišićne sile u izometričkim



uvjetima (eng. *maximal voluntary isometric contraction*, MVIC). Ranija meta analiza Warrena i suradnika (71) pokazala je da konzumacija kofeina može povećati jakost mišića u uvjetima izometričkih mišićnih akcija prosječno za oko 4%. Zanimljivo, ovaj ergogeni učinak kofeina opažan je uglavnom kod velikih mišićnih skupina kao što su ekstenzori potkoljenice, dok kod manjih mišićnih skupina učinak nije bio vidljiv.

Što se tiče istraživanja učinaka kofeina na jakost u uvjetima izokinetičkih mišićnih akcija, meta analiza koja je 2019. godina sažela nalaze ukupno 10 pojedinačnih istraživanja koja su proučavala učinke kofeina na izokinetičku jakost procijenjenu vršnim momentom sile, utvrdila je statistički značajan, no praktično mali ergogeni učinak od 5% uz veličinu učinka (Cohenov  $d$ ) od 0.16 (28). U toj meta analizi Grgića i Pickeringa (28) navedena su i neka ograničenja uočena u istraživanjima ovog tipa: korištenje samo jedne kutne brzine za testiranje, korištenje samo jednog motoričkog zadatka tj. jedne mišićne skupine te, najvažnije, izostanak kontrolnog mjerenja tj. mjerenja bez ikakve konzumacije. Ovo posljednje je posebno značajno jer, da bi se kvantificirali praktični učinci kofeina, izvedbu nakon konzumacije kofeina potrebno je usporediti s izvedbom bez ikakve konzumacije. Naime, sportaši i rekreativni vježbači će ili konzumirati ili neće konzumirati kofein te je iznimno malo vjerojatno da će konzumirati placebo. Nadalje, usporedba kofeina s kontrolnim mjerenjem je također važna jer i izolirana konzumacija placeba može poboljšati izvedbu (47). Teoretski, kada istraživanja koriste samo uvjet konzumacije kofeina te uvjet konzumacije placeba, dolazi do usporedbe dva uvjeta koja oba potencijalno mogu poboljšati izvedbu.

Kako bi nadišli spomenuta ograničenja prethodnih istraživanja, naša grupa istraživala je nedavno učinke kofeina na jakost u uvjetima izokinetičkih mišićnih akcija (32). Ispitanicima smo procjenjivali funkciju mišića prednje i stražnje strane natkoljenice na izokinetičkom aparatu i to pri dvije kutne brzine: 60°/s i 180°/s. Testiranje je obavljeno u tri navrata: nakon konzumacije 6 mg/kg kofeina, nakon konzumacije placeba te bez ikakve konzumacije (kontrolno mjerenje). Pokazatelj jakosti bio je vršni moment sile. Uočili smo da kofein poboljšava jakost ekstenzora potkoljenice (za oko 5-6%) u usporedbi s placeboom te u usporedbi s kontrolnim mjerenjem. Značajnih razlika između placeba i kontrolnog mjerenja nije bilo. Ta poboljšanja bila su evidentna pri obje kutne brzine. Kod mišića fleksora potkoljenice nismo našli ergogene učinke kofeina ni u usporedbi s placeboom ni u usporedbi s kontrolnim mjerenjem. Osim potvrde ergogenih učinaka kofeina na mišićnu jakost, ovo naše istraživanje pokazuje da ipak i placebo predstavlja vrlo dobru usporedbu za procjenu i kvantifikaciju učinaka kofeina na mišićnu jakost.

Temeljem dostupne literature, kofein može imati ergogeni učinak na mišićnu jakost i to u svim uvjetima mišićnih akcija tj. izotoničkih, izometričkih i izokinetičkih mišićnih akcija. Poboljšanja u manifestaciji jakosti koja se

mogu očekivati nakon konzumacije kofeina generalno su u rangu 2-5%.

### Akutni učinci kofeina na eksplozivnu jakost

Pojam jakosti odnosi se na sposobnost generiranja maksimalne mišićne sile unutar okvira zadanog pokreta i to neovisno o komponenti vremena u kojem je ta sila generirana. Kad se komponenta vremena uzme u razmatranje dobijemo eksplozivnu jakost tj. sposobnost generiranja (što veće) mišićne sile u (što kraćem) vremenu.

Eksplozivna jakost se može procjenjivati kroz mjerenje tzv. brzine prirasta sile (eng. *rate of force development*, RFD). Brzina prirasta sile, utvrđeno je, povezana je s motoričkim zadacima koje karakteriziraju kratko vrijeme mišićnih kontrakcija poput skokova, bacanja, udaraca, sprinta, te promjene smjera kretanja (40). Jedna od značajnih determinanti brzine prirasta sile je regrutacija motoričkih jedinica, što je važno jer se pokazalo da kofein može akutno povećati regrutaciju motoričkih jedinica (6).

Provedena istraživanja koja su pokušala utvrditi učinke kofeina na brzinu prirasta sile imala su ukupno gledajući proturječne nalaze. Također, neka od ovih istraživanja su potencijalno imala nedovoljnu statističku snagu za detekciju značajnih razlika jer su uključivala manji broj ispitanika (primjerice 11 ispitanika u radu od Burke i kolega (8)). Jedan od načina da se prevlada taj nedostatak statističke snage u pojedinačnim istraživanjima je da se podaci iz više istraživanja objedine u meta analizi. Stoga smo nedavno objedinili nalaze tih pojedinačnih istraživanja u meta analizi (24) kojom je bilo obuhvaćeno 11 istraživanja koja su se bavila ovom temom, s ukupnim brojem ispitanika od 154.

Utvrđili smo da su pojedinačna istraživanja koja su proučavala učinke kofeina na brzinu prirasta sile koristila doze kofeina u rasponu od 3 do čak 10 mg/kg, a kofein je davan 45-60 minuta prije početka testiranja. Samo testiranje najčešće se sastojalo od mjerenja brzine prirasta sile tijekom izvedbe vježbi s otporom (npr. opružanje potkoljenice na izokinetičkom aparatu ili izometričko povlačenje sa sredine natkoljenice) ili pak tijekom izvedbe vertikalnog obježnog skoka s pripremom.

Ukupno gledajući objedinjeni učinak svih 11 uključenih istraživanja, uočili smo da kofein statistički značajno poboljšava brzinu prirasta sile i to s veličinom učinka od 0.37 (Cohenov  $d$ ). Poboljšanja s ovakvom veličinom učinka najčešće se u praktičnom smislu karakteriziraju kao mala. Zanimljivo, iako smo u dodatnoj analizi utvrdili utjecaj kofeina na brzinu prirasta sile u istraživanjima koja su koristila vježbe s otporom, isto se nije pokazalo u dodatnoj analizi koja je objedinila istraživanja koja su brzinu prirasta sile procjenjivala tijekom izvedbe vertikalnog obježnog skoka s pripremom (24). Jedno od mogućih objašnjenja je činjenica da je brzina prirasta sile kao varijabla puno manje pouzdana od visine skoka. Koeficijent varijacije za brzinu prirasta sile pri izvedbi vertikalnog skoka ima raspon 13-24% (41,64), što može znatno povećati pojavu

tzv. pogreške tipa II u statističkom zaključivanju. Drugim riječima, može dovesti do „lažnog negativnog nalaza“ tj. neuspjeha pri detekciji razlika koje u stvarnosti zaista postoje.

Kako je brzina prirasta sile povezana s raznim motoričkim zadacima specifičnim za određeni sport, prethodno spomenuta poboljšanja u brzini prirasta sile nakon konzumacije kofeina vjerojatno mogu djelomično objasniti i ergogene učinke kofeina na, primjerice, izvedbu balističkih pokreta tipa skokova i bacanja što smo istraživali u našem nedavnom radu (59). Zaista, kad se sveobuhvatno pogledaju istraživanja koja su proučavala učinke kofeina na izvedbu balističkih pokreta tipa skokova (30,61) ili bacanja (5,59), nalazi ukazuju da kofein akutno može poboljšati izvedbu u oba ova tipa balističkih pokreta.

### Akutni učinci kofeina na mišićnu snagu i brzinu pokreta u treningu s otporom

Mišićna snaga jednaka je produktu generirane mišićne sile i brzine izvedbe pokreta ( $P = F \cdot v$ ). Snaga se u području tjelesnog vježbanja i sportskog treninga može izračunavati pri izvedbi vježbi s otporom, a u tu svrhu najčešće se koristi uređaj koji mjeri brzinu izvedbe pokreta. Taj uređaj naziva se linearni pretvornik pomaka (eng. *linear position transducer*). On je povezan sa šipkom i omogućava mjerenje njene brzine kretanja kao i izlaza snage tijekom izvedbe pokreta. Naime, uz poznatu komponentu sile (masa utega koja se savladava pomnožena s gravitacijskim ubrzanjem,  $F = m \cdot g$ ) i uz izmjerenu brzinu pokreta, vrlo se jednostavno izračunava izlaz snage.

Istraživanja akutnog učinka kofeina na mišićnu snagu u treningu s otporom najčešće su koncipirana tako da se sudionicima istraživanja izmjeri mišićna jakost tj. 1RM za konkretni motorički zadatak, a onda se snaga procjenjuje uz opterećenja koja odgovaraju određenom postotku od 1RM (npr. 25% 1RM, 50% 1RM itd.). U tim zadacima ispitanici se upućuju izvoditi koncentričnu fazu pokreta što brže mogu.

Brzinu pokreta pri izvedbi potiska s ravne klupe, u uvjetima nakon konzumacije kofeina, placebo i bez ikakve konzumacije, nedavno je istražila naša grupa (33). U usporedbi s placebom, kofein je poboljšao brzinu pokreta pri opterećenju od 75% te 90% 1RM. U usporedbi s kontrolnim mjerenjem, kofein je imao ergogeni učinak pri opterećenjima od 50%, 75%, te 90% 1RM. Nije bilo razlika u brzini pokreta između placebo i kontrolnog mjerenja, a ergogeni učinci kofeina u odnosu na placebo i na kontrolno mjerenje bili su u rangu veličine učinka 0.29-0.46 (Hedgesov  $g$ ), dok su relativna poboljšanja bila u rangu 4-12%. Zanimljivo, učinci kofeina bili su naglašeniji što je vanjsko opterećenje bilo veće. Tako smo najveće učinke uočili pri 90% 1RM: +9% u usporedbi s placebom i +12% u usporedbi s kontrolnim mjerenjem. Čini se, dakle, da je učinak kofeina na brzinu pokreta u treningu s otporom to veći što su veći zahtjevi za generiranom mišićnom silom

odnosno što je veća masa utega koja se savladava.

Nekoliko nedavnih istraživanja, uključujući i istraživanja naše grupe, također nalazi akutne učinke kofeina na izlaz snage kao i na brzinu pokreta pri izvedbi vježbi čučanj i potisak s ravne klupe i to kroz širok raspon opterećenja od 30% 1RM pa sve do 90% 1RM (10,68,69,72). Meta analiza objavljena 2020. godine zaključuje da kofein ima ergogeni učinak na snagu i brzinu pokreta u treningu s otporom i to pri izvedbi vježbi gornjeg i donjeg dijela tijela (58). Zanimljivo, kumulativna veličina učinka (Cohenov  $d$ ) u toj meta analizi bila je u rasponu od malih do umjerenih (0.41-0.82) što sugerira da kofein, čini se, u treningu s otporom može generirati veće akutne učinke na mišićnu snagu i brzinu pokreta u usporedbi s učincima na mišićnu jakost.

Učinak kofeina na prosječnu snagu u uvjetima izokinetičkih mišićnih akcija istraživala je naša grupa u nedavnom radu (32). Slično kao učinak kofeina na jakost u uvjetima izokinetičkih mišićnih akcija, učinak kofeina bio je evidentan i na snagu prednje skupine mišića natkoljenice pri obje kutne brzine (60°/s i 180°/s) u usporedbi s placebom (Hedgesov  $g = 0.29-0.43$ ; +7-8%) i u usporedbi s kontrolnim mjerenjem (Hedgesov  $g = 0.21-0.36$ ; +5-6%). Nismo opazili ergogene učinke kofeina na snagu stražnje skupine mišića natkoljenice. Ponovo možemo naglasiti, kao što je to bio slučaj s učincima kofeina na jakost u izokinetičkim uvjetima u istom istraživanju (32), da prema našim nalazima placebo predstavlja s praktičnog stajališta relevantnu usporedbu za procjenu i kvantifikaciju učinaka kofeina. Također, i u ovom istraživanju se pokazalo da kofein općenito generira nešto veće akutne učinke na mišićnu snagu u usporedbi s učincima na mišićnu jakost.

### Akutni učinci kofeina na mišićnu izdržljivost

Mišićna izdržljivost odnosi se na sposobnost mišića ili skupine mišića za generiranjem sile radi savladavanja otpora kroz produženo vremensko razdoblje. Mišićna izdržljivost može se manifestirati u uvjetima izotoničkih, izometričkih ili izokinetičkih mišićnih akcija. Tipično se u praksi mišićna izdržljivost procjenjuje kroz vježbe s otporom koje pojedinac izvodi do tzv. trenutnog mišićnog otkaza (eng. *momentary muscular failure*) tj. do trenutka kad je razina akumuliranog lokalnog umora tolika da ne može izvesti još jedno ponavljanje.

Dvije meta analize (56,71) pokazale su da kofein može poboljšati mišićnu izdržljivost, uz veličinu učinka u rasponu 0.28-0.38 (relativna poboljšanja 6-7%). Nedavni pregled Grgića (36) utvrdio je da se ergogeni učinak kofeina manifestira u većini istraživanja koja su kao izvedbenu varijablu promatrala mišićnu izdržljivost. Opažena veličina učinka kroz istraživanja (Cohenov  $d$ ) bila je vrlo varijabilna i iznosila od 0.18 do čak 2.21. Ove promjene u izvedbi kroz istraživanja su, dakle, u praktičnom smislu, u rasponu od trivijalnih pa sve do velikih.

Ako te vrijednosti želimo izraziti kao razlike u aritmetičkim sredinama između kofeina i placeba, kofein najčešće povećava broj ponavljanja u rasponu od jednog do četiri po seriji (36). Zanimljivo, ovi ergogeni učinci čini se nisu u zavisnosti od opterećenja koje se savladava budući da se učinci opažaju kroz cijeli spektar opterećenja: od malih opterećenja kao što je 30% 1RM pa sve do velikih opterećenja kao što je 85% 1RM.

Pored procjene kvantitete tj. broja izvedenih ponavljanja, u posljednje vrijeme istraživači se usmjeravaju i na procjenu kvalitete ponavljanja u treningu s otporom. Procjena kvalitete ponavljanja vrši se pomoću prethodno spomenutog linearnog pretvornika pomaka koji je povezan sa šipkom i koji omogućava mjerenje brzine kretanja šipke kao i, uz poznatu masu utega koja se savladava, izlaza snage tijekom izvedbe pokreta.

Naša istraživačka grupa (26) je provela eksperiment u kojem su ispitanici izvodili ponavljanja do trenutnog mišićnog otkaza u potisku s klupe i to s opterećenjem 85% 1RM. Zadatak je izveden dva puta: nakon konzumacije 3 mg/kg kofeina i nakon konzumacije placeba. Utvrdili smo da su ispitanici nakon konzumacije kofeina imali u prosjeku izvedeno jedno ponavljanje više naspram nakon konzumacije placeba (dakle, veća kvantiteta ponavljanja). Isto tako, utvrdili smo da su nakon konzumacije kofeina ispitanici imali i veću prosječnu brzinu i veću prosječnu izlaznu snagu pojedinačnih ponavljanja u usporedbi s ponavljanjima nakon konzumacije placeba (dakle, veća kvaliteta ponavljanja). Slični nalazi u pogledu veće kvalitete ponavljanja (tj. veće prosječne brzine i snage) nakon konzumacije kofeina dobiveni su i u istraživanju Giraldez-Costasa i suradnika (15). Navedeno je značajno s praktičnog stajališta jer je za neke trenažne prilagodbe kvaliteta izvedbe ponavljanja važnija od kvantitete.

Učinke kofeina na mišićnu izdržljivost u uvjetima izokinetičkih mišićnih akcija istraživali smo nedavno u našem radu (32) i to kroz procjenu ukupno obavljenog rada pri zadatku ekstenzije i fleksije potkoljenice u zglobu koljena na izokinetičkom aparatu pri kutnim brzinama od 60°/s i 180°/s. Iako je pri kutnoj brzini od 60°/s obavljeni rad mišića ekstenzora potkoljenice bio veći nakon konzumacije kofeina u usporedbi s placebom i s kontrolnim mjerenjem, razlike se nisu pokazale statistički značajnima. S druge strane, ergogeni učinak kofeina na mišićne ekstenzore potkoljenice bio je statistički značajan pri 180°/s gdje je konzumacija kofeina poboljšala izvedbu i u usporedbi s placebom (Hedgesov  $g = 0.36$ ; +6%) i u usporedbi s kontrolnim mjerenjem (Hedgesov  $g = 0.33$ ; +6%).

Zaključno, trenutni dokazi sugeriraju da konzumacija kofeina ima ergogene učinke na mišićnu izdržljivost i da su ti učinci evidentni i konzistentni kroz razne vježbe s otporom, razne razine opterećenja, razne režime mišićnih akcija te protokole serija (izvedba jedne naspram izvedba višestrukih serija).

## IMA LI RAZLIKA U UČINCIMA KOFEINA NA TJELESNU IZVEDBU IZMEĐU OSOBA MUŠKOG I ŽENSKOG SPOLA?

Treba spomenuti da su u znatnoj većini istraživanja na temu kofeina i vježbanja uzorak ispitanika činile osobe muškog spola. Ovo je značajno jer se zaključci odnose na tu populaciju i treba biti vrlo oprezan u širenju zaključaka o utjecaju kofeina na tjelesnu izvedbu na osobe ženskog spola. Nedavno je opaženo (61) da je, ukupno gledajući, tek nešto više od 10% sudionika u istraživanjima utjecaja kofeina na tjelesnu izvedbu bilo ženskog spola.

Ipak, recentna istraživanja uvažavaju ovo ograničenje i regrutiraju osobe ženskog spola u istraživanja učinaka kofeina na tjelesnu izvedbu općenito kao i na izvedbu u treningu s otporom specifično. Prema nedavnom preglednom radu Grgića (36), kofein ima ergogene učinke na izvedbu u treningu s otporom i kod osoba ženskog spola i čini se da je veličina učinka u tim istraživanjima vrlo slična veličini učinka koja se opaža u osoba muškog spola. Primjerice, Norum i kolege (51) su nedavno istraživali akutni utjecaj kofeina u dozi od 4 mg/kg na razne aspekte mišićne izvedbe (jakost, izdržljivost, brzinu, snagu) u grupi od 15 žena koje su imale prethodnog iskustva u treningu s otporom. Konzumacija kofeina u ovoj grupi ispitanica je akutno poboljšala izotoničku i izometričku jakost, mišićnu izdržljivost, te snagu. Relativna poboljšanja nakon konzumacije kofeina bila su u rasponu od 3% do 16%, što je skoro pa identično poboljšanjima nakon konzumacije kofeina koja su evidentna u grupama muških ispitanika.

Postoji nekoliko metodoloških pitanja o kojima treba voditi računa kad uzorak ispitanika čine osobe ženskog spola. Jedno od tih pitanja je i pretpostavka da faza menstrualnog ciklusa može imati učinak na metabolizam kofeina u tijelu (45). Naime, ranija istraživanja su pokazala da faza menstrualnog ciklusa može utjecati na metabolizam kofeina, jer može doći do sporije apsorpcije kofeina u lutealnoj fazi menstrualnog ciklusa (45). Ipak, kasnija istraživanja su sugerirala da faza menstrualnog ciklusa zapravo ne utječe na metabolizam kofeina (43). U prethodno spomenutom radu od Noruma i kolega (51) sva testiranja su rađena tijekom folikularne faze menstrualnog ciklusa. Drugi radovi nisu standardizirali testiranje prema fazi menstrualnog ciklusa, ali su također zabilježili ergogene učinke kofeina (70). Tjelesna izvedba kod žena varira sukladno fazi menstrualnog ciklusa te se generalno smatra da je najniža tijekom folikularne faze (48). Sukladno tome, postoji mogućnost da će učinci stimulansa kao što je kofein biti najveći upravo u folikularnoj fazi. Ipak, daljnja istraživanja su potrebna u svrhu davanja jasnijeg uvida u pitanje utjecaja faza menstrualnog ciklusa na akutne učinke kofeina.



## POVEZANOST HABITUALNE KONZUMACIJA KOFEINA I AKUTNIH ERGOGENIH UČINAKA KOFEINA

Intuitivno, može se pretpostaviti da osobe koje imaju viši habitualni unos kofeina kroz dan (npr. putem češće konzumacije kave i drugih prehrambenih proizvoda koji sadrže kofein) stvaraju određenu razinu tolerancije na kofein. Sukladno tome, kod takvih osoba ergogeni učinak konzumacije kofeina na tjelesnu izvedbu može biti umanjen naspram osoba čija je habitualna konzumacija kofeina niska ili jednaka nuli. Dodatno, nalazi na životinjskim modelima ukazuju da je dugotrajna konzumacija kofeina zaista povezana s povećanjem broja receptora adenoizina odnosno da dolazi do određenih fizioloških adaptacija koje bi mogle činiti mehanizam u podlozi spomenute tolerancije na kofein.

U našem preglednom radu o učincima kofeina na izvedbu u treningu s otporom iz 2019. godine (21), pretragom literature zaključili smo da habitualna konzumacija kofeina, čini se, nema utjecaja na ergogene učinke akutne suplementacije kofeinom, uz napomenu da postoje neka pojedinačna istraživanja koja su pokazala suprotno. Prema tome, iako literatura velikom većinom upućuje na to da habitualna konzumacija kofeina ne smanjuje ergogene učinke suplementacije kofeinom, moguće je da sportaši i rekreativni vježbači koji dnevno konzumiraju veće količine kofeina (tj. imaju viši habitualni unos kofeina kroz dan) ipak trebaju veću dozu za postizanje istog akutnog ergogenog učinka.

Jedan naš rad u kojem smo se bavili temom habitualne konzumacije kofeina u odnosu na akutne ergogene učinke kofeina pokazao je, kao i većina literature, da habitualni unos kofeina nema utjecaj na akutne učinke suplementacije kofeinom na izvedbu u treningu s otporom (22). Ispitanike smo podijelili na niske, srednje i visoke habitualne konzumente kofeina, međutim, razlika u mišićnoj snazi, brzini pokreta ili pak mišićnoj izdržljivosti pri izvedbi potiska s ravne klupe nakon konzumacije kofeina između ove tri grupe nije bilo.

Upravo u vrijeme pisanja ovog rada, objavljen je i pregledni rad s meta analizom 60 radova koji su proučavali akutne učinke konzumacije kofeina u kontekstu habitualne konzumacije kofeina (9). Glavni nalaz ovog rada je da se kofein pokazao ergogenim za mišićnu jakost, snagu i izdržljivost, dok habitualna konzumacija kofeina nije utjecala na veličinu tog akutnog učinka.

Dakle, u ovom trenutku literatura ukazuje da habitualni unos kofeina nije povezan s veličinom učinka kofeina na tjelesnu izvedbu pri akutnoj suplementaciji. Ipak, davanje čvrstog zaključka po ovom pitanju će ipak malo pričekati jer je kvantifikacija habitualnog unosa kofeina kod sudionika istraživanja ovog tipa prilično otežana. Habitualni unos kofeina se, naime, procjenjuje putem upitnika koji ispitanici sami popunjavaju, temelji se na njihovom prisjećanju koje namirnice su i u kojoj količini konzumirali, a i sam sadržaj

kofeina u pojedinim namirnicama može značajno varirati (54). Sve skupa može činiti ovu kvantifikaciju habitualnog unosa kofeina manje pouzdanom pa su stoga evidentna ograničenja zaključaka o habitualnom unosu kofeina u kontekstu ergogenih učinaka suplementacije kofeinom.

## POSTOJI LI PLACEBO UČINAK PRI KONZUMACIJI KOFEINA?

Standard za provedbu istraživanja utjecaja kofeina na tjelesnu izvedbu je tzv. dvostruko-slijepi dizajn eksperimentalnog postupka. To znači da niti ispitanici niti istraživači ne znaju nalazi li se u kapsuli koju će ispitanik konzumirati prije testiranja kofein ili placebo. O tome brigu vodi treća osoba i tek nakon završetka istraživanja eksperimentalni pokus se „odsljepljuje“.

Placebo učinak je pozitivan ishod (dakle, poboljšanje tjelesne izvedbe) koji se ne može pripisati samoj intervenciji (dakle, konzumaciji kofeina), nego je taj pozitivan ishod uzrokovan mišljenjem pojedinca da je primio samu intervenciju (dakle, mišljenju da je konzumirao kofein). Na primjer, pojedinac konzumira kapsulu s nedjelatnom tvari - malom količinom brašna ili šećera - ali smatra da je konzumirao kofein i ima poboljšanje tjelesne izvedbe kao posljedicu ovog uvjerenja.

Neka istraživanja (4,62) utjecaja kofeina na tjelesnu izvedbu u području sportova tipa aerobne izdržljivosti zaista pokazuju da uvjerenje pojedinca da je konzumirao kofein poboljšava tjelesnu izvedbu i povrh samog fiziološkog učinka kofeina. U suprotnosti, uvjerenje da je konzumiran placebo vodi do mogućih negativnih učinaka na tjelesnu izvedbu.

Naša istraživačka grupa objavila je nedavno dva istraživanja (33,68) utjecaja kofeina na mišićnu jakost i izdržljivost, te na brzinu izvedbe pokreta. U oba istraživanja smo utvrdili poboljšanje izvedbe nakon konzumacije kofeina u usporedbi s izvedbom nakon konzumacije placeba i u usporedbi s kontrolnim mjerenjem (mjerenjem bez ikakve konzumacije). Dodatno, nismo našli razlike između izvedbe nakon konzumacije placeba naspram kontrolne izvedbe.

Dva nedavna istraživanja (51,65) napravila su usporedbu između ispitanika koji su ispravno identificirali konzumirani kofein i ispitanika koji nisu ispravno identificirali konzumirani kofein. Jedno istraživanje (51) nije utvrdilo razlike u veličini ergogenog učinka kofeina, drugo (65) da su ispitanici koji su ispravno identificirali kofein imali veća poboljšanja u izvedbi naspram ispitanika koji nisu ispravno identificirali kofein.

Zanimljiv dizajn su koristili Polito i kolege (55) koji su istraživali utjecaj kofeina na mišićnu izdržljivost. U ovom radu, ispitanici su radili serije do mišićnog otkaza na kontrolom mjerenju, te nakon konzumacije 3 mg/kg ili 6 mg/kg. Istraživači su rekli ispitanicima da će jedna od dvije doze kofeina biti zapravo placebo (iako nije bio) a druga kofein. Iako su ispitanici radili testiranja misleći da su u jednom trenutku konzumirali placebo, jednaka poboljšanja (u usporedbi s kontrolom) su dobivena s obje doze kofeina.

Zaključno, iako su ergogeni učinci kofeina na tjelesnu izvedbu tipa mišićne jakosti, snage i izdržljivosti svakako dominantno determinirani fiziološkim mehanizmima djelovanja kofeina, jedan manji dio ovih ergogenih učinaka možda se može pripisati i placebo učinku.

## INTER-INDIVIDUALNE RAZLIKE U ODGOVORIMA NA KOFEIN

Iako istraživanja učinaka kofeina na tjelesnu izvedbu najčešće jasno ukazuju na ergogeni potencijal kofeina, vrlo često se u tim istraživanjima očituju i znatna variranja u odgovorima na kofein između sudionika u istraživanju. Drugim riječima, iako u prosjeku kofein poboljšava tjelesnu izvedbu, kad se pogledaju individualni rezultati pojedinih sudionika istraživanja, najčešće se opaža da je kofein kod većine poboljšao izvedbu. Ipak, kod nekih sudionika izvedba nakon konzumacije kofeina je jednaka izvedbi nakon konzumacije placeba. Nadalje, kod nekih sudionika se čak opaža i ergolitičko djelovanje kofeina tj. niža razina tjelesne izvedbe nakon konzumacije kofeina u usporedbi s izvedbom nakon konzumacije placeba.

U objašnjenju ovih inter-individualnih razlika u odgovorima na kofein najčešće se u literaturi spominje genetika. Naime, postoje pretpostavke da bi osobe koje iskuse ergogene učinke kofeina po konzumaciji (tzv. responderi na kofein) i osobe koje ih ne iskuse (tzv. ne-responderi na kofein) mogle imati specifičnosti po polimorfizmima unutar dva gena: *CYP1A2* i *ADORA2A*.

Ipak, kad se pogledaju nalazi istraživanja koja su promatrala učinke kofeina obzirom na genotipske varijacije, većina (26,49,66) iako ne sva (57) istraživanja ukazuje da varijacije unutar *CYP1A2* genotipa ipak ne moduliraju ergogene učinke kofeina na mišićnu jakost, snagu i izdržljivost. Slični su nalazi (25) i za polimorfizme unutar *ADORA2A* genotipa – u ovom trenutku nema dovoljno dokaza da bi varijacije genotipa mogle objasniti individualne razlike u odgovorima na kofein kada je riječ o ishodima jakosti, izdržljivosti, te snage.

Neovisno o uzrocima ovih variranja u fiziološkom odgovoru svakog sportaša i rekreativnog vježbača na kofein, ostaje činjenica da kroz trening treba ispitati odgovor svakog pojedinca na razne doze kofeina i kao i moguće nuspojave. Nakon toga, odluke koje se donose glede suplementacije kofeinom bi trebale biti individualizirane za svakog sportaša odnosno rekreativnog vježbača.

## PREPORUKE ZA KONZUMACIJU KOFEINA U SVRHU POBOLJŠANJA MIŠIĆNE JAKOSTI, SNAGE I IZDRŽLJIVOSTI

### Doza

Općenito preporučena doza kofeina za postizanje optimalnih ergogenih učinaka nalazi se u rasponu 3-6 mg/kg (20).

Naša istraživačka grupa nedavno je provela istraživanje utjecaja triju doza kofeina (2, 4 i 6 mg/kg) na jakost i mišićnu izdržljivost (29). Nismo našli razlike u učinkovitosti između doza za mišićnu izdržljivost mišića donjeg dijela tijela – sve tri doze bile su podjednako učinkovite – dok nije bilo učinka za mišićnu izdržljivost gornjeg dijela tijela. Za jakost donjeg dijela tijela samo je doza od 2 mg/kg bila učinkovita, dok su za jakost donjeg dijela tijela doze od 4 i 6 mg/kg bile učinkovite. Druga recentna istraživanja (10,13,55,73) uspoređivala su različite doze, tipično 3 naspram 6 mg/kg. Generalni nalaz u tim istraživanjima bio je da su obje doze kofeina imale sličan učinak na tjelesnu izvedbu.

Najviše pojedinačne doze kofeina korištene u istraživanjima ovog tipa čini se da iznose čak 9-11 mg/kg (73). Iako su nađeni ergogeni učinci i kod tako visokih doza, upitna je njihova primjenjivost jer se više doze kofeina tipično povezuju s izraženijim i češćim nuspojavama (52). S druge strane, razmjerno niske doze kofeina od 1.5-2 mg/kg također mogu proizvesti akutni ergogeni učinak (70).

Zaključno, doze kofeina od otprilike 1.5 mg/kg pa sve do 11 mg/kg mogu poboljšati tjelesnu izvedbu. Incidencija nuspojava je ipak osjetno manja (u nekim slučajevima nepostojeća) prilikom konzumacije doza do otprilike 3 mg/kg. Dakle, barem u početku, može se savjetovati konzumacija nižih doza kofeina jer će ergogeni učinci vrlo vjerojatno biti u rangu onih dobivenih kod viših i visokih doza, no uz znatno smanjenu incidenciju nuspojava.

### Oblik

Kofein se sudionicima istraživanja najčešće daje u obliku praha u kapsulama ili u obliku praha otopljenog u tekućini. Zadnjih godina sve je veći interes istraživača za istraživanjem učinaka kofeina iz drugih izvora: guma za žvakanje, gelova, energetskih pića te tekućina za ispiranje usta. Neki od ovih izvora kofeina su posebno zanimljivi za sportsku praksu jer omogućavaju bržu apsorpciju kofeina u tijelu i, prema tome, pružaju mogućnost bržeg djelovanja.

Primjerice, žvakanje gume za žvakanje obogaćene kofeinom ima za posljedicu dostavu kofeina do krvotoka kroz iznimno vaskulariziranu usnu šupljinu. Mi smo u našem istraživanju (68) uočili ergogene učinke kofeina iz gume za žvakanje na visinu vertikalnog skoka, izokinetičku jakost mišića nogu, snagu mišića gornjeg dijela tijela kao i snagu mišića cijelog tijela kroz test na veslačkom ergometru. Ono što je naročito značajno u ovom radu je da smo ergogene učinke uočili već 10 minuta nakon konzumacije ovakve gume za žvakanje. Ovaj nalaz je naročito zanimljiv jer se konzumacija kofeina u kapsulama preporučuje 30 do 60 minuta prije tjelesne aktivnosti. Dakle, žvakaće gume s kofeinom mogu polučiti brži učinak, koji može biti vidljiv već unutar 10 minuta nakon konzumacije.

Slično ovim nalazima, u našem drugom istraživanju učinaka kofeina iz alternativnih izvora (67) uočili smo da nakon konzumacije gela obogaćenog kofeinom sudionici istraživanja poboljšavaju izvedbu skoka, jakost i snagu i



to s ergogenim učincima evidentnim opet već 10 minuta nakon konzumacije.

Treba naravno spomenuti i kavu kao najčešće korišteni izvor kofeina općenito u svijetu. Istraživanja učinaka kave na sportsku izvedbu su malobrojna iz razloga što količina kofeina u kavi može jako varirati, no istraživanja koja jesu provedena upućuju na zaključak da je kava vrlo vjerojatno učinkovito sredstvo poboljšanja sportske izvedbe (53). Jedna šalica kave sadrži, u prosjeku, 100-120 mg kofeina te prema tome dvije šalice kave za osobu tjelesne mase 80 kg daju dozu od oko 3 mg/kg kofeina, što je u rangui preporučene doze za akutni ergogeni učinak uz izostanak ili uz minimum nuspojava.

Zaključno, oblik tj. izvor kofeina za konzumaciju je, čini se, pitanje osobnih preferencija jer nije moguće tvrditi da učinkovitost kofeina kao ergogenog sredstva ovisi o izvoru iz kojeg je kofein konzumiran. Treba naravno voditi računa o činjenici da je farmakokinetika kofeina različita u ovisnosti o izvoru - npr. gume za žvakanje omogućuju apsorpciju kofeina već u usnoj šupljini i stoga očekivano bržu ukupnu apsorpciju kofeina u tijelu. To znači da gume za žvakanje obogaćene kofeinom pružaju mogućnost bržeg djelovanja naspram npr. kofeina u kapsulama pri kojima se kofein apsorbira isključivo kroz sluznicu želuca.

## Vrijeme konzumacije

Što se tiče idealnog vremena konzumacije kofeina, treba podsjetiti da se vršne vrijednosti koncentracije kofeina u plazmi postižu 30-60 minuta nakon konzumacije, pa konzumaciju treba tempirati s tom činjenicom na umu. Ipak, ovo vrijeme postizanja vršne koncentracije može varirati ovisno o izvoru kofeina, praznom ili punom želucu, te može osjetno varirati od osobe do osobe.

Jedno recentno istraživanje (39) je uspoređivalo učinke kofeina konzumiranog 30, 60 i 120 minuta prije testiranja mišićne jakosti. Najveći učinci zabilježeni su konzumacijom kofeina 60 minuta uoči testiranja, vjerojatno stoga što što je koncentracija kofeina u plazmi najviša približno u tom trenutku.

Preporuka vremenske konzumacije kofeina bila bi, dakle, 30-60 minuta uoči treninga ili natjecanja, uz opasku

da se s korištenjem guma za žvakanje ili gelova već 10-15 minuta nakon konzumacije uočavaju ergogeni učinci kofeina (68,69).

## ZAKLJUČCI

Kofein je najčešće korišteni dodatak prehrani u svrhu poboljšanja tjelesne izvedbe u domeni sporta i rekreativnog vježbanja. U ovom trenutku može se tvrditi da postoje uvjerljivi znanstveni dokazi da konzumacija kofeina može poboljšati izvedbu u treningu s otporom. Konkretno, konzumacijom kofeina moguće je akutno povećati mehanički izlaz mišića u treningu s otporom kroz poboljšanja mišićne jakosti, mišićne snage i brzine pokreta, te mišićne izdržljivosti.

Generalno, čini se da nema razlika između osoba muškog i ženskog spola u veličinama ergogenog učinka kofeina. Iako su fiziološki mehanizmi dominantni u objašnjenju učinaka, moguće je da i tzv. placebo učinak objašnjava jedan manji dio poboljšanja tjelesne izvedbe nakon konzumacije kofeina. Primarnim fiziološkim mehanizmom koji objašnjava ergogeni učinak kofeina smatra se vezanje kofeina za receptore adenoizina.

Kofein se najčešće konzumira u obliku kapsula zbog mogućnosti egzaktnog doziranja, međutim, kofein iz tzv. alternativnih izvori poput gume za žvakanje, gela ili kave također ima ergogene učinke na tjelesnu izvedbu. Dodatna prednost kofeina iz gume za žvakanje ili gela je činjenica da se već kroz 10 minuta nakon konzumacije očituju spomenuti ergogeni učinci. Habitualna konzumacija kofeina, čini se, nema učinaka na veličinu akutnog ergogenog učinka kofeina.

Kofein može proizvesti ergogeni učinak već u dozi od 1.5 mg/kg tjelesne mase, a relativno niske doze od 2-3 mg/kg su, čini se, podjednako učinkovite kao i više doze (npr. 6 mg/kg). Ovo je značajno kad se u obzir uzme da više doze kofeina generiraju i veću mogućnost popratnih nuspojava. U svakom slučaju važno je imati na umu da odgovori na kofein od vježbača do vježbača mogu znatno varirati. Prema tome, za sve vježbače i sportaše zainteresirane za suplementaciju kofeinom preporuka je početi s konzumacijom nižih doza i pratiti tjelesnu izvedbu u odnosu na moguće nuspojave.

## Literatura

1. Aguilar-Navarro M, Munoz G, Salinero JJ i sur. Urine caffeine concentration in doping control samples from 2004 to 2015. *Nutrients*. 2019;11(2).
2. Bailey RL, Saldanha LG, Dwyer JT. Estimating caffeine intake from energy drinks and dietary supplements in the United States [published correction appears in *Nutr Rev*. 2014 Nov;72(11):735. Gahche, Jamie J [removed]]. *Nutr Rev*. 2014;72 Suppl 1(Suppl 1):9-13. doi:10.1111/nure.12138
3. Barreto G, Loureiro LMR, Reis CEG i sur. Effects of caffeine chewing gum supplementation on exercise performance: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Sport Sci*. 2022;1-12. doi:10.1080/17461391.2022.2049885
4. Beedie CJ, Stuart EM, Coleman DA i sur. Placebo effects of caffeine on cycling performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2006;38(12):2159-64. doi:10.1249/01.mss.0000233805.56315.a9
5. Bellar DM, Kamimori G, Judge L i sur. Effects of low-dose caffeine supplementation on early morning performance in the standing shot put throw. *Eur J Sport Sci*. 2012;12:57-61. doi: 10.1080/17461391.2010.536585
6. Black CD, Waddell DE, Gonglach AR. Caffeine's Ergogenic Effects on Cycling: Neuromuscular and Perceptual Factors. *Med Sci Sports Exerc*. 2015;47(6):1145-58. doi:10.1249/MSS.0000000000000513
7. Blanchard J, Sawers SJ. The absolute bioavailability of caffeine in man. *Eur J Clin Pharmacol*. 1983;24(1):93-8. doi:10.1007/BF00613933
8. Burke BI, Travis SK, Gentles JA i sur. The Effects of Caffeine on Jumping Performance and Maximal Strength in Female Collegiate Athletes. *Nutrients*. 2021;13(8):2496. doi:10.3390/nu13082496
9. Carvalho A, Marticorena FM, Grecco BH i sur. Can I Have My Coffee and Drink It? A Systematic Review and Meta-analysis to Determine Whether Habitual Caffeine Consumption Affects the Ergogenic Effect of Caffeine. *Sports Med*. 2022;52(9):2209-20. doi:10.1007/s40279-022-01685-0
10. Degrange T, Jackson WA, Williams TD i sur. Acute Caffeine Ingestion Increases Velocity and Power in Upper and Lower Body Free-Weight Resistance Exercises. *Int J Exerc Sci*. 2019;12:1280-89.
11. Del Coso J, Munoz G, Munoz-Guerra J. Prevalence of caffeine use in elite athletes following its removal from the World Anti-Doping Agency list of banned substances. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2011;36(4):555–61.
12. Ferreira TT, da Silva JVF, Bueno NB. Effects of caffeine supplementation on muscle endurance, maximum strength, and perceived exertion in adults submitted to strength training: a systematic review and meta-analyses. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2021;61(15):2587-2600. doi:10.1080/10408398.2020.1781051
13. Filip-Stachnik A, Wilk M, Krzysztofik M i sur. The effects of different doses of caffeine on maximal strength and strength-endurance in women habituated to caffeine. *J Int Soc Sports Nutr*. 2021;18(1):25. doi:10.1186/s12970-021-00421-9
14. Fulgoni VL 3rd, Keast DR, Lieberman HR. Trends in intake and sources of caffeine in the diets of US adults: 2001-2010. *Am J Clin Nutr*. 2015;101(5):1081-87. doi:10.3945/ajcn.113.080077
15. Giráldez-Costas V, González-García J, Lara B i sur. Caffeine Increases Muscle Performance During a Bench Press Training Session. *J Hum Kinet*. 2020;74:185-93. 31. doi:10.2478/hukin-2020-0024
16. Gomez-Bruton A, Marin-Puyalto J, Muñoz-Pardos B i sur. Does Acute Caffeine Supplementation Improve Physical Performance in Female Team-Sport Athletes? Evidence from a Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*. 2021;13(10):3663. doi:10.3390/nu13103663
17. Grgic J, Del Coso J. Ergogenic Effects of Acute Caffeine Intake on Muscular Endurance and Muscular Strength in Women: A Meta-Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(11):5773. doi:10.3390/ijerph18115773
18. Grgic J, Del Coso J. Ergogenic Effects of Acute Caffeine Intake on Muscular Endurance and Muscular Strength in Women: A Meta-Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(11):5773. doi:10.3390/ijerph18115773
19. Grgic J, Diaz-Lara FJ, Coso JD i sur. The Effects of Caffeine Ingestion on Measures of Rowing Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*. 2020;12(2):434. doi:10.3390/nu12020434
20. Grgic J, Grgic I, Pickering C i sur. Wake up and smell the coffee: caffeine supplementation and exercise performance-an umbrella review of 21 published meta-analyses. *Br J Sports Med*. 2020;54(11):681-8. doi:10.1136/bjsports-2018-100278
21. Grgic J, Mikulic P, Schoenfeld BJ i sur. The Influence of Caffeine Supplementation on Resistance Exercise: A Review. *Sports Med* 49, 17–30 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0997-y>
22. Grgic J, Mikulic P. Acute effects of caffeine supplementation on resistance exercise, jumping, and Wingate performance: no influence of habitual caffeine intake. *Eur J Sport Sci*. 2021;21(8):1165-75. doi:10.1080/17461391.2020.1817155
23. Grgic J, Mikulic P. Caffeine ingestion acutely enhances muscular strength and power but not muscular endurance in resistance-trained men. *Eur J Sport Sci*. 2017;17(8):1029-36. doi:10.1080/17461391.2017.1330362
24. Grgic J, Mikulic P. Effects of caffeine on rate of force development: A meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*. 2022;32(4):644-53. doi:10.1111/sms.14109
25. Grgic J, Pickering C, Bishop DJ i sur. ADOR2A C Allele Carriers Exhibit Ergogenic Responses to Caffeine Supplementation. *Nutrients*. 2020;12(3):741. doi:10.3390/nu12030741

26. Grgic J, Pickering C, Bishop DJ i sur. CYP1A2 genotype and acute effects of caffeine on resistance exercise, jumping, and sprinting performance. *J Int Soc Sports Nutr.* 2020;17(1):21. doi:10.1186/s12970-020-00349-6
27. Grgic J, Pickering C, Del Coso J i sur. CYP1A2 genotype and acute ergogenic effects of caffeine intake on exercise performance: a systematic review. *Eur J Nutr.* 2021;60(3):1181-95. doi:10.1007/s00394-020-02427-6
28. Grgic J, Pickering C. The effects of caffeine ingestion on isokinetic muscular strength: A meta-analysis. *J Sci Med Sport.* 2019;22(3):353-60. doi:10.1016/j.jsams.2018.08.016
29. Grgic J, Sabol F, Venier S i sur. What Dose of Caffeine to Use: Acute Effects of 3 Doses of Caffeine on Muscle Endurance and Strength. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;1-8. doi:10.1123/ijsp.2019-0433
30. Grgic J, Trexler ET, Lazinica B i sur. Effects of caffeine intake on muscle strength and power: a systematic review and meta-analysis. *J Int Soc Sports Nutr.* 2018;15:11. doi:10.1186/s12970-018-0216-0
31. Grgic J, Varovic D. Ergogenic Effects of Caffeine on Ballistic (Throwing) Performance: A Meta-Analytical Review. *Nutrients.* 2022;14(19):4155. doi:10.3390/nu14194155
32. Grgic J, Venier S, Mikulic P. Examining the Effects of Caffeine on Isokinetic Strength, Power, and Endurance. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2022; 7(4):71. <https://doi.org/10.3390/jfmk7040071>
33. Grgic J, Venier S, Schoenfeld BJ i sur. Caffeine Ingestion Enhances Repetition Velocity in Resistance Exercise: A Randomized, Crossover, Double-Blind Study Involving Control and Placebo Conditions. *J Hum Kinet.* 2020;74:177-183. doi:10.2478/hukin-2020-0023
34. Grgic J. Caffeine ingestion enhances Wingate performance: a meta-analysis. *Eur J Sport Sci.* 2018;18(2):219-25. doi:10.1080/17461391.2017.1394371
35. Grgic J. Effects of caffeine on isometric handgrip strength: A meta-analysis. *Clin Nutr ESPEN.* 2022;47:89-95. doi:10.1016/j.clnesp.2021.12.007
36. Grgic J. Effects of Caffeine on Resistance Exercise: A Review of Recent Research. *Sports Med.* 2021;51(11):2281-98. doi:10.1007/s40279-021-01521-x
37. Grgic J. Exploring the minimum ergogenic dose of caffeine on resistance exercise performance: A meta-analytic approach. *Nutrition.* 2022;97:111604. doi:10.1016/j.nut.2022.111604
38. Guest NS, VanDusseldorp TA, Nelson MT i sur. International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance. *J Int Soc Sports Nutr.* 2021;18(1):1. doi:10.1186/s12970-020-00383-4
39. Harty PS, Zabriskie HA, Stecker RA i sur. Caffeine Timing Improves Lower-Body Muscular Performance: A Randomized Trial. *Front Nutr.* 2020;7:585900. doi:10.3389/fnut.2020.585900
40. Hernández-Davó JL, Sabido R. Rate of force development: reliability, improvements and influence on performance. A review. *Eur J Hum Mov.* 2014;33:46-69.
41. Hori N, Newton RU, Kawamori N i sur. Reliability of performance measurements derived from ground reaction force data during countermovement jump and the influence of sampling frequency. *J Strength Cond Res.* 2009;23(3):874-82. doi:10.1519/JSC.0b013e3181a00ca2
42. Hrudá KV, Hicks AL, McCartney N. Training for muscle power in older adults: effects on functional abilities. *Can J Appl Physiol.* 2003;28(2):178-89. doi:10.1139/h03-014
43. Kamimori GH, Joubert A, Otterstetter R i sur. The effect of the menstrual cycle on the pharmacokinetics of caffeine in normal, healthy eumenorrheic females. *Eur J Clin Pharmacol.* 1999;55(6):445-9. doi:10.1007/s002280050654
44. Kovacs EM, Stegen JHCH, Brouns F. Effect of caffeinated drinks on substrate metabolism, caffeine excretion, and performance. *J Appl Physiol (1985).* 1998;85(2):709-15. doi:10.1152/jappl.1998.85.2.709
45. Lane JD, Steege JF, Rupp SL i sur. Menstrual cycle effects on caffeine elimination in the human female. *Eur J Clin Pharmacol.* 1992;43(5):543-46. doi:10.1007/BF02285099
46. Loy BD, O'Connor PJ, Lindheimer JB i sur. Caffeine is ergogenic for adenosine A2A receptor gene (ADORA2A) T allele homozygotes: A pilot study. *J. Caffeine Res.* 2015;5:73–81. doi: 10.1089/jcr.2014.0035.
47. Marticorena FM, Carvalho A, Oliveira LF i sur. Nonplacebo Controls to Determine the Magnitude of Ergogenic Interventions: A Systematic Review and Meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 2021;53(8):1766-77. doi:10.1249/MSS.0000000000002635
48. McNulty KL, Elliott-Sale KJ, Dolan E i sur. The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrheic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* 2020;50(10):1813-27. doi:10.1007/s40279-020-01319-3
49. Muñoz A, López-Samanes Á, Aguilar-Navarro M i sur. Effects of CYP1A2 and ADORA2A Genotypes on the Ergogenic Response to Caffeine in Professional Handball Players. *Genes (Basel).* 2020;11(8):933. doi:10.3390/genes11080933
50. Naulleau C, Jeker D, Pancrate T i sur. Effect of Pre-Exercise Caffeine Intake on Endurance Performance and Core Temperature Regulation During Exercise in the Heat: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Med.* 2022;52(10):2431-45. doi:10.1007/s40279-022-01692-1
51. Norum M, Risvang LC, Bjørnsten T i sur. Caffeine increases strength and power performance in resistance-trained females during early follicular phase. *Scand J Med Sci Sports.* 2020;30(11):2116-29. doi:10.1111/sms.13776
52. Pallarés JG, Fernández-Elías VE, Ortega JF i sur. Neuromuscular responses to incremental caffeine doses: performance and side effects. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45(11):2184-92. doi:10.1249/MSS.0b013e31829a6672
53. Pickering C, Grgic J. Is Coffee a Useful Source of Caffeine Preexercise?. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2020;30(1):69-82. doi:10.1123/ijsnem.2019-0092



54. Pickering C, Kiely J. What Should We Do About Habitual Caffeine Use in Athletes?. *Sports Med.* 2019;49(6):833-42. doi:10.1007/s40279-018-0980-7
55. Polito MD, Grandolfi K, de Souza DB. Caffeine and resistance exercise: the effects of two caffeine doses and the influence of individual perception of caffeine. *Eur J Sport Sci.* 2019;19(10):1342-48. doi:10.1080/17461391.2019.1596166
56. Polito MD, Souza DB, Casonatto J i sur. Acute effect of caffeine consumption on isotonic muscular strength and endurance: a systematic review and meta-analysis. *Sci Sports.* 2016;31(3):119–28.
57. Rahimi R. The effect of CYP1A2 genotype on the ergogenic properties of caffeine during resistance exercise: a randomized, double-blind, placebo-controlled, crossover study. *Ir J Med Sci.* 2019;188(1):337-45. doi:10.1007/s11845-018-1780-7
58. Raya-González J, Rendo-Urteaga T, Domínguez R i sur. Acute Effects of Caffeine Supplementation on Movement Velocity in Resistance Exercise: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med.* 2020;50(4):717-29. doi:10.1007/s40279-019-01211-9
59. Sabol F, Grgic J, Mikulic P. The Effects of 3 Different Doses of Caffeine on Jumping and Throwing Performance: A Randomized, Double-Blind, Crossover Study. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;1170-1177. doi:10.1123/ijsp.2018-0884
60. Salinero JJ, Lara B, Del Coso J. Effects of acute ingestion of caffeine on team sports performance: a systematic review and meta-analysis. *Res Sports Med.* 2019;27(2):238-56. doi:10.1080/15438627.2018.1552146
61. Salinero JJ, Lara B, Jiménez-Ormeño E i sur. More Research Is Necessary to Establish the Ergogenic Effect of Caffeine in Female Athletes. *Nutrients.* 2019;11(7):1600. Published 2019 Jul 15. doi:10.3390/nu11071600
62. Saunders B, de Oliveira LF, da Silva RP i sur. Placebo in sports nutrition: a proof-of-principle study involving caffeine supplementation. *Scand J Med Sci Sports.* 2017;27(11):1240-47. doi:10.1111/sms.12793
63. Southward K, Rutherford-Markwick KJ, Ali A. The Effect of Acute Caffeine Ingestion on Endurance Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* 2018;48(8):1913-1928. doi:10.1007/s40279-018-0939-8
64. Souza AA, Bottaro M, Rocha VA i sur. Reliability and Test-Retest Agreement of Mechanical Variables Obtained During Countermovement Jump. *Int J Exerc Sci.* 2020;13(4):6-17. Published 2020 Feb 1.
65. Souza DB, Duncan M, Polito MD. Improvement of Lower-Body Resistance-Exercise Performance With Blood-Flow Restriction Following Acute Caffeine Intake. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;14(2):216-21. doi:10.1123/ijsp.2018-0224
66. Spineli H, Pinto MP, Dos Santos BP i sur. Caffeine improves various aspects of athletic performance in adolescents independent of their 163 C > A CYP1A2 genotypes. *Scand J Med Sci Sports.* 2020;30(10):1869-77. doi:10.1111/sms.13749
67. Suchomel TJ, Nimphius S, Stone MH. The Importance of Muscular Strength in Athletic Performance. *Sports Med.* 2016;46(10):1419-49. doi:10.1007/s40279-016-0486-0
68. Venier S, Grgic J, Mikulic P. Acute Enhancement of Jump Performance, Muscle Strength, and Power in Resistance-Trained Men After Consumption of Caffeinated Chewing Gum. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;14(10):1415-21. doi:10.1123/ijsp.2019-0098
69. Venier S, Grgic J, Mikulic P. Caffeinated Gel Ingestion Enhances Jump Performance, Muscle Strength, and Power in Trained Men. *Nutrients.* 2019;11(4):937. doi:10.3390/nu11040937
70. Waller G, Dolby M, Steele J i sur. A low caffeine dose improves maximal strength, but not relative muscular endurance in either heavier-or lighter-loads, or perceptions of effort or discomfort at task failure in females. *PeerJ.* 2020;8:e9144. doi:10.7717/peerj.9144
71. Warren GL, Park ND, Maresca RD i sur. Effect of caffeine ingestion on muscular strength and endurance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42(7):1375-87. doi:10.1249/MSS.0b013e3181cabb8d
72. Wilk M, Filip A, Krzysztofik M i sur. Acute Caffeine Intake Enhances Mean Power Output and Bar Velocity during the Bench Press Throw in Athletes Habituated to Caffeine. *Nutrients.* 2020;12(2):406. doi:10.3390/nu12020406
73. Wilk M, Krzysztofik M, Filip A i sur. The Effects of High Doses of Caffeine on Maximal Strength and Muscular Endurance in Athletes Habituated to Caffeine [published correction appears in *Nutrients.* 2019 Nov 04;11(11)]. 2019;11(8):1912. Published 2019 Aug 15. doi:10.3390/nu11081912