

NEUROMECHANİČKE OSNOVE POKRETA

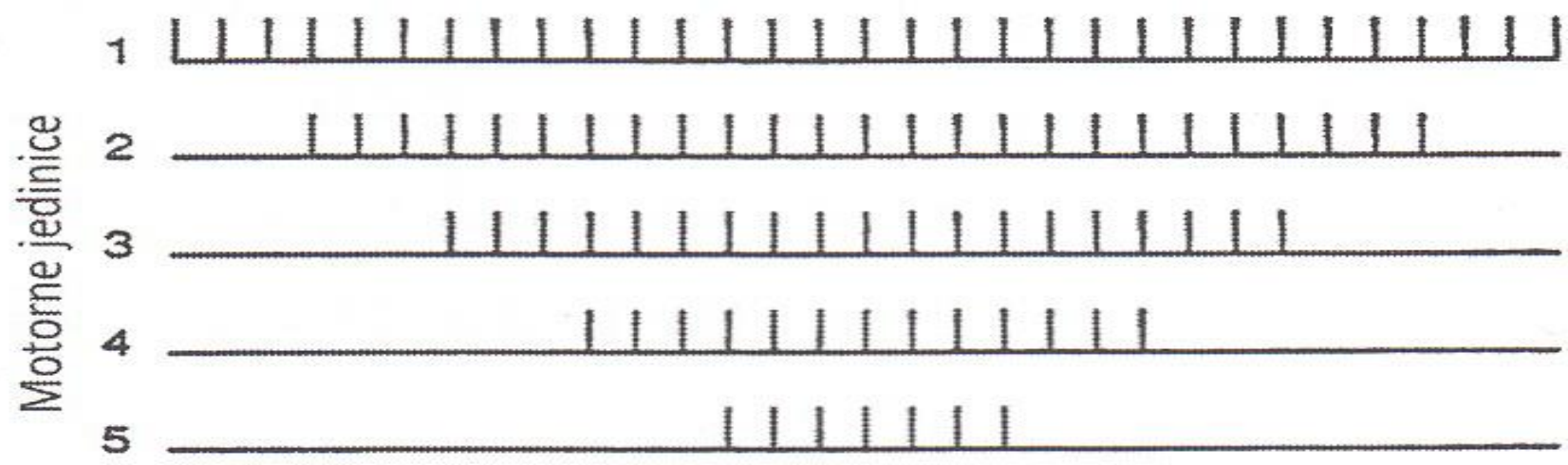
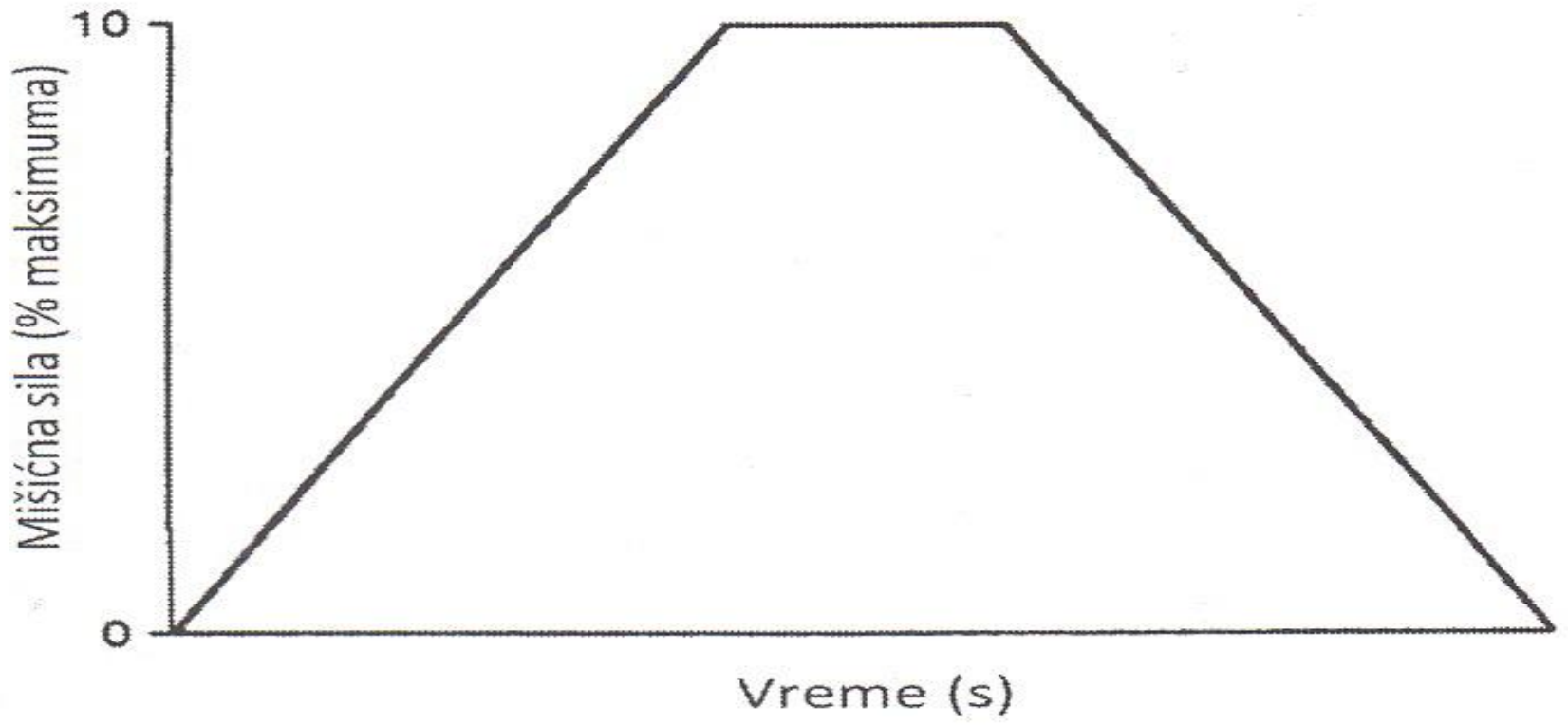
Doc.dr Dragan Krivokapić

Princip veličine motornih jedinica

- Motorne jedinice imaju tendenciju regrutovanja po jednom dobro organizovanom redosledu - tzv. principu veličine.
- Motorne jedinice, koje se prve aktiviraju su one čija su mišićna vlakna najmanja i imaju najmanje snage.
- Nastavljanjem regrutacije, motorne jedinice, koje se uključuju, imaju sve veća i snažnija motorna vlakna.
- Ovaj algoritam, koji se odnosi na redosled uključivanja od manjeg ka većem je nazvan principom veličine.

- Šta je fiziološka baza principa veličine?
- Odgovor se odnosi na prag potencijala pobuđivanja motornih neurona.
- Motorne jedinice sa malim mišićnim vlaknima imaju male motorne neurone sa kratkim aksonima, dok motorne jedinice sa velikim mišićnim vlaknima imaju velike motorne neurone sa dugim aksonima.
- Mali motorni neuroni imaju nizak prag za stvaranje potencijala za pobuđivanje motornih neurona, dok veliki motorni neuroni imaju visok prag za stvaranje akcionih potencijala

- . Prema ovome, slabi inputi prema pulu motornih neurona mogu da proizvedu akcione potencijale za male motorne neurone.
- (Struktura organizovane grupe motornih jedinica koje inervišu jedan poseban mišić nazivamo motoneuronskim pulom, gdje su motorni neuroni funkcionalno organizovani prema veličini.)
- S povećanjem jačine inputa počinju da se uključuju veći motorni neuroni.
- Osim toga, svaki prirast sile regrutacijom prati i pad u sili deregrutacijom.



- Prikazano je pet motornih jedinica sa registrovanom serijom akcionih potencijala, gdje je sukcesija uključivanja i isključivanja proizvela kumulativne efekte na vremensku skalu promjene mišićne sile. Zbog pojednostavljivanja, nivo pražnjenja svake od motornih jedinica je prikazan jednoobrazno, iako, zapravo, frekventnost akcionih potencijala raste sa povećanjem sile pogotovo u njenim najvišim nivoima
- Prema slici u fazi prirasta sile prvo se uključuje najkraća, a poslednja najduža motorna jedinica, dok se u fazi deaktiviranja prva isključi najduža, a naposljetku najkraća motorna jedinica.

- Princip veličine posjeduje mnogo značajnih funkcionalnih prednosti u smislu subjektivnog nenaprezanja centralnog upravljača u ekonomičnom i svrsishodnom upravljanju pokretima. Prvo velika snaga se ne proizvodi kada nije potrebna. Drugo, regrutacija može da prestane kada je stvorena odgovarajuća snaga. Treće, princip veličine doprinosi izrazito preciznom iniciranju motornih neurona.

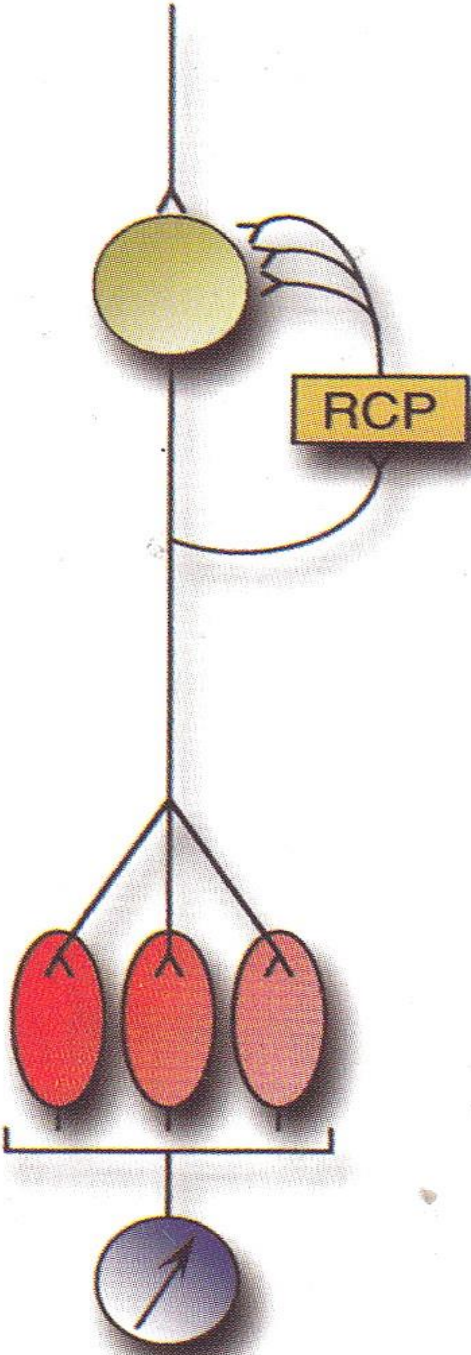
Unutrašnji i spoljašnji faktori regrutacije motornih neurona

- Uređena regrutacija motornih neurona ne zavisi samo od njegove veličine, već je pod uticajem drugih unutrašnjih i spoljnih faktora (slika). Pod unutrašnjim, pored veličine aksona, podrazumijevamo senzitivnost neurotransmiterskih receptora motorne jedinice i elektrotoničke karakteristike koje se odnose na električni odgovor u vezi sa provodljivošću električne integrisane mase odgovarajućih napona i jačine. I receptorne i električne karakteristike mogu da variraju nezavisno od veličine neurona.

- Pod spoljnim faktorima podrazumijevamo broj sinaptičkih terminala na motornom neuronu od senzitivnih vlakana, prosječnu količinu neurotransmitera, koja može da se oslobodi na nivou svake sinapse i prostornu distribuciju sinapsi preko some i dendrita. Smatra se da je sinaptička struja na nivou najvećih motornih jedinica najmanja i obrnuto. Ovim je obezbijeđeno da i najmanje motorne jedinice mogu da iniciraju pokret i da u najvećoj meri možemo dozirati nivo tonusa, tj. nivo sile.

- Jednostavno, regrutacijom ne može da se proizvede kumulativni efekat prirasta u sili posle posljednje u nizu uključene motorne jedinice. S druge strane, pokretanje segmenata u prostoru zasniva se na promjeni mišićne dužine u zavisnosti od primarnih ciljeva zadatka koji su razgraničeni sa tri osnovna vida, gdje mišić ima zadatak da ubrza segment, uspori ga ili ga održi u odgovarajućem položaju.

- Morfološke varijacije uključuju jačinu sinaptičkog inputa, dijametar aksona, nivo inervacije, veličinu mišićnog vlakna.
- Funkcionalne konsekvence takvih varijacija su istražene iz fiziološkog aspekta gdje su sve varijable predstavljene u centralnom dijelu slike. AP predstavlja akcioni potencijal, dok jačina podrazumeva amplitudu postsinaptičkog odgovora.
- Ovakvo pravilo važi za sve motorne jedinice svakog čovjekovog mišića. Ovako obrazovana grupa motornih jedinica poznata je kao motor neuron pul (skup motornih jedinica).



- Sinaptički input
- * Snaga
- Osobine motoneurona
- * Membrana
 - * Rn, Rh, AHP
 - * Pražnjenje
 - * Nivo, adaptacija

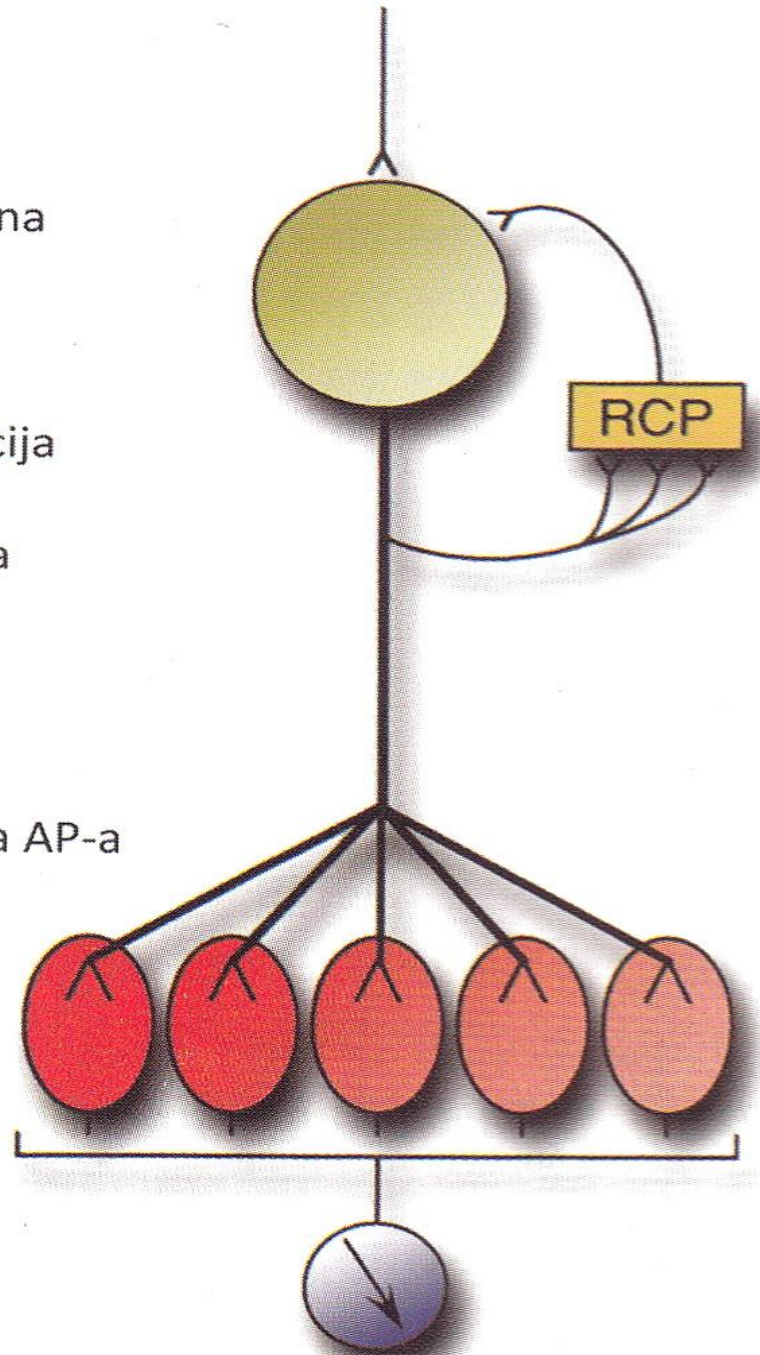
Rekurentna inhibicija

- Akson
- * Prečnik
 - * Intenzitet AP-a
 - * Brzina provođenja AP-a

AP mišićnog vlakna

- * Intenzitet

- Sila
- * Brzina
 - * Intenzitet
 - * Zamorljivost



- Na primer, tibialis antehoru inervisan sa otprilike 445 motoneurona, a ovo predstavlja veličinu skupa motornih jedinica.
- Prema principu veličine, u okviru skupa motornih jedinica, sve motorne jedinice su funkcionalno organizovane po veličini.
- Kada se od mišića traži da djeluje silom, u grupi motornih jedinica se prvo uključuje najmanja motorna jedinica, a zatim najveća kao poslednja.

- Na primer, u tibialis anterioru, posljednji alfa moto neuron (broj 445) biće uključen samo kada prethodno svi (od broja 1 do broja 444) budu aktivirani.
- Utvrđeno je da neke karakteristike kao što su: morfološke, biofizičke i input variraju sa pramenom veličine motoneurona tako da najmanja motorna jedinica može da bude najlakše nadražena.

Unutrašnji i spoljašnji faktori regrutacije motornih jedinica

- Regrutacija motornih jedinica takođe ne zavisi samo od njihove veličine, već je pod uticajem i karakteristika neurona (unutrašnjih faktora) i pod uticajem organizacije sinaptičkih inputa (spoljašnji faktori) na dendrite i somu motoneurona u grupi (Burke, 1981).
- U unutrašnje faktore spadaju veličina motoneurona, osjetljivost receptora transmitera datog motoneurona i elektronskih karakteristika motoneurona.

- Pod elektronskim se podrazumijeva električni odgovor (voltaža, struja) nadražene membrane tokom promjene provodljivosti.
- I osjetljivost receptora i elektronske karakteristike motoneurona variraju nezavisno od veličine motoneurona.
- Povećana osjetljivost receptora se ogleda u većem nadražaju ćelije za isti input, pošto se promjene u električnim karakteristikama ogledaju u većoj provodljivosti sinaptičkog inputa do aksonskog brežuljka.

- Ove pojave čine motoneuron osjetljivijim na inpute.
- U spoljašnje faktore spadaju i brojni sinaptički završeci na motoneuronu, prosječna količina neurotransmitera oslobođena u svakoj sinapsi i prostorna rasprostranjenost sinapsi duž tijela neurona i dendrita.
- Što je veći broj sinaptičkih završetaka ili oslobođenih neuro-transmitera, to će motoneuron biti razdražljiviji. I što je sinapsa bliža aksonskom brežuljku, veća je vjerovatnoća da će postsinaptički potencijal izazvati novi akcioni potencijal.

Funkcionalne implikacije motorne regrutacije

- Prednost redne regrutacije je u tome da kada se osobi da zadatak da ostvari mišićnu silu, niz u motornoj regrutaciji je predodređen i mozak ne mora da ga preuređuje.
- Stoga, informacija generisana mozgom ne sadrži podatke o tome koja se motorna jedinica aktivira. Redna regrutacija oslobađa mozak brige o ovom detalju tokom izvođenja pokreta.
- Međutim, pošto je redna regrutacija, u velikom dijelu, predodređena kičmenim mehanizmom, nije moguće birano aktiviranje motorne jedinice bilo kojim drugim redosledom.

- Kao rezultat ove predodređenosti, motorne jedinice aktivirane za određeni zadatak, proporcionalne su grupi potrebnih motoneurona.
- Na primjer, trčanje malom brzinom predstavlja aktivnost u kojoj su potrebe za snagom minimalne.
- Model pokazuje da trčanje zahtjeva aktiviranje samo pojedinih motornih jedinica tipa S (jedinice sporog trzaja) i tipa FR (jedinice umjerenog trzaja)].
- Pošto je redosled regrutacije nepromeljiv, postepeno povećanje zahtjeva snage, u samom zadatku, obuhvata postepenu aktivaciju većih motornih jedinica.

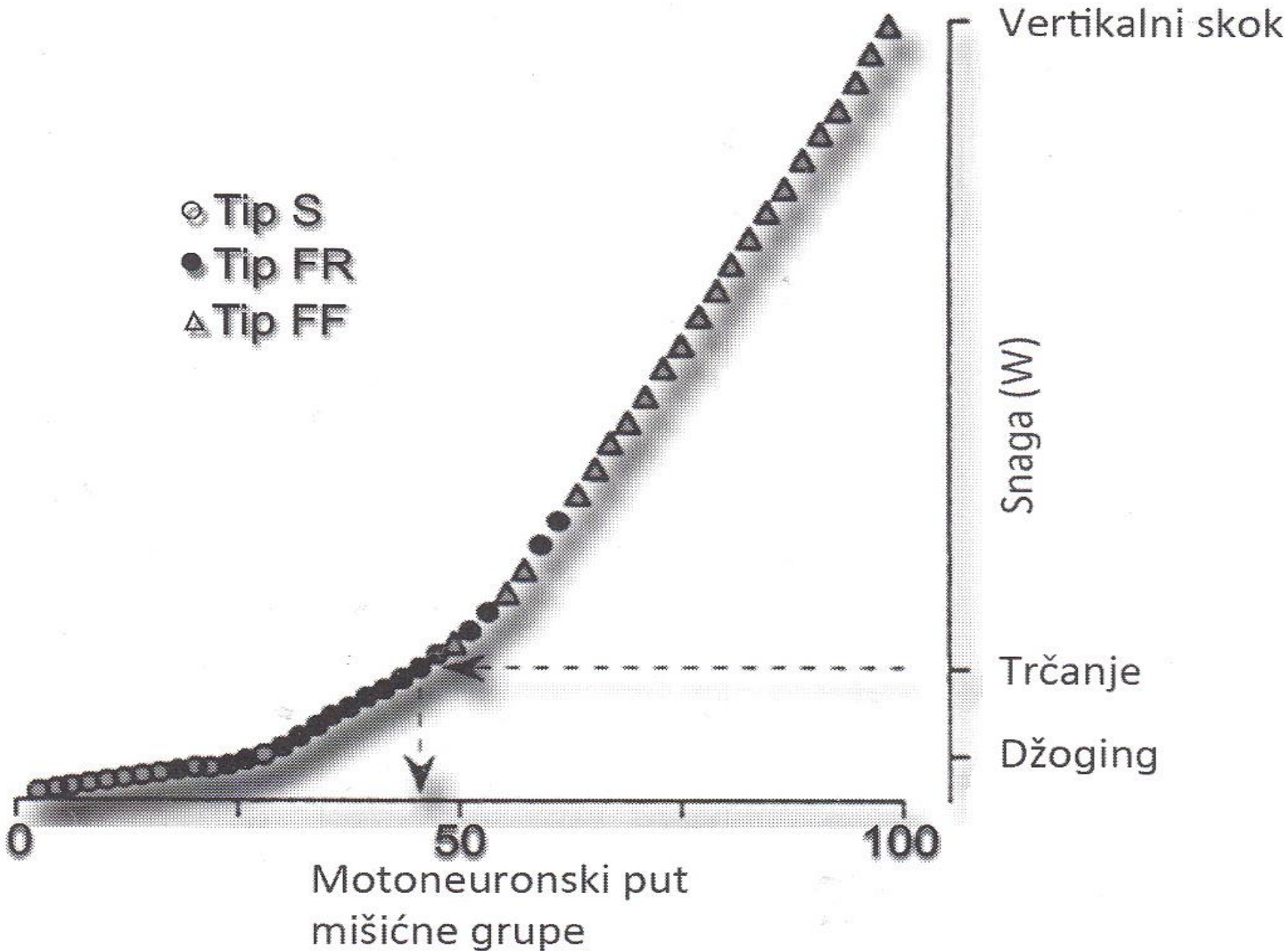
- Međutim, veličina motorne jedinice ne raste strogo u odnosu na tip motorne jedinice tako da dolazi do određenih preklapanja između tipova S i FR i između tipova FR i FF (jedinice izrazito brzog trzaja) i u veličini, i u redosledu regrutacije.
- Zbog ovoga nije moguće selektivno aktivirati spore ili brze motorne jedinice.
- Kada su zahtjevi za snagom veliki, npr. kao kod vertikalnog skoka, model pokazuje da su motorne jedinice tipa S regrutovane zajedno sa tipom FR i FF po prethodno objašnjenom redosledu.
- Danas, zbog ovakvih fizioloških ograničenja sportisti prevazilaze mnoga ograničenja novim sportskim tehnikama kako bi preinačili mišićne nedostatke.

Mehanički kapaciteti u odnosu na strukturu mišića

- ***Podjela mišićnih vlakana***
- Mišićna vlakna možemo podijeliti:
- ***prema brzini kontrakcije*** u dvije glavne grupe (mišićna vlakna brzog trzaja i sporog trzaja);
- ***u odnosu na anatomske izgled i boju vlakana*** (bijela ili crvena);
- u ***odnosu na relaciju sila-brzina***: ekonomičnost vršenja mehaničkog rada, otpornosti na zamor i trajanju prelaznog režima, kao i
- ***na osnovu biohemijskih i histochemijskih osobina.***

- U većini mišića postoje i spora i brza mišićna vlakna, a broj jednih i/ili drugih, dakle i njihov međusobni odnos, određen je genetskim nasljeđem i bitno se ne mijenja pod uticajem sistematskog tjelesnog vježbanja.
- Dakle našim začecem genetski kod je odredio ***tri stvari na koje ne možemo uticati:***
- -maksimalni broj mišićnih vlakana (mišići sadrže sve tipove vlakana),
- -procenat brzih i sporih mišićnih vlakana (njihova kompozicija je 97% determinisana),
- - oblik mišića kad se u potpunosti razviju.

- Tip S
- Tip FR
- △ Tip FF



Vertikalni skok

Snaga (W)

Trčanje

Džoging

Motoneuronski put mišićne grupe

- Hipotetički model regrutacije motornih jedinica diktiran zahtjevima za snagom u određenim zadacima.
- Ispitivanja su pokazala da mišići čovjeka sadrže
- 52% vlakana tipa I,
- 23% su vlakna tipa IIa,
- 14% su vlakna tipa IIb,
- i od 4 do 11% su vlakna tipa IIc.
- Kod muškaraca je veći procenat sporih vlakana, nego kod žena istih godina.

Vlakna sporog trzaja, crvena ili tip I

- Vlakna sporog trzaja se odlikuju sporim brzinama kontrakcije; postizanje napetosti je od 90 do 140 milisekunde.
- Energiju za (re)sintezu ATP obezbeđuju iz aerobnih (oksidativnih) izvora. U odnosu na brza vlakna, spora mišićna vlakna imaju veliki potencijal aerobnog metabolizma, prvenstveno zahvaljujući dvostruko većem broju mitohondrija, i niskom nivou glikogena.
- Uz visok nivo mitohondrija posljedično je vezana visoka otpornost na zamor u dugotrajnom radu umjerenog ili visokog intenziteta, a uz nizak nivo glikogena vezan je nizak nivo generisanja jačine mišića.

- Crvena boja ovih vlakana usled veće koncentracije mioglobina i gušće kapilarne mreže (i do 4.000 kapilara na jedan milimetar mišićnog tkiva) obezbeđuje sporije zamaranje.
- Spora vlakna su ekonomičnija, jer isti mehanički rad vrše sa manjim utroškom metaboličke energije.
- Inervisana su od alfatonusnih motoneurona.

Vlakna brzog trzaja, bijela ili tip II

- Vlakna brzog trzaja se odlikuju brзом kontrakcijom; vrijeme postizanja maksimalne napetosti je od 40 do 80 milisekunde, što im omogućava visoka aktivnost miozinske ATP-aze i dobro razvijen glikolitički enzimski sistem.
- Ovaj tip vlakana poseduje dvostruko manji broj mitohondrija u odnosu na vlakna tipa I, što za posledicu ima nisku oksidativnu aktivnost.

- Relativno su brzo zamorljiva vlakna. Prelazni režim brzih vlakana kraće traje (tj. vreme aktivacije i relaksacije je manje), odnosno, ta vlakna svojom silom brže prate promene nivoa aktivacije.
- U ovu grupu spadaju tri podtipa: Ha, Ilb, koji imaju slična kinetička svojstva i Ilc, ima svojstva koja su između tipa I i II, pa se smatra kao prelaznom formom za transformaciju u tip I ili tip II zavisno od tipa treninga.
- Vlakna tipa Ha imaju visok sadržaj oksidativnih i glikolitičkih enzima.
- Otporna su na zamor i „odgovorna“ za produženi rad u uslovima relativno visokog nivoa generisanja jačine mišića.

- Vlakna tipa IIb su tipična brza vlakna, velike snage, zahvaljujući visokoj ATP-aznoj aktivnosti.
- Funkciju zasnivaju na visokom nivou glikogena i maloj koncentraciji mitohondrija, tako da se kontrakcije mišićnih vlakana vrše u uslovima brzog oslobađanja energije, i odgovorna su za generisanje sile visokog intenziteta (npr. sprint).
- Zbog ovoga su veoma podložna zamoru.
- Funkcionalne i organske karakteristike mišićnih vlakana tipa IIc, se nalaze negde između vlakana sporog i vlakana brzog trzaja.
- Vlakna tipa II inervisana su od alfa-fazičnih motoneurona, koji posjeduju veliku brzinu provođenja nervnih impulsa.

-Spora oksidativna vlakna

- Spora oksidativna vlakna su daleko brojnija i smještena su dublje u mišiću zbog čega imaju bolju prokrvljenost, za razliku od brzih vlakana koja su smještena pri površini mišića.
- Spora vlakna imaju mnogo mitohondrija i oksidativnih enzima, pa sporije troše ATP, dok se brza oslanjaju na anaerobnu glikolizu (sadrže mnogo glikogena i glikolitičkih enzima) zbog čega tokom kontrakcije stvaraju zalihe kiseonika koji im se isplaćuje tokom relaksacije.

- Brzo se kontrahuju i relaksiraju zbog toga što sadrže visok procenat miozin ATP-aze i fosforilaze, za razliku od sporih mišićnih vlakana kojima je potreban duži period od početka do maksimalne kontrakcije.
- Alfa motoneuroni koji inervišu brza mišićna vlakna, veće motorne jedinice, imaju veći akcijski potencijal i veću brzinu provođenja, za razliku od alfa tonusnih koji imaju manju brzinu i frekvenciju provođenja, i inervišu manje motorne jedinice.

	Spora oksidativna vlakna (Tip I)	Brza oksidativna glikoliticka vlakna (Tip II)	Brza glikoliticka vlakna (Tip IIb)
Izvor ATP-a	oksidativna fosforilacija	oksidativna fosforilacija	glikoliza
Broj mitohondrija	mnogo	mnogo	nekoliko
Broj kapilara	mnogo	mnogo	nekoliko
Sadržaj mioglobina	puno(crvena boja)	puno(crvena boja)	malo (bijela boja)
Aktivnost enzima glikolize	niska	srednja	visoka
Sadržaj glikogena	nizak	srednji	visok
Umaranje	malo	srednje	brzo
Aktivnost miozin- ATP-aze	niska	visoka	visoka
Brzina kontrakcije	spora	brza	brza
Promjer vlakna	mali	srednji	veliki
Veličina motoričke jedinice	mala	srednja	velika
Veličina neurona koji pokreće	mala	srednja	velika

Redosljed uključivanja i brzina kontrakcije mišićnih vlakana tipa I, II i IIb

- U svakodnevnim mišićnim aktivnostima prvo se kontrahuju spore motorne jedinice (mišićna vlakna tipa I), a sa povećanjem brzine generisanja jačine (sile) mišića sve više se regrutuju brže motorne jedinice (mišićna vlakna tipa II).
- Najbrže motorne jedinice (mišićna vlakna tipa IIb) kontrahuju se, u prvom redu, u brzim pokretima, kao što su refleksni pokreti i pokreti korekcija u funkciji održavanja ravnotežnog položaja.
-
- Spore motorne jedinice tip I obuhvataju od 10 do 180 mišićnih vlakana.
- Sa aspekta brzine skraćivanja - vlakna brzog trzaja skraćuju se za 0,3-0,35 sec, a vlakna sporog trzaja za 0,38-1,1 sec.

- Tip I mišićna vlakna razvijaju 1-10% manju silu, uporedo sa silom koju razvijaju mišićna vlakna tip II.
- Brza vlakna razvijaju veću brzinu skraćanja, time i snagu, dok je sporom vlaknu potrebno znatno više vremena da aktivira i razvije silu, shodno tome i da se relaksira.
- Maksimalna snaga (P_{max}) pojedine vrste mišićnih vlakana izražena u relativnom odnosu maksimalnoj snazi tip I mišićnih vlakana, tip II vlakna proizvode do 5 puta veću, a tip IIb do 9 puta veću maksimalnu snagu od tipa I vlakana.

- Dugogodišnjim treningom moguće je neznatno izmijeniti strukturu mišićnih vlakana, ali veličina tih promjena nije od značaja za promjenu dominantnog tipa mišićne efikasnosti.
- U poređenju sa sporim vlaknima, vlakna brzog trzaja su deblja i više su podložna zadebljavanju pod uticajem treninga.
- Treba istaći da između vlakana sporog i brzog trzaja nema razlike u pogledu ispoljavanja jačine mišića po jedinici fiziološkog presjeka.
- U cjelini posmatrano, vlakna sporog trzaja omogućavaju rad manjeg intenziteta i produženog trajanja, a vlakna brzog trzaja, omogućavaju rad visokog intenziteta i kraćeg trajanja.
- Osim toga, pokazalo se da ako jedna osoba ima natprosječni procenat sporih ili brzih vlakana u jednom mišiću, to važi i za njegove ostale skeletne mišiće.

Struktura mišićnih vlakana kao faktor sportske selekcije

- Struktura mišića je važan faktor sportske selekcije, jer na osnovu izmjerene ili procijenjene strukture mišića mladih sportista može u znatnoj meri da se predvidi njihov budući rezultat u određenim sportovima.
- Prva grupa sportista kod kojih preovladava udio sporih mišićnih vlakana su predodređeni za sportove izdržljivosti gdje je rezultat postignut zahvaljujući ekonomičnosti kretanja i većoj otpornosti na zamor.
- Dok druga grupa sportista, koju brza mišićna vlakana opredjeljuju za sportove u kojima je potrebna velika snaga, rezultate postižu pri velikim brzinama izvođenja i relativno kratkom vremenu djelovanja

- Karakteristike tipova vlakana i njihove reakcije na trening su veoma kompleksne.
- Dovoljno je znati da je raspored tipova vlakana jedne osobe genetski određen i da se treniranjem neće promijeniti jedan tip vlakna u drugi, kako bi mogli kreirati individualne programe i shvatili razloge zašto različite osobe različito reaguju na isti program treninga.
- Samo aktiviranje određenih motornih jedinica ima trenažni efekat (povećava površinu njihovog poprečnog presjeka, koncentraciju jona i biohemijske energije u njima).

- Trening aerobne izdržljivosti ima dominantan uticaj na hipertrofiju sporih vlakana, usljed čega se povećava nivo mitohondrija i oksidativnih enzima i gustine kapilarne mreže oko mišićnih vlakana (povećava se koncentracija ATP-a (oko 18 %), KP-a (oko 22 %) i glikogena (oko 66 %) takođe i aktivnost enzima). Treba naglasiti da trening izdržljivosti ne pretvara brzokontraujuća vlakna (tip II) u sporokontraujuća (tip I).

- Brzim pokretima se treniraju brza vlakna, što rezultira smanjenjem relativne gustine mitohondrija, relativne koncentracije aerobnih enzima, relativnim padom aerobne izdržljivosti hipertrofiranih mišića i smanjenjem koncentracije mioglo-bina.
- Mada istraživanja pokazuju da je moguće donekle povećati ae-robni kapacitet brzokontrahejućih vlakana.

HVALA NA PAŽNJI !