

SADRŽAJ

UVOD U MEDICINSKU FIZIKU: OSNOVNE KARAKTERISTIKE I MEĐUZAVISNOSTI.....	1
MEDICINSKA FIZIKA.....	1
ZNAČAJ BIOFIZIKE ZA MEDICINSKU FIZIKU	2
INTERDISCIPLINARNA PRIRODA MEDICINSKE FIZIKE	2
ISTORIJSKI RAZVOJ BIOFIZIKE I MEDICINSKE FIZIKE	3
ISTORIJSKI RAZVOJ BIOFIZIKE.....	4
ISTORIJSKI RAZVOJ MEDICINSKE FIZIKE – FIZIČARI U SLUŽBI ZDRAVLJA	6
SISTEMOLOGIJA.....	9
OSNOVNI POJMOVI SISTEMOLOGIJE	9
POVEZANOST SISTEMA	10
ULOGA MODELA U SISTEMOLOGIJU	11
MATEMATIČKI MODEL	12
PRENOSNA FUNKCIJA I STABILNOST SISTEMA	13
MINIMALNA I MAKSIMALNA MOĆ RAZLAGANJA	15
TIPOVI ZADATAKA	16
MODEL CRNE KUTIJE	17
MIKROPRISTUP I MAKROPRISTUP	18
KLASIFIKACIJE SISTEMA	19
SISTEMI NULTOG REDA	20
ELIMINACIJA ETANOLA U LJUDSKOM TELU KAO SISTEM NULTOG REDA	23
SISTEMI PRVOG REDA	24
ELIMINACIJA LEKA IZ TELA KAO SISTEM PRVOG REDA	26
SISTEMI DRUGOG REDA.....	27
DISANJE NA MEHANIČKOJ VENTILACIJI KAO SISTEM DRUGOG REDA	29
POVRATNA SPREGA U SISTEMIMA.....	32
TERMOREGULACIJA TELA – SISTEM PRVOG REDA SA NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM	32
REGULACIJA ARTERIJSKOG PRITISKA PUTEM BARORECEPTORSKOG REFLEKSA – SISTEM DRUGOG REDA SA NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM	35
AKCIONI POTENCIJAL I MODELI POBUĐIVANJA NEURONA – SISTEMI VIŠEG REDA.....	35
BIFURKACIJE U DINAMIČKOM PONAŠANJU SISTEMA.....	40
SADDLE-NODE BIFURKACIJA U KONTEKSTU MEDICINE	40
PITCHFORK BIFURKACIJA U KONTEKSTU MEDICINE	43
HOPFOVA BIFURKACIJA U MEDICINI – PRELAZ OD STABILNOSTI KA OSCILATORNOM PONAŠANJU	43
MODELI U MEDICINI	44
MODELI ZASNOVANI NA STATISTIČKOJ ZAVISNOSTI	46
KIBERNETIČKI SISTEM	47
LJUDSKO TELO KAO KIBERNETIČKI SISTEM	49
TERMODINAMIKA	53
OSNOVNI POJMOVI TERMODINAMIKE	54
TERMODINAMIČKI SISTEM I TERMODINAMIČKE VELIČINE	55
TERMODINAMIČKI POTENCIJALI.....	56
TERMODINAMIČKA RAZMATRANJA U KONTEKSTU LJUDSKOG TELA: ENERGIJA, TOPLOTA I EFIKASNOST	79
GUBITAK TOPLOTE LJUDSKOG TELA PROVOĐENJEM.....	82
GUBITAK TOPLOTE LJUDSKOG TELA KONVEKCIJOM	85
GUBITAK TOPLOTE LJUDSKOG TELA ZRAČENJEM	88
EVAPORACIJA (ISPARAVANJE) ZNOJA.....	93
OSTALI FAZNI PRELAZI U TELU	96

TRANSPORT MASE	101
GIBBSOVA ENERGIJA I HEMIJSKI POTENCIJAL	101
DIFUZIJA.....	106
OSMOTSKI TRANSPORT	113
TRANSPORT JONA KROZ POLUPROPUSTLJIVU MEMBRANU	116
MEHANIKA LJUDSKOG TELA.....	125
ISTORIJSKI RAZVOJ MEHANIKE LJUDSKOG TELA	125
SILA – DEFINICIJA I MEDICINSKI KONTEKST	126
MOMENT SILE.....	127
SILA U LJUDSKOM TELU	132
MIŠIĆNA SILA.....	132
GRAVITACIONA SILA.....	137
SILA TRENJA	141
SILA REAKCIJE PODLOGE.....	144
RAD U FIZIČKOM I U BIOMEHANIČKOM SMISLU	146
LOKOMOTORNI SISTEM: BIOMEHANIČKA I FIZIČKA ANALIZA	147
POLUGE U LJUDSKOM TELU.....	150
PRIMENA HOOKEOVOG ZAKONA U BIOMEHANICI LJUDSKOG TELA	154
SMICANJE I TORZIJA U BIOMEHANICI LJUDSKOG TELA	156
FIZIKA KOŠTANE FRAKTURE	159
BIOMEHANIKA TEČNOSTI: REOLOŠKI MATERIJALI I MODELI, REOLOŠKA SVOJSTVA KRVI	163
UTICAJ ATMOSFERSKOG PRITISKA NA LJUDSKO TELO	163
STATIKA FLUIDA	164
HIDROSTATIČKI PRITISAK U LJUDSKOM TELU	165
POVRŠINSKI NAPON I POSLEDICE NJEGOVOG DELOVANJA NA LJUDSKO TELO	166
STARLINGOV ZAKON	168
PROTOK KRVI – FIZIČKI MODELI I UTICAJ VISKOZNOSTI	169
JEDNAČINA KONTINUITETA	170
BERNULIJEVA JEDNAČINA.....	172
HAGEN–POISEUILLEOV ZAKON	173
VISKOZNOST KRVI	175
TURBULENCIJA KRVI: FIZIOLOŠKI I HEMODINAMIČKI ASPEKTI	179
AUSKULTATORNO I AUTOMATSKO MERENJE KRVNOG PRITISKA – FIZIČKI ASPEKTI PROCESA	181
ARTERIJSKI I VENSKI PRITISAK: POREKLO, RAZLIKE I METODE MERENJA	182
REOLOŠKI MODELI - PREGLED	183
WINDKESSEL EFEKAT: ELASTIČNI AMORTIZER KRVOTOKA.....	189
BIOAKUSTIKA – MEHANIČKE OSCILACIJE I TALASI, ZVUK I ULTRAZVUK.....	190
OSCILATORNO KRETANJE U LJUDSKOM TELU: FIZIČKA OSNOVA I MEDICINSKE IMPLIKACIJE	190
MEHANIČKE OSCILACIJE: TEORIJSKA OSNOVA I PRIMENE U MEDICINI.....	191
PRIGUŠENO OSCILOVANJE TETIVA I MIŠIĆA	193
BAZILARNA MEMBRANA KAO SISTEM PRINUDNO POBUĐENIH SPREGNUTIH OSCILATORA	195
DODATNI PRIMERI REZONANCIJE U LJUDSKOM TELU	198
SLAGANJE OSCILACIJA U LJUDSKOM ORGANIZMU.....	202
OSCILACIJE CENTRA MASE TOKOM HODA I TRČANJA – LISSAJOUSOVE FIGURE	203
OSCILOVANJE SLOJEVA LJUDSKIH GLASNIH ŽICA PRI VELIKIM DEFORMACIJAMA: ZATEZANJE, SABIJANJE I SMICANJE	205
TALASNI PROCESI U LJUDSKOM TELU	206
ZVUK KAO MEHANIČKI TALAS I ČULO SLUHA.....	207
FIZIKA ULTRAZVUKA.....	214
DOPPLEROV EFEKAT	223
BIOLOŠKI EFEKTI ULTRAZVUKA I BEZBEDNOSNI PARAMETRI: KAVITACIJA, ZAGREVANJE I TERMALNI INDEKS	226

FIZIKA TERAPIJSKOG DELOVANJA ULTRAZVUKA	229
UDARNI TALASI U FIZIKALNOJ MEDICINI – FIZIČKI PRISTUP	230
FIZIČKI PRINCIPI I PRIMENA ELEKTROMAGNETNIH TALASA U MEDICINI	233
ISTORIJSKI OSVRT NA RAZUMEVANJE PRIRODE ELEKTROMAGNETNIH TALASA	233
PRIRODA I NASTANAK ELEKTROMAGNETNIH TALASA	235
FOTOEFEKAT	237
COMPTONOV EFEKAT	240
DIJAGNOSTIČKA I TERAPIJSKA PRIMENA ELEKTROMAGNETNIH TALASA	241
RENDGENSKO ZRAČENJE (X – ZRACI)	241
RENDGENSKE CEVI	247
PRIMENA RENDGENSKOG ZRAČENJA I INTERAKCIJA SA MATERIJOM	250
MAGNETNA REZONANCA (MRI)	255
PRIMENA LASERA U MEDICINSKOJ DIJAGNOSTICI	262
LUMINESCENCIJA: FENOMEN SVETLOSTI BEZ TOPLOTE – SA FOKUSOM NA FLUORESCENCIJU I FOSFORESCENCIJU	273
ULTRALJUBIČASTO (UV) ZRAČENJE I PRIMENA U MEDICINI	277
BIOELEKTRIČNI SIGNALI U DIJAGNOSTICI	285
ISTORIJSKI RAZVOJ REGISTROVANJA BIOELEKTRIČNIH SIGNALA	285
KAPACITIVNA SPREGA	288
SRCE KAO ELEKTRIČNI DIPOL	289
EINTHOVENOV TROUGAO	293
SAVREMENI EKG UREĐAJ	297
ELEKTROENCEFALOGRAFIJA (EEG)	300
ELEKTROMIOGRAFIJA (EMG) – PROCENA NEUROMIŠIĆNE FUNKCIJE	301
OPŠTI EFEKTI PROLASKA ELEKTRIČNE STRUJE KROZ ORGANIZAM	301
FIZIČKE OSNOVE ELEKTROFOREZE	305
FIZIKA DEFIBRILATORA – PRINCIP RADA I MEDICINSKA PRIMENA	306
FIZIKA DIJATERMIJE	308
FIZIČKA PRIRODA MAGNETOTERAPIJE	309
RADIJACIONA FIZIKA I JONIZUJUĆE ZRAČENJE	313
VRSTE ZRAČENJA I KARAKTERISTIKE	313
ISTORIJSKI RAZVOJ NAUKE O ZRAČENJU	313
POJAM ZRAČENJA U FIZICI	314
IZVORI JONIZUJUĆEG ZRAČENJA	315
ZAŠTO SU NEKA JEZGRA STABILNA, A NEKA RADIOAKTIVNA?	316
ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA	318
INTERAKCIJA ZRAČENJA SA MATERIJOM	321
NEUTRONI I RADIOAKTIVNOST – PRIMENA U MEDICINI	327
POZITRONSKA EMISIONA TOMOGRAFIJA (PET): FIZIČKI PRINCIP, TEHNOLOGIJA I KLINIČKA PRIMENA	329
SPECT – JEDNOFOTONSKA EMISIONA TOMOGRAFIJA	331
DOZIMETRIJA	333
PREGLED OTKRIĆA U VEZI SA UTICAJEM JONIZUJUĆEG ZRAČENJA NA Ljudsko telo	333
DOZE JONIZUJUĆEG ZRAČENJA	334
OZRAČENOST CELOG TELA – UNIFORMNA IRADIJACIJA	342
DETERMINISTIČKI I STOHAŠTIČKI EFEKTI ZRAČENJA: MEHANIZMI, POSLEDICE I GRANICE ZAŠTITE	343
ZAŠTITA OD ZRAČENJA I REGULATIVA: PRINCIPI, PRAKSA I MEĐUNARODNI STANDARDI	344
FIZIČKI PRINCIPI ZAŠTITE OD ZRAČENJA	344
ORGANIZACIONI ASPEKTI I PROFESIONALNA ODGOVORNOST	345

MEĐUNARODNI STANDARDI I REGULATORNA TELA.....	345
DODATAK 1: LOGISTIČKA REGRESIJA ZA PROCENU RIZIKA OD INFARKTA MIOKARDA	348
TEORIJSKO OBJAŠNJENJE	348
TUMAČENJE REZULTATA MODELA LOGISTIČKE REGRESIJE U PROGRAMSKOM PAKETU JMP	350
DODATAK 2: COX REGRESIJA U MEDICINSKIM ISTRAŽIVANJIMA	356
TEORIJSKO OBJAŠNJENJE	356
TUMAČENJE REZULTATA COX REGRESIJE U PROGRAMSKOM PAKETU JMP	357
DODATAK 3: LINEARNA REGRESIJA U MEDICINSKIM ISTRAŽIVANJIMA	361
TEORIJSKO OBJAŠNJENJE	361
TUMAČENJE REZULTATA LINEARNE REGRESIJE U PROGRAMSKOM PAKETU JMP	362
LITERATURA	365

ISTORIJSKI RAZVOJ BIOFIZIKE

U 18. veku, **Luigi Galvani** otkriva da žabe reaguju na električnu stimulaciju, što predstavlja početak elektrofiziologije.



Luigi Galvani
(1737–1798)

Galvani je tokom svojih eksperimenata sa žabama uočio da se noge mrtve žabe trzaju kada ih dodirne metalna igla skalpela, dok su bile okačene za bakarnu kuku. Ove reakcije su se dešavale iako žaba više nije bila živa. Galvani je zaključio da postoji „životinjska struja“, odnosno unutrašnja sila koja proizvodi električne efekte u organizmu.

U stvarnosti, pokretanje žabljih nogu bilo je posledica mišićne kontrakcije, jer su nervna vlakna u preparatu još uvek bila funkcionalna i reagovala na spoljašnji električni stimulus.

Kada su dva različita metala (npr. bakar i gvožđe) istovremeno bila u kontaktu sa vlažnim biološkim tkivom, koje je delovalo kao elektrolit, između njih se uspostavljala razlika potencijala. U Galvanijevom eksperimentu, bakarna kuka bila je zakačena za kičmeni stub žabe, dok je gvozdeni skalpel dodirivao mišić noge. Na taj način su oba metala bila povezana preko istog biološkog tkiva, što je omogućavalo zatvaranje električnog kola. Razlika u elektrodnim potencijalima bakra i gvožđa u kontaktu sa elektrolitom dovela je do pojave električne struje, koja je prolazila kroz nervno-mišićni preparat i izazivala kontrakciju mišića. Elektroni su se kretali kroz metalne provodnike, dok je jonski tok tekao kroz tkivo. Na taj način je nastajala električna struja koja je prolazila kroz nerv, izazivala nastanak nervnog impulsa i dovela do kontrakcije mišića. Ovo je bio prvi eksperimentalni dokaz da elektricitet može da pokrene nervno-mišićnu aktivnost. Kao što je pomenuto, ovaj eksperiment predstavlja početak elektrofiziologije, grane biofizike koja se bavi proučavanjem električnih osobina ćelija i tkiva, naročito nerava i mišića.

Jedan od ključnih trenutaka u razvoju moderne neurofiziologije desio se sredinom 19. veka, kada je **Hermann von Helmholtz** prvi put kvantitativno izmerio brzinu nervnog impulsa i usmerio pažnju naučne zajednice na fizičke osnove mišićnog rada.



Hermann von Helmholtz
(1821–1894)

Helmholtz je bio jedan od prvih naučnika koji je precizno **izmerio brzinu prenosa nervnog signala**, čime je pokazao da nervni impulsi nisu trenutni već se prenose konačnom brzinom. Helmholtz je postavio eksperiment u kojem je stimulisao nerv žabe na dve tačke različite udaljenosti od mišića i merio vreme potrebno da se pojavi kontrakcija. Koristeći precizan hronoskop (mehanički uređaj za merenje vremena) uspeo je da izmeri razliku u vremenu između dva nadražaja i time izračuna brzinu prenosa nervnog impulsa. Na osnovu poznate razdaljine između dve tačke stimulacije i razlike u vremenu reakcije, primenio je jednostavnu formulu za izračunavanje brzine kod ravnomerno pravolinijskog kretanja $v = \frac{s}{t}$.

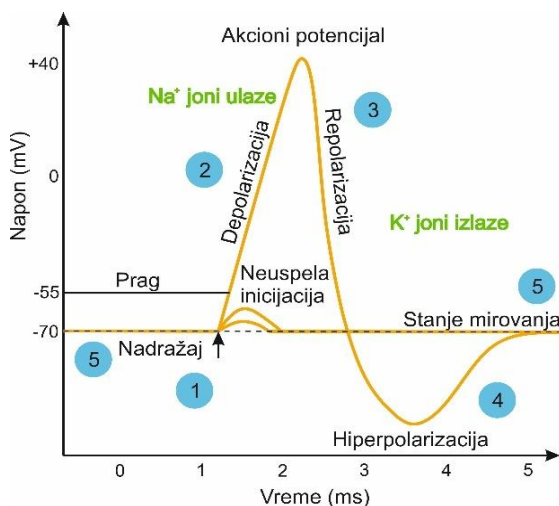
Dobio je rezultat od oko 24–38 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ (u zavisnosti od temperature i tipa nerva), čime je pokazao da se nervni signali ne prenose trenutno, već konačnom brzinom. Ovaj eksperiment je bio revolucionaran jer je prvi put kvantitativno potvrdio da se informacija u nervnom sistemu prenosi fizičkim putem koji je moguće izmeriti, čime je utemeljen fiziološki pristup nervnim signalima.

Pored toga, Helmholtz je proučavao i **održanje energije tokom mišićnog rada**. Njegov cilj bio je da proveri da li se zakon održanja energije, koji je već bio potvrđen u mehaničkim i toplotnim procesima,

termodinamički, hemijska komponenta elektrohemijskog potencijala zavisi od aktivnosti, a ne od same koncentracije. Međutim, za monovalentne jone poput Na^+ i K^+ u fiziološkim uslovima odstupanja koeficijenta aktivnosti od 1 su relativno mala i slična sa obe strane membrane, pa se u većini biofizičkih modela aktivnost u prvoj aproksimaciji zamenjuje koncentracijom. Ovo predstavlja opravdano pojednostavljenje, ali treba imati u vidu da je u strogoj termodinamičkoj formulaciji pokretačka sila određena razlikom elektrohemijskih potencijala izraženih preko aktivnosti.

U ljudskom telu, ćelijska membrana razdvaja unutrašnju i spoljašnju sredinu ćelije, pri čemu se održava asimetrija u koncentracijama jona kao što su natrijum, kalijum, kalcijum i hlorid. Istovremeno, na membrani postoji razlika u električnom potencijalu, obično oko -70 mV unutar ćelije u odnosu na spoljašnjost. Razlika elektrohemijskih potencijala između dve strane membrane definiše smer i intenzitet spontanog jonskog toka kroz otvorene kanale. Važno je naglasiti da čak i ako su koncentracije jona izjednačene, razlika u električnom potencijalu može stvoriti elektrohemijski gradijent koji će pokrenuti kretanje jona. Na primer, ukoliko je unutrašnjost ćelije negativno naelektrisana, pozitivni joni poput Na^+ i Ca^{2+} imaju dodatni energetski razlog da uđu u ćeliju, čak i ako je spoljašnja koncentracija slična unutrašnjoj.

Prenos nervnog impulsa duž neurona jedan je od najupečatljivijih primera kako elektrohemijski potencijal upravlja funkcijama u ljudskom telu. U stanju mirovanja, nervna ćelija održava stabilnu razliku u električnom potencijalu između unutrašnjosti i spoljašnjosti membrane tzv. membranski potencijal (slika 2.3). Ova razlika potiče prvenstveno iz neravnomerne raspodele natrijumovih (Na^+) i kalijumovih (K^+) jona: natrijuma ima više izvan ćelije, a kalijuma unutar nje.



Slika 2.3. Prikazana je promena membranskog napona tokom akcionog potencijala. Nadražaj pokreće promenu membranskog napona (oznaka 1) kada napon pređe prag pobude, dolazi do depolarizacije (oznaka 2) otvaranjem natrijumskih kanala i ulaskom Na^+ jona; zatim sledi repolarizacija (oznaka 3) usled izlaska K^+ jona kroz kalijumske kanale, kratka hiperpolarizacija (oznaka 4) i na kraju povratak membranskog potencijala u stanje mirovanja (oznaka 5).

Kada neuron primi nadražaj dovoljne jačine, lokalna promena električnog potencijala membrane dostiže kritičnu vrednost (obično oko -55 mV). To je signal za aktivaciju naponski-zavisnih Na^+ kanala, koji se tada brzo otvaraju. Otvaranjem ovih kanala natrijum ulazi u ćeliju, jer je njegov elektrohemijski potencijal viši izvan ćelije nego unutar nje. Ulaskom pozitivno naelektrisanih jona unutrašnja strana membrane postaje sve manje negativna, pa zatim pozitivna, to je proces depolarizacije. Ovo stanje je nestabilno i organizam mora da ga brzo koriguje da bi neuron mogao ponovo da reaguje na sledeći nadražaj. Repolarizacija je upravo taj proces povratka²⁵ membrane u negativno, mirujuće stanje, koje je bilo prisutno pre nadražaja (oko -70 mV), a koje se ostvaruje tako što kalijumovi joni napuštaju ćeliju. Njihov elektrohemijski potencijal u tom trenutku favorizuje izlazak, jer postoji viša koncentracija K^+ u citoplazmi nego u ekstracelularnoj tečnosti, a pozitivni membranski

²⁵ Iako tokom prenosa nervnog impulsa natrijumovi joni ulaze u ćeliju, a kalijumovi izlaze, to ne dovodi do trajnog poremećaja jonske ravnoteže i membranskog potencijala, jer ćelija aktivno održava početnu ravnotežu. Natrijum-kalijum pumpa uz pomoć ATP-a izbacuje tri jona natrijuma iz ćelije i unosi dva jona kalijuma, čime obnavlja koncentracione gradijente i omogućava neuronu da ostane pobudljiv i spreman za sledeći signal.

površina odraslog³¹ čoveka). Koeficijent toplotne provodljivosti sloja (koža + odeća) je $\lambda = 0,04 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$.
 Gradijent temperature je:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_{\text{unutra}} - T_{\text{spolja}}}{d} = \frac{(37 - 0) \text{ }^\circ\text{C}}{0,02 \text{ m}} = 1850 \frac{\text{ }^\circ\text{C}}{\text{m}} = 1850 \frac{\text{K}}{\text{m}} \quad (2.30)$$

Za izračunavanje toplotnog toka (toplotnog fluksa) koristi se jednačina (2.28) u koju se uvrste brojne vrednosti:

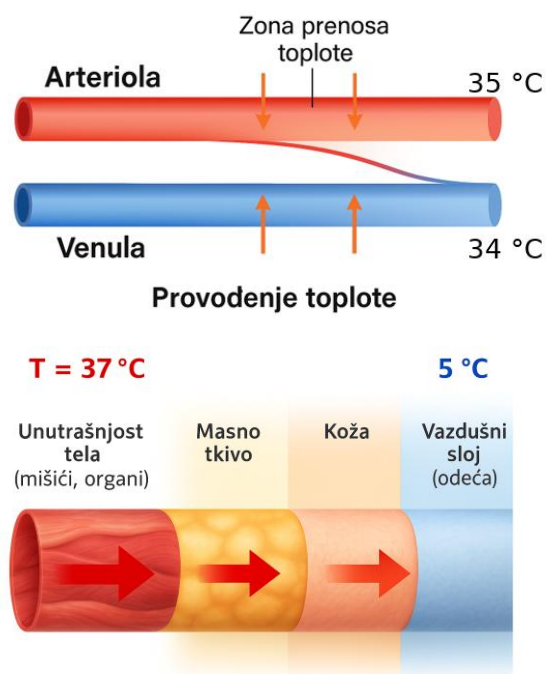
$$\frac{dQ}{dt} = -0,04 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot 1,7 \text{ m}^2 \cdot 1850 \frac{\text{K}}{\text{m}} = -125,8 \text{ W} \quad (2.31)$$

Dakle, oko 125,8 J toplote u sekundi napušta telo, dok se ukupna količina toplote za konstantan tok posle vremena t može izračunati:

$$Q(t) = -125,8 \text{ W} \cdot t \text{ (J)} \quad (2.32)$$

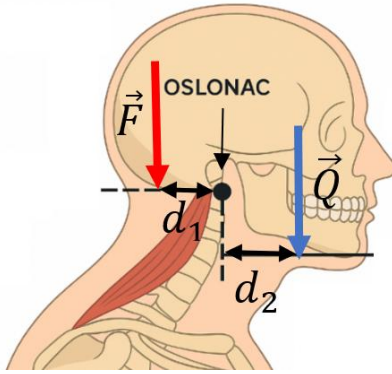
Na primer: posle 10 min (600s): $Q = -125,8 \text{ W} \cdot 600 \text{ s} = -75 480 \text{ J}$.

U opštem slučaju, **temperaturna razlika** između tela i okoline **nije konstantna**, pa samim tim ni brzina prenosa toplote nije konstantna, slika 2.6. Bez mehanizma toplotne samoregulacije temperaturna razlika između tela i okoline se smanjuje vremenom, pa samim tim brzina prenosa toplote opada. Matematički model koji opisuje ovakav proces uključuje i toplotni otpor i toplotni kapacitet sistema, što ga čini dinamičkim sistemom. Rešenje odgovarajuće diferencijalne jednačine pokazuje da je brzina prenosa toplote najveća na početku, a zatim opada eksponencijalno tokom vremena, što je detaljno opisano u poglavlju Termoregulacija tela - sistem prvog reda sa negativnom povratnom spregom. Opisane jednačine su istog matematičkog oblika kao Njutnov zakon hlađenja, ali opisuju aktivno regulisani (zatvoreni) sistem, a ne pasivno hlađenje kakvo opisuju Njutnov zakon.



Slika 2.6. Prenos toplote provođenjem između arteriole i venule odvija se kroz okolne slojeve tkiva usled temperaturnog gradijenta između toplije arterijske i hladnije venske krvi. Toplota se prenosi od arteriole ka venuli, a intenzitet prenosa zavisi od lokalne razlike temperatura i termičke provodljivosti tkiva, duž celog segmenta gde su krvni sudovi prostorno bliski. Zona, između arteriole i venule, je označena kao prostor u kojem se dešava prenos toplote procesom provođenja (kondukcije). b) Toplotni tok, tj. toplotni fluks (količina energije koja se u jedinici vremena prenese kroz neku, unapred definisanu površinu) ide od unutrašnjosti tela ka spoljašnjosti. Toplota se stvara u unutrašnjosti tela, zatim se prenosi sloj po sloj ka spolja. Svaki sloj pruža određeni otpor tom toku, u zavisnosti od svog λ . Masno tkivo ima mali koeficijent toplotne provodljivosti λ pa je dobar izolator. Koža i krv pomažu da se toplota prenese ka spolja.

³¹ U literaturi se koristi površina od $1,7 \text{ m}^2$ za referentnog čoveka. Za odraslog muškarca obično $1,8 - 1,9 \text{ m}^2$, dok za ženu $1,6 - 1,7 \text{ m}^2$. Treba imati na umu da površina tela ne zavisi direktno od pola, već od visine i telesne mase.



Slika 3.5. Šematski prikaz poluge prve vrste na primeru glave. Osa oslonca nalazi se u spoju potiljačne kosti i atlasa. Sila \vec{F} predstavlja akciju ekstenzora vrata. Veličina d_1 je krak mišićne sile, odnosno normalno rastojanje od ose oslonca do linije dejstva sile \vec{F} . Veličina \vec{Q} je težina glave (≈ 49 N) koja deluje naniže kroz težište glave. Veličina d_2 je krak težine, odnosno normalno rastojanje od ose oslonca do linije dejstva sile \vec{Q} (≈ 4 cm).

Poluga druge vrste je mehanički sistem u kojem se otpor nalazi između oslonca i sile:

OSLONAC \longrightarrow OTPOR \longrightarrow SILA

Ova konfiguracija uvek daje mehaničku prednost, jer mišić deluje preko dužeg kraka nego što je krak otpora. U biomehanici, ovo znači da se veliki otpor može savladati relativno malom silom.

U slučaju poluge druge vrste u ljudskom telu, karakterističan primer je stajanje na prstima. U ovoj biomehaničkoj konfiguraciji, oslonac se nalazi na prednjem delu stopala, odnosno u zglobu prstiju. Otpor predstavlja težinu tela, koja deluje vertikalno nadole kroz centar mase, a približno u ravni sa skočnim zglobovom (na sredini stopala). Sila potrebna za savladavanje ovog otpora dolazi od mišića zadnje strane potkolenice, pre svega od mišića lista. Ovi mišići se završavaju zajedničkom tetivom Ahilovom tetivom, koja se pripaja za petnu kost. Ovaj raspored omogućava efikasno podizanje tela na prste, pri čemu se zahvaljujući dužem kraku sile ostvaruje mehanička prednost, što znači da se relativno mala mišićna sila može iskoristiti za podizanje velike težine tela. U mehaničkom smislu, ravnoteža sistema ostvaruje se kroz jednakost momenata mišićne sile i težine tela:

$$F \cdot d_1 = Q \cdot d_2 \quad (3.22)$$

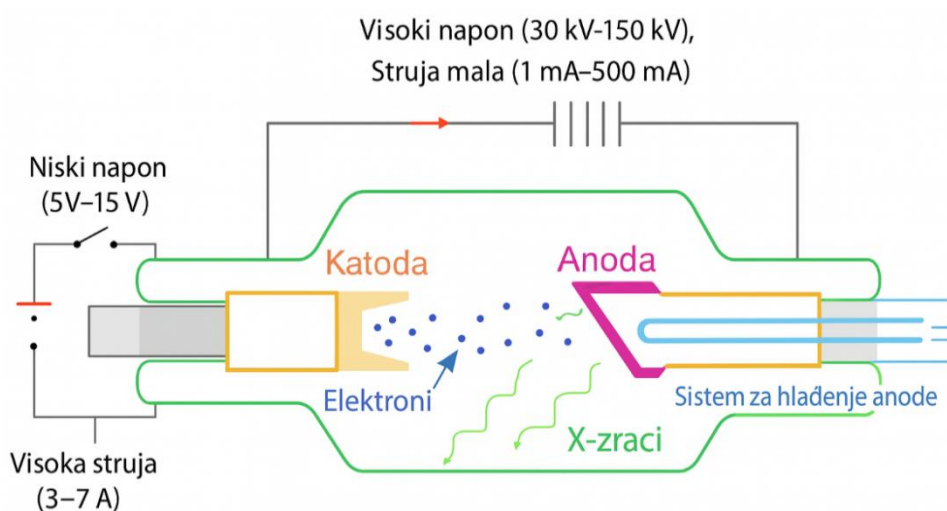
gde su F sila koju generišu mišići lista, d_1 krak sile (najkraće (normalno) rastojanje od oslonca do linije dejstva sile \vec{F}), Q je težina tela i d_2 krak otpora (najkraće (normalno) rastojanje od oslonca do linije dejstva sile \vec{Q}). Iz jednačine (3.22) sledi da ukoliko je $d_1 > d_2$ što je slučaj u ovom biomehaničkom sistemu, mišićna sila može biti manja od težine tela, a da se i dalje održava ravnoteža. Ovo čini polugu druge vrste izuzetno efikasnom, jer omogućava izvršenje značajnog fizičkog rada uz relativno mali energetske utrošak. U konkretnim brojevima, ako je krak sile pet puta duži od kraka otpora, mišići treba da generišu silu koja je pet puta manja od težine tela koje se podiže. Iako je ovakva konfiguracija u telu retka, upravo zbog ove efikasnosti igra ključnu ulogu u aktivnostima kao što su hodanje, trčanje i penjanje.

Na primer, neka je težina tela osobe približno $Q = 600$ N, krak težine tela je približno $d_2 = 0,05$ m. Neka je krak mišićne sile $d_1 = 0,25$ m. Iz ravnoteže momenata u odnosu na oslonac, jednačina (3.22), sledi da je: $F = \frac{Q \cdot d_2}{d_1} = \frac{600 \text{ N} \cdot 0,05 \text{ m}}{0,25 \text{ m}} = 120$ N. Ovaj rezultat jasno pokazuje da mišići lista, zahvaljujući povoljnijem mehaničkom rasporedu, moraju da generišu svega 120 N sile, da bi savladali 600 N težine. Ovakav odnos je rezultat izražene mehaničke prednosti (koeficijent prenosa), numerički izražene kao:

$$\text{Mehanička prednost} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{0,25 \text{ m}}{0,05 \text{ m}} = 5 \quad (3.23)$$

Nakon što su elektroni emitovani, neophodno je da se uspostavi snažno električno polje koje će ih ubrzati ka anodi. To se postiže primenom visokog napona između katode i anode, najčešće u opsegu od 30 kV do 150 kV. Ovaj visoki napon, za razliku od niskonaponskog kola grejanja filameta katode, potiče iz potpuno zasebnog izvora i predstavlja ključni faktor u određivanju energije koju elektroni postižu tokom ubrzanja. Važno je naglasiti da se kroz filament katode propušta struja visokog intenziteta, ali niskog napona, čija je uloga isključivo u održavanju potrebne temperature za emisiju elektrona. Suprotno tome, visokonaponska struja koja protiče kroz ceo sistem odgovorna je za ubrzavanje emitovanih elektrona i stvaranje rendgenskih fotona. Ta dva električna sistema, niskonaponski i visokonaponski, funkcionišu nezavisno, ali su oba neophodna za ispravan i efikasan rad rendgenske cevi.

Pouzdanost i stabilnost termoelektronske emisije imaju direktan uticaj na stabilnost i kvalitet rendgenskog zračenja. Bez neprekidne i stabilne emisije elektrona, ne bi bilo moguće obezbediti konzistentan tok ubrzanih elektrona ka anodi, niti održati kontinuirano stvaranje rendgenskih zraka koji se koriste u medicinskoj dijagnostici, industriji i naučnim istraživanjima.



Slika 4.5. Prikazana je šema Rendgenske cevi. U pitanju je vakuumaska cev u kojoj su zaronjene katoda i anoda povezane na visoki napon. Katoda je negativna i sa nje kreću elektroni, prema anodi koja je pozitivna. Elektroni se ubrzavaju zahvaljujući razlici potencijala tj. postojanja napona između katode i anode. Katoda može biti užarena volframova žica koja deluje kao izvor elektrona. Kada se katoda zagreje, jer je povezana i na izvor niskog napona, prilikom prolaska struje (obično 3-7A) iz nje izlaze elektroni putem termoelektronske emisije. Elektroni (plave tačkice koje idu u desno) nastali iz katode, ubrzavaju se ka anodi pod dejstvom visokog napona. Rendgenska cev je ispražnjena (vakuum), što omogućava da se elektroni nesmetano kreću bez sudara sa molekulima vazduha. Anoda može biti npr. bakarna, sa volframovom metom (označena ljubičastom bojom). Ubrzani elektroni udaraju u anodu pri čemu dolazi do emitovanja rendgenskog zračenja (zelene linije koje izlaze iz mete). Rendgensko zračenje (X-zruci) se emituje iz mesta gde su elektroni pogodili volframovu metu. Većina energije se pretvara u toplotu, a samo mali deo (manje od 1%) u korisno X-zračenje. Zbog toga se anoda zagreva što se reguliše kroz korišćenje rotirajuće anode. Na slici je prikazan i izvor visokog napona koji obezbeđuje visoki napon (npr. 30 – 150 kV) između katode (negativna) i anode (pozitivna), čime se elektroni ubrzavaju. Kada elektroni udare u metu nastaje zakočno zračenje (nem. *bremsstrahlung*) usled kočenja elektrona, dok karakteristično zračenje nastaje kada ubrzani elektroni ekscituju unutrašnje elektrone iz atoma volframa.

Da li će elektron koji je došao do anode izazvati zakočno ili karakteristično rendgensko zračenje zavisi od kinetičke energije koju poseduje, tj. koju je dobio radom električnih sila usled postojanja napona između katode i anode. U fizičkom smislu, **zakočno zračenje** predstavlja rezultat međudejstva između brzog elektrona i pozitivno naelektrisanog jezgra atoma mete, slika 4.6.

Kao što je rečeno, elektroni se u rendgenskoj cevi ubrzavaju velikom razlikom potencijala između katode i anode, reda veličine od 50 kV do 150 kV. Kada elektron velikom brzinom uleti u elektromagnetno polje jezgra, biva privučen njegovim naelektrisanjem i skreće sa svoje pravolinijske

$$UV_{indeks} = \frac{E_{eff}}{0.025 \text{ W/m}^2} \quad (4.28)$$

Vrednost $0,025 \text{ W/m}^2$ u jednačini (4.28) predstavlja **standardnu referentnu efektivnu iradijansu** ultraljubičastog zračenja i uvedena je konvencijom, kako bi numeričke vrednosti UV indeksa bile praktične, pregledne i lako razumljive u medicinskoj primeni. Fizički posmatrano, efektivna iradijansa UV zračenja koja dospeva do Zemljine površine ima tipične vrednosti reda veličine nekoliko desetina milivata po kvadratnom metru. Ako bi se UV indeks definisao direktno u vatima po kvadratnom metru, dobijale bi se vrlo male i nepraktične brojčane vrednosti. Zbog toga je uvedeno skaliranje, pri čemu je $0,025 \text{ W/m}^2$ izabrano kao jedinica UV indeksa. Sa medicinskog stanovišta, ova referentna vrednost približno odgovara efektivnoj UV iradijansi koja, pri izlaganju reda veličine desetina minuta, može dovesti do pojave eritema kod osetljive kože. Time UV indeks postaje ne samo fizički, već i biološki relevantna veličina, jer njegova numerička vrednost direktno korelira sa verovatnoćom nastanka akutnih oštećenja kože. Važno je naglasiti da vrednost $0,025 \text{ W/m}^2$ nema posebno fizičko značenje u smislu fundamentalne konstante, već je pažljivo izabrana radi standardizacije merenja i ujednačene interpretacije UV indeksa širom sveta. Ona omogućava da se složeni spektralni podaci UV zračenja, ponderisani biološkim dejstvom, svedu na jednostavnu i univerzalno primenljivu numeričku skalu. Konvencija po kojoj se UV indeks definiše kao odnos efektivne UV iradijanse i referentne vrednosti od $0,025 \text{ W/m}^2$ usvojena je 1997. godine u okviru međunarodne saradnje Svetske meteorološke organizacije (WMO) i Svetske zdravstvene organizacije (WHO). Cilj je bio uvođenje jedinstvene, globalno primenljive skale koja bi povezala fizička merenja UV zračenja sa njegovim biološkim efektima i omogućila jasno zdravstveno upozoravanje stanovništva.

Na ovaj način, tipične dnevne vrednosti UV indeksa dobijaju se u opsegu od približno 0 do 11 i više, što omogućava jednostavnu klasifikaciju nivoa rizika (nizak, umeren, visok, veoma visok i ekstrem), tabela 4.1.

Izlaganje ultraljubičastom zračenju predstavlja značajan fizički i biološki faktor rizika, čiji efekti nisu jednaki kod svih individua. Posebno osetljive grupe stanovništva, kao što su deca, trudnice i fotosenzitivni pacijenti, zahtevaju specifičan pristup u proceni izloženosti i tumačenju UV indeksa. U medicinskoj fizici, razumevanje ovih razlika zasniva se na pojmu **doze zračenja**, odnosno na količini energije koju biološko tkivo apsorbuje tokom vremena.

Tabela 4.1. Vrednosti UV indeksa, zdravstveni rizik i eritemna doza.

UV indeks	Nivo rizika	Medicinski efekti	Približno vreme do pojave eritema (MED)*
0 – 2	Nizak	Zanemarljiv biološki efekat, nema akutnog rizika	> 60 min
3 – 5	Umeren	Moguć blagi eritem pri dužem izlaganju	30 – 60 min
6 – 7	Visok	Eritem i površinska oštećenja kože	15 – 30 min
8 – 10	Veoma visok	Brz nastanak opekotina, izražen akutni efekat	10 – 15 min
≥ 11	Ekstreman	Veoma visok rizik od teških akutnih i hroničnih oštećenja	< 10 min

***Napomena:** Navedena vremena su orijentaciona i odnose se na osobe svetlije puti (tip I–II po Fitzpatricku), pri direktnom izlaganju suncu bez zaštite. Stvarna vrednost minimalne eritemne doze zavisi od tipa kože, prethodne adaptacije na Sunčevo zračenje, starosti, prisustva fotosenzitivnih oboljenja ili lekova, kao i od ugla upada i refleksije UV zračenja.

Kod dece, biološki odgovor na UV zračenje je izraženiji zbog anatomske-fizioloških osobina kože. Dečja koža je tanja, sa manjom koncentracijom melanina i slabije razvijenim zaštitnim

LITERATURA

- Ackerman, E., Ellis, L. B. M., & Williams, L. E. (1979). *Biophysical science*. Prentice-Hall.
- Aničin, I., Draganić, I., Jovanović, M., Jokić, S., Radojčić, M., Kopečni, M., Savković, N., & Savić, I. (1998). *Radioaktivnost*. Institut za nuklearne nauke „Vinča“.
- Attix, F. H. (2004). *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley & Sons.
- Bailey, D. L., Townsend, D. W., Valk, P. E., & Maisey, M. N. (2005). *Positron emission tomography: Basic sciences*. Springer.
- Ben-Avraham, D., & Havlin, S. (2005). *Diffusion and reactions in fractals and disordered systems*. Cambridge University Press.
- Bijker, K. E., De Groot, G., & Hollander, A. P. (2002). Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(6), 556–561.
- Birch, H. L. (2007). Tendon matrix composition and turnover in relation to functional requirements. *International Journal of Experimental Pathology*, 88, 241–248.
- Bobbert, M. F., & Casius, L. J. (2005). Is the countermovement on jump height due to active state development? *Medicine and Science in Sport and Exercise*, 37, 440–446.
- Bransden, B. H., & Joachain, C. J. (1990). *Physics of atoms and molecules*. John Wiley & Sons.
- Bransden, B. H., & Joachain, C. J. (2000). *Quantum mechanics*. Pearson Education Limited.
- Brnjas-Kraljević, J., & Krilov, D. (2012). *Fizika za studente medicine*. Medicinska naklada.
- Brown, H., & Prescott, R. (2014). *Applied mixed models in medicine*. John Wiley & Sons.
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., Jr., & Boone, J. M. (2012). *The essential physics of medical imaging*. Wolters Kluwer Lippincott Williams & Wilkins.
- Capra, F. (1996). *The web of life: A new scientific understanding of living systems*. Anchor Books.
- Carson, E. R., Cobelli, C., & Finkelstein, L. (1983). *The mathematical modeling of metabolic and endocrine systems*. John Wiley & Sons.
- Checkland, P. (1981). *Systems thinking, systems practice*. John Wiley & Sons.
- Cherniha, R., & Davydovych, V. (2017). *Nonlinear reaction-diffusion systems: Conditional symmetry, exact solutions and their applications in biology*. Springer.
- Cherry, S. R., Sorenson, J. A., & Phelps, M. E. (2012). *Physics in nuclear medicine*. Elsevier Saunders.
- Cobelli, C., & Carson, E. R. (2008). *Introduction to modeling in physiology and medicine*. Academic Press.
- Cotterill, R. (2002). *Biophysics: An introduction*. John Wiley & Sons.
- Crank, J. (1980). *The mathematics of diffusion*. Oxford University Press.
- Davidovits, P. (2019). *Physics in biology and medicine*. Academic Press.

- Duck, F. A. (1990). *Physical properties of tissues: A comprehensive reference book*. Academic Press.
- Einthoven, W. (1903). Le télécardiogramme. *Archives Internationales de Physiologie*, 1, 132–164.
- Enderle, J. D., Blanchard, S. M., & Bronzino, J. D. (1994). *Fractal physiology*. Oxford University Press.
- Enderle, J. D., Blanchard, S. M., & Bronzino, J. D. (2005). *Introduction to biomedical engineering*. Elsevier Academic Press.
- Fermi, E. (1937). *Thermodynamics*. Dover Publications.
- Firestone, R. B., & Shirley, V. S. (1996). *Table of isotopes*. John Wiley & Sons.
- Foster, K. R., & Schwan, H. P. (1996). Dielectric properties of tissues and biological materials: A critical review. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 17(1), 25–104.
- Fung, Y.-C. (1993). *Biomechanics: Mechanical properties of living tissues*. Springer.
- Geddes, L. A., & Baker, L. E. (1989). *Principles of applied biomedical instrumentation*. John Wiley & Sons.
- Glaser, R. (2001). *Biophysics*. Springer.
- Goldsmith, W. (2001). *Biomechanics of impact*. Cambridge University Press.
- Gunzler, D. D., Perzynski, A. P., & Carle, A. C. (2021). *Structural equation modeling for health and medicine*. Chapman & Hall/CRC.
- Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2018). *Radiobiology for the radiologist* (8th ed.). Wolters Kluwer.
- Hendee, W. R., & Ritenour, E. R. (2002). *Medical imaging physics*. John Wiley & Sons.
- Herman, I. P. (2008). *Physics of the human body*. Springer.
- Hobbie, R. K., & Roth, B. J. (2015). *Intermediate physics for medicine and biology*. Springer.
- Hoppensteadt, F. C., & Peskin, C. S. (2012). *Modeling and simulation in medicine and life sciences*. Springer.
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation* (SSG-46).
- International Commission on Radiological Protection. (2007). *The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103)*. *Annals of the ICRP*, 37(2–4).
- Joines, W. T., Zhang, Y., Li, C., & Jirtle, R. L. (1994). The measured electrical properties of normal and malignant human tissues from 50 to 900 MHz. *Medical Physics*, 21(4), 547–550.
- Kaku, M. (2011). *Fizika budućnosti* (prevod sa engleskog: *Physics of the future*). Laguna.
- Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422–440.
- Kast, F. E., & Rosenzweig, J. E. (1972). General systems theory: Applications for organization and management. *Academy of Management Journal*, 15(4), 447–465.
- Klir, G. J. (1969). *An approach to general systems theory*. Van Nostrand Reinhold.

- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- Kondepudi, D., & Prigogine, I. (2015). *Modern thermodynamics: From heat engines to dissipative structures* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Kowalsky, R. J., & Falen, S. W. (2011). *Radiopharmaceuticals in nuclear pharmacy and nuclear medicine*. American Pharmacists Association (APhA).
- Krane, K. S. (1988). *Introductory nuclear physics*. John Wiley & Sons.
- Labeit, D., Watanabe, K., Witt, C., Fujita, H., Wu, Y., Lahmers, S., Funck, T., Labeit, S., & Granzier, H. (2003). Calcium-dependent molecular spring elements in the giant protein titin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *100*, 13716–13721.
- Landsberg, G. S. (1967). *Optika*. Naučna knjiga.
- Latash, M. L., & Zatsiorsky, V. M. (2015). *Biomechanics and motor control*. Academic Press.
- Lavrova, I. V. (1981). *Kurs fiziki*. Prosveščenie.
- Lee, E. J., Joumaa, V., & Herzog, W. (2007). New insights into passive force enhancement in skeletal muscles. *Journal of Biomechanics*, *40*, 719–727.
- LeifiPhysik. (n.d.). *Charakteristische Strahlung*. <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/roentgenstrahlung/grundwissen/charakteristische-strahlung>
- López, Y., Banga, J. R., & Balsa-Canto, E. (2019). Identification methods for systems biology models: A critical review and analysis. *BMC Bioinformatics*, *20*, 223.
- Luca, A., & Kellett, M. (2020). A new evaluation of the nuclear decay data of ²²³Ra. *EPJ Web of Conferences*, *239*, 23002.
- Malmivuo, J., & Plonsey, R. (1995). *Bioelectromagnetism: Principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields*. Oxford University Press.
- Mesarović, M. D., & Takahara, Y. (1975). *General systems theory: Mathematical foundations*. Academic Press.
- Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (2009). *Mechanical behavior of materials*. Cambridge University Press.
- Miller, J. G. (1978). *Living systems*. McGraw-Hill.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2010). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Moser, E., Stahlberg, F., Ladd, M. E., & Trattnig, S. (2012). *Magnetic resonance tomography*. Springer.
- Nashchokin, V. (1979). *Engineering thermodynamics and heat transfer*. Mir Publishers.
- Nielsen, J., & Villadsen, J. (1992). *Bioreaction engineering principles*. Springer.
- Nigg, B. M., & Herzog, W. (2007). *Biomechanics of the musculoskeletal system*. John Wiley & Sons.
- Okun, M. S. (2014). *Medical physics and biomedical engineering*. CRC Press.
- Perry, J., & Burnfield, J. M. (2010). Gait analysis: Normal and pathological function. *Journal of Sports Science and Medicine*, *9*(2), 353.

- Phelps, M. E. (2004). *PET: Molecular imaging and its biological applications*. Springer.
- Podgorsak, E. B. (2005). *Radiation physics for medical physicists*. Springer.
- Rogers, K. (2000). *The Usborne illustrated dictionary of science*. Usborne Publishing Ltd.
- Rontó, G., & Tarján, I. (1994). *An introduction to biophysics with medical orientation*. Akadémiai Kiadó.
- Seyfarth, A., Geyer, H., Gunther, M., & Blickhan, R. A. (2002). A movement criterion for running. *Journal of Biomechanics*, 35, 649–655.
- Simonović, J., Vuković, J., Ristanović, D., Radovanović, R., & Popov, D. (1997). *Biofizika u medicini*. Medicinska knjiga – Medicinske komunikacije.
- Skyttner, L. (2001). *General systems theory: Ideas and applications*. World Scientific.
- Stojanović-Krasić, M., Jovanović, S., & Mančić, A. (2021). *Fizika – mehanika*. Univerzitet u Nišu.
- Strogatz, S. H. (2015). *Nonlinear dynamics and chaos with applications to physics, biology, chemistry and engineering*. CRC Press.
- Terranova, F. (2021). *Particle & nuclear physics*. Oxford University Press.
- Von Bertalanffy, L. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine*. MIT Press.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons.
- Winiarski, S., & Rutkowska-Kucharska, A. (2009). Estimated ground reaction force in normal and pathological gait. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 11(1).
- Zatsiorsky, V. M. (2002). *Kinetics of human motion*. Human Kinetics.
- JMP. (n.d.). *Learn JMP*. <https://community.jmp.com/t5/Learn-JMP/ct-p/learn-jmp>