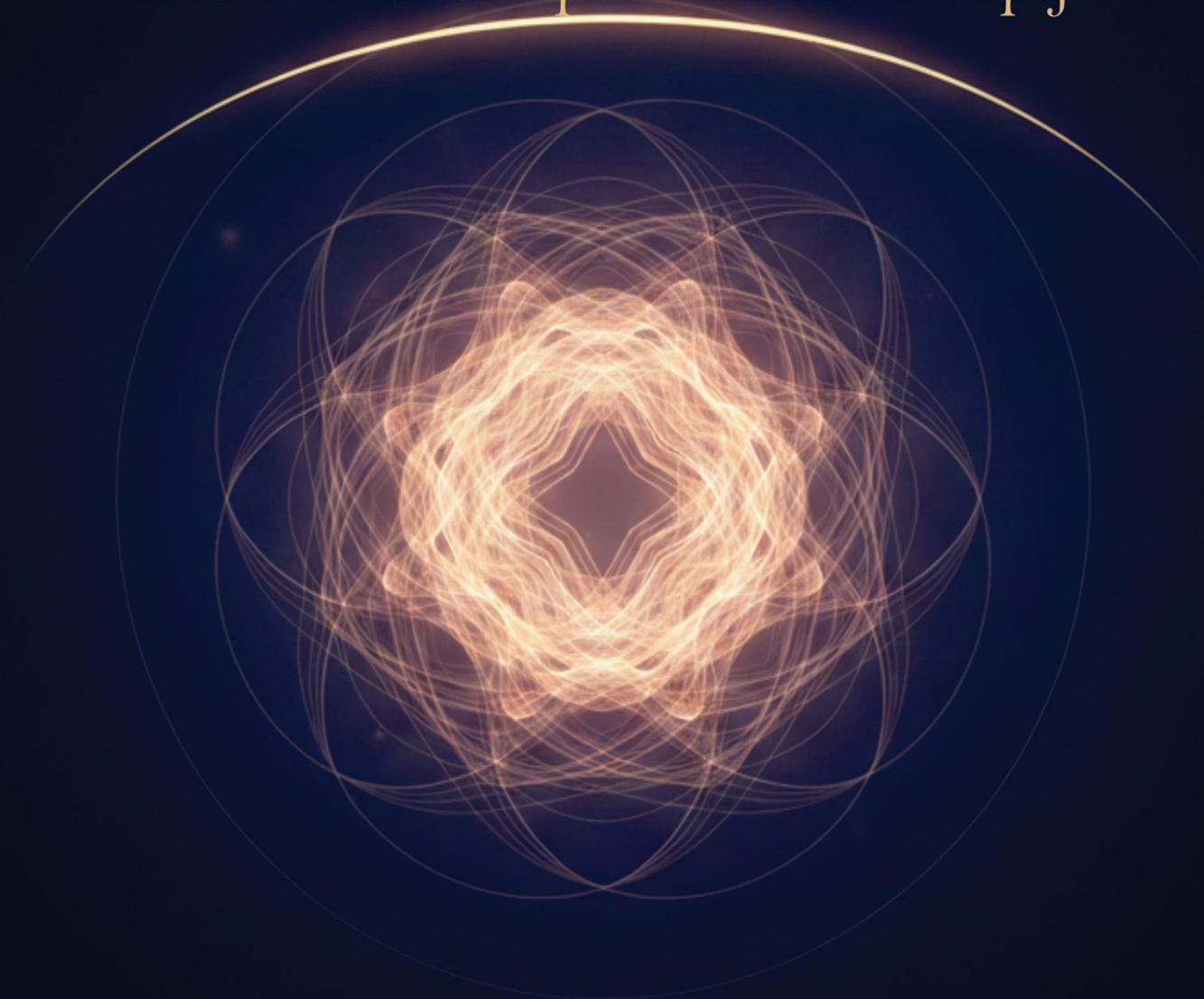


# TIHA SIMFONIJA CELIC

Znanstveni utrip svetlobne terapije



PRIROČNIK O FOTOBIMODULACIJI

## Kazalo

1. Uvod.....	3
2. Zgodovina svetlobne terapije.....	5
3. Biološki mehanizmi fotobiomodulacije .....	6
4. Frekvenčna modulacija svetlobe.....	10
5. Klinične indikacije in parametri fotobiomodulacije (PBM) .....	13
6. Fotobiomodulacija (PBM) in javno zdravje.....	19
7. Fotobiomodulacija (PBM) v veterinarski medicini.....	22
8. Varnost in previdnost.....	25
9. Zaključek in filozofsko-poetični epilog.....	27
10. Literatura.....	28

# 1. Uvod

Svetloba se preliva skozi listje, odseva na vodni gladini, lomi v kristalih in pronica v tkiva. V svojem toku prinaša toplino, življenje in obnovo.

V telesu se svetloba ne konča na površini kože. Vstopa globlje, v tihe strukture življenja, kjer fotoni postanejo sporočila. Tam, v mikro svetu celičnih dihov in mitohondrijskih tokov, se odvija simfonija, ki jo usmerja energija – nevidna, a izmerljiva.

Fotobiomodulacija (PBM), znana tudi kot svetlobna terapija nizkih ravni, predstavlja most med biološko znanostjo in energijsko medicino. Njeni učinki temeljijo na absorpciji svetlobe v encimu citokrom c oksidazi, ki deluje kot fotoobčutljiv sprejemnik svetlobnih fotonov. Ta interakcija sproži kaskado biofizikalnih in biokemičnih procesov, ki povečajo sintezo ATP, uravnavajo oksidativni stres in vzpostavljajo homeostazo.

Fotobiomodulacija (PBM) je danes priznana kot ena izmed najvarnejših in najbolj vsestranskih neinvazivnih terapevtskih metod. Njeno delovanje presega lokalni učinek na tkivo, saj sproži sistemske biološke odzive, ki segajo od izboljšanja mikrocirkulacije do neuroendokrine regulacije. Uporabljamo jo pri podpori regeneracije tkiv, uravnavanju vnetja, izboljševanju mikrocirkulacije in kognitivnih funkcij. V svojem bistvu je več kot le metoda, predstavlja dialog med svetlobo in življenjem. Svetloba vstopa v biološki prostor ne le kot zunanja sila, temveč kot del narave, ki v celicah prebuja njihovo inherentno sposobnost samozdravljenja.

Ta priročnik združuje znanstvene dokaze, klinične izkušnje in filozofsko razsežnost svetlobe – z namenom, da se fotobiomodulacija razume ne le kot terapevtsko orodje, temveč kot most med fiziologijo in svetlobno inteligenco narave.

## Definicije in okrajšave

**Helioterapija** - pomeni zdravljenje s sončno svetlobo. Izvira iz grških besed hēlios (sonce) in therapeia (zdravljenje).

**Lupus vulgaris** - kronična oblika kožne tuberkuloze, ki jo povzroča bakterija *Mycobacterium tuberculosis*.

**PBM** – fotobiomodulacija (ang. photobiomodulation) ali svetlobna terapija nizkih ravni

**Melanopsin** - svetlobi občutljiv pigment (fotopigment), ki se nahaja v nekaterih posebnih celicah mrežnice v očesu

**ATP** - adenzin trifosfata

**CCO** – citokrom C oksidaza

**ROS** - reaktivne kisikove spojine

**NO** – dušikov oksid

**FM** – frekvenčna modulacija

**Epitelizacija** - proces, med katerim se celice na površini kože ali sluznice razmnožujejo, da ponovno prekrijejo poškodbo. Sledi kontrakcija, to je spontano zapiranje kožnih ran po celotni debelini. Nato vezivne celice (fibroblasti) na mestu poškodbe proizvajajo novo vezivno tkivo.

**DOMS** (delayed onset muscle soreness) - Mišična bolečina po treningu, znana kot zapoznela mišična bolečina, se običajno pojavi med 24 in 72 urami po vadbi. Ta bolečina je posledica mikropoškodb mišičnih vlaken, ki nastanejo med fizično aktivnostjo, še posebej pri neobičajnih ali intenzivnejših gibih

**SAD** – (Seasonal affectives disorder) sezonska razpoloženjska motnja

**NASA** – ameriška vesoljska agencija NASA

**Mitochondriji** – celični organeli, ki skrbijo za nastajanje celične energije

**Kaheksija** - je sindrom, pri katerem presnovne spremembe, po vsej verjetnosti povzročene zaradi kroničnega delovanja vnetnih dejavnikov, vodijo do shiranosti oz. izgube telesne mase, ki se je ne more nadomestiti samo s prehrano. Izguba vključuje tako maščobe kot tudi pusto telesno maso (tj. skeletno mišičnino) in tako vključuje klinične znake, kot so zmanjšanje telesne teže, atrofija mišic, oslabelost ter izgubo apetita.

## 2. Zgodovina svetlobne terapije

Človek je svetlobo od nekdanj doživljal kot simbol življenja, zdravja in transcendence. Starodavne civilizacije so razumele, da svetloba ni zgolj naravni pojav, temveč nosilka življenjske sile. Že stari Egipčani so soncu pripisovali božansko moč in zdravilno silo, Grki so gradili helioterapevtske templje, **Hipokrat** pa je priporočal izpostavljanje soncu pri različnih obolenjih. Prve podatke o uporabi svetlobe v terapevtske namene najdemo že pri Aristotelu. Za stare civilizacije je svetloba pomenila več kot le naravni pojav – bila je življenjski princip, ki vzdržuje red med telesom in duhom.

V 19. stoletju se je intuitivno razumevanje svetlobe začelo povezovati z znanostjo. **Niels Ryberg Finsen**, danski zdravnik, je dokazal, da ima svetloba terapevtske učinke pri zdravljenju kožnih bolezni, kot je lupus vulgaris. Leta 1903 je za svoje delo prejel **Nobelovo nagrado za medicino**, s čimer je postavil znanstvene temelje svetlobne terapije.

Približno v istem času je v Avstriji in na Gorenjskem deloval **Arnold Rikli (1823–1906)**, znan kot "**Sončni zdravnik z Bleda**". Bil je pionir naravne svetlobne terapije, ki je poudarjal pomen sonca, zraka, vode in gibanja. Njegov pristop je bil celosten: svetloba naj bi delovala kot moralni, duševni in telesni regulator, ki človeku vrača notranjo harmonijo. Riklijeve "kopeli svetlobe in zraka" so bile namenjene krepitvi življenjske sile, kar danes razumemo kot spodbudo homeostaze in mitohondrijske regeneracije. **Znan je njegov rek "Zrak je dober, voda je boljša, svetloba je najboljša!"**.

V 20. stoletju se je svetloba preselila iz narave v laboratorij. Leta 1960 je bil izumljen **laser**, kar je odprlo novo poglavje v medicini. Češki znanstvenik **Endre Mester** je po naključju odkril, da laserska svetloba ne uničuje tkiva, temveč spodbuja njegovo regeneracijo – in tako je nastal pojem biostimulacija, predhodnica današnje fotobiomodulacije - PBM.

Od takrat se je razvilo več vej svetlobne medicine, ki skupaj tvorijo celostno polje svetlobnih terapij:

- **Helioterapija** – uporaba naravne sončne svetlobe v terapevtske namene, kot jo je izvajal Rikli.
- **Fototerapija** – uporaba umetnih virov svetlobe (npr. UV pri luskavici ali modre svetlobe pri neonatalni zlatenici, aknah, protimikrobnem delovanju, vplivi na melanosin, torej cirkadialne ritme...).

- **Kromoterapija** – uporaba barvnega spektra za psihofizično ravnovesje.
- **LED terapija** – uporaba diodnih svetlobnih virov z energijo nižjih ravni, ki omogočajo nežno, a učinkovito celično regulacijo.
- **Laserska terapija** – sodobna biomedicinska uporaba rdeče in infrardeče svetlobe, utemeljena na celičnih mehanizmih.

V 80. in 90. letih so raziskave PBM napredovale na področjih regenerativne medicine, nevrologije in športne rehabilitacije. Znanstveniki so dokazali, da svetlobni fotoni, absorbirani v mitohondrijih, sprožijo povečano sintezo **adenozin trifosfata (ATP)**, kar izboljša energijsko presnovo celic in pospeši procese obnove tkiva.

**NASA** je med prvimi začela raziskovati uporabo svetlobnih diod (LED) za regeneracijo tkiv v pogojih mikrogravitacije, kar je dodatno utrdilo znanstveno verodostojnost metode.

V 21. stoletju je FBM postala **znanstveno potrjena terapijska smer**. V novem tisočletju se je fotobiomodulacija razširila tudi v nevroznanost, psihiatrijo, kardiovaskularno medicino in veterino.

Danes PBM ni več le dopolnilna tehnika, temveč priznana terapijska smer, vključena v klinične smernice in raziskovalne protokole po vsem svetu. Od antičnih sončnih templjev do sodobnih medicinskih laboratorijev se vleče ista nit: **svetloba kot nosilka življenja in podpora zdravljenju**.

### 3. Biološki mehanizmi fotobiomodulacije

FBM vpliva na mitohondrije, povečuje produkcijo **adenozin trifosfata (ATP)**, modulira vnetne procese in spodbuja regeneracijo tkiv.

V središču vsake celice utripa tiha tovarna energije – **mitohondrij**. Njegova naloga ni le proizvajati ATP, temveč tudi usklajevati celični ritem, odzive na stres in obnovo. Ko svetloba doseže mitohondrij, se začne proces, ki presega mehanično razumevanje biologije – začne se **fotonski dialog med energijo in življenjem**.

#### Mitohondrij in ATP

Ključni igralec v tem procesu je **encim citokrom c oksidaza (CCO)**, ki v verigi oksidativne fosforilacije deluje kot fotoobčutljiv kromofor. Ko absorbira fotone rdeče ali bližnje infrardeče svetlobe (valovne dolžine med 600–1100 nm) v tako imenovanem fototerapevtskem oknu, se poveča pretočnost elektronov, sprosti dušikov oksid (NO) in vzpostavi izboljššan pretok kisika. Rezultat je povečana sinteza ATP – **osnovne valute celične energije**.

## **Signalne poti in vnetni mediatorji**

Učinki PBM niso omejeni le na energijo. Aktivacija CCO sproži **kaskado signalnih poti**, vključno z:

- aktivacijo transkripcijskih faktorjev (NF- $\kappa$ B, AP-1),
- uravnavanjem vnetnih mediatorjev,
- stimulacijo proliferacije celic,
- povečano sintezo antioksidativnih encimov.

Zmerni nivo reaktivnih kisikovih spojin (ROS) in NO delujeta kot signalni molekuli, ki spodbujata celične obrambne mehanizme in obnovo, medtem ko presežek oksidativnega stresa celice aktivno pomirja. Na ta način PBM deluje **homeostatsko** – ne vsiljuje spremembe, temveč podpira ravnovesje. Pri poškodbi celice poveča njeno presnovno aktivnost, pri prekomerni aktivaciji pa deluje protivnetno.

## **Bioregulacija in tkivna specifičnost**

Svetloba ne deluje linearno, temveč bioregulativno. Vstopa v sistem, ki sam določi, kako, kje in na kakšen način, glede na potrebe in zaloge, koliko energije bo uporabil. To je eden ključnih razlogov, da PBM deluje tako na rane, kot na živčno tkivo, mišice ali možgane – tam, kjer je celična komunikacija porušena. Učinki se razlikujejo glede na stanje celice, njeno starost in katero tkivo gradi, kar omogoča prilagojeno celično podporo.

## **Kvantna biologija in celična komunikacija**

Z vidika kvantne biologije se PBM razlaga kot koherenca med svetlobo in biološkimi strukturami. Fotoni ne prenašajo le energije, temveč tudi informacije, ki vplivajo na elektromagnetno polje celice. Tako PBM odpira

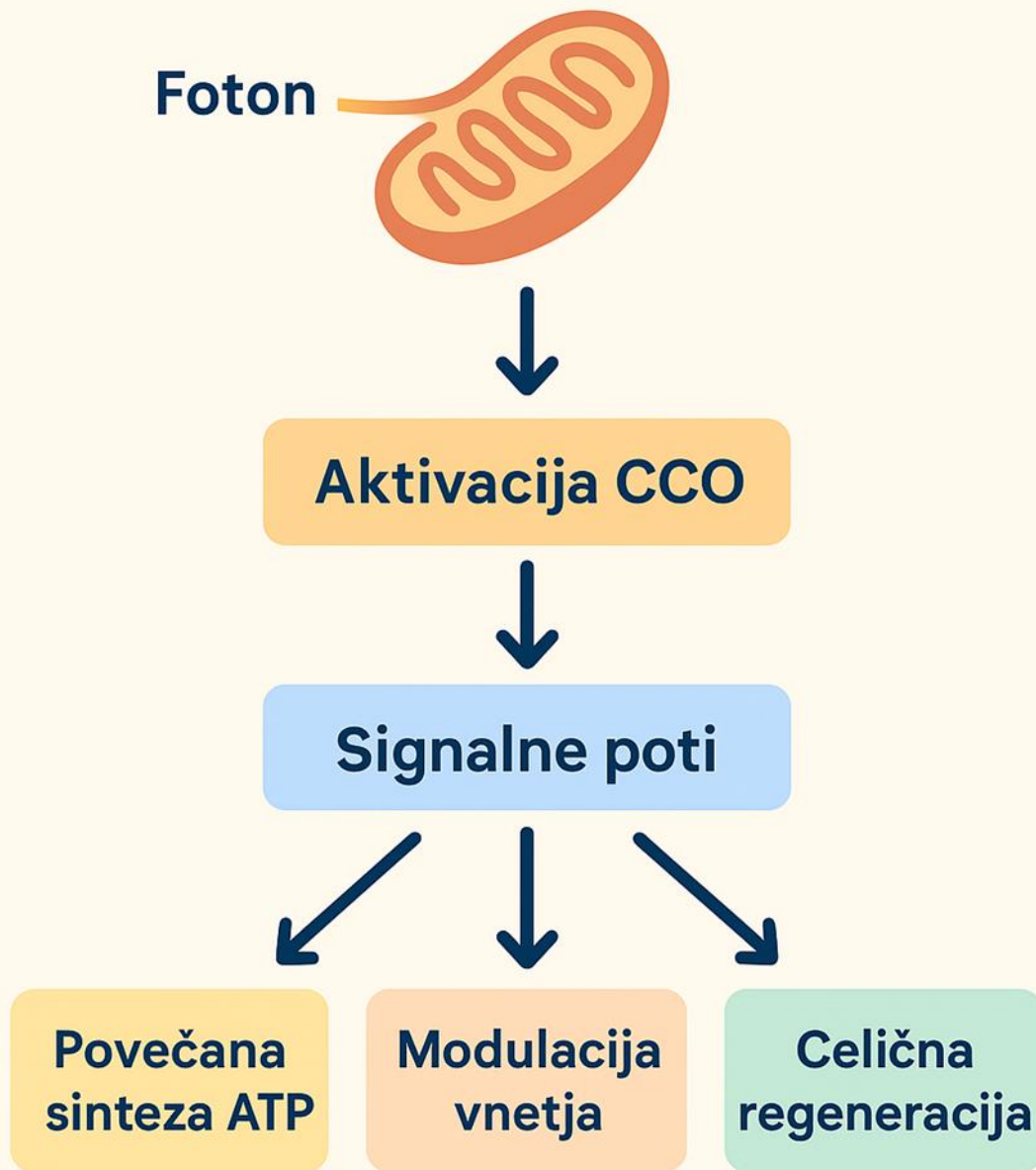
vrata novi paradigmi v medicini. Svetloba ni več zgolj stimulans, temveč nosilka **celičnega spomina in komunikacije**.

Valovna dolžina (nm)	Ciljni kromofor / mehanizem	Signalne molekule	Glavni celični učinki	Tkivni cilji / primeri
600–700 (rdeča svetloba)	Citokrom oksidaza (CCO)	c ATP ↑, NO ↑, ROS zmerni	Povečana energija, proliferacija celic, antioksidativni učinki	Povrhnjica, mišice, rane
700–900 (bližnje IR)	CCO, mitohondrijska membrana	ATP ↑, NO ↑, ROS zmerni	Regeneracija tkiv, zmanjšanje vnetja, celična homeostaza	Globoko tkivo, mišice, živčevje
900–1100 (IR, globoka penetracija)	Mitohondriji, citokini	ATP ↑, NO ↑, ROS zmerni	Povečana mikrocirkulacija, modulacija imunskega odgovora	Mišice, sklepi, živčevje, možgani

#### Legenda:

- **ATP ↑** → povečana proizvodnja energije
- **NO ↑** → sprostitelj dušikovega oksida, izboljšanje pretoka krvi in oksigenacije
- **ROS zmerni** → signalni učinek za obnovo in antioksidativno aktivacijo

# Celični učinki fotobiomodulacije



Slika 1: Učinek fotobiomodulacijena celice

## 4 Frekvenčna modulacija svetlobe

Ko svetloba utripa v določenem ritmu, telo zazna informacijo – ne le energijo. To je **frekvenčna modulacija svetlobne terapije**, kjer svetlobni impulz nosi ritem, ki uglašuje živčni, hormonski in regenerativni sistem.

### 4.1 Nogierjeve frekvence – biološki akordi

Frekvenca (Hz)	Ciljni sistem	Potencialna uporaba PBM	Opomba
F - 73	Mentalna in psihična regeneracija	Utrujenost, depresija, nespečnost	Klinična frekvenca za regeneracijo zavesti
G - 146	Možgani in lobanjsko področje	Glavoboli, kognitivne motnje, vestibularne težave (ravnotežje)	Vrtoglavice
A - 292	Akutna stanja, vnetje	Protivnetno, protivirusno	“Urgentna” frekvenca, za začetne reakcije
B - 584	Mišično-skeletni sistem	Bolečine, išias, hernija	Uravnava mišični tonus
C - 1168	Avtonomno živčevje	Stres, anksioznost, nespečnost	Vagusna harmonizacija
D - 2336	Endokrini sistem	Hormonsko ravnovesje, menopavza, ščitnica	Stabilizacija osi HPA
E - 4672	Presnova, prebavila	Metabolni sindrom, jetra, prebava	Energijska stabilizacija trebuha

#### Uporaba Nogierjevih frekvenc

- **Na refleksnih conah ušesa (aurikuloterapija)** – sistemska regulacija preko vagusnih poti (Vagus je najdaljši živec avtonomnega živčnega sistema, in poteka vse od dela možganskega debla, imenovanega medulla, vse do debelega črevesa. Na poti se razveja v številne organe in dele telesa).

- **Na organskih področjih telesa** – lokalna regeneracija, izboljšanje pretoka in signalne koherence.
- Kombinacija obeh omogoča **večstopenjski učinek**: od celične stimulacije do sistemske energetske harmonizacije.

### Priporočila:

- Čas obsevanja: 2–6 minut lokalno, 1–2 minuti aurikularno.
- Moč: nizka do srednja (20–80 mW/cm<sup>2</sup>).
- Pulzni režim: 1–10 Hz za relaksacijo, 20–100 Hz za aktivacijo.

Svetloba ni statična – diha. Tako kot srce utripa in možgani valujejo, ima tudi svetloba svoj notranji ritem. Ko se ta ritem uskladi z ritmom telesa, nastane **frekvenčna resonanca**, subtilni pogovor med svetlobo in življenjem.

V fotobiomodulaciji **frekvenčna modulacija (FM)** pomeni usmerjanje svetlobnega impulza v **točno določenem ritmu**, ki lahko sproži ali pomiri biološke odzive.

V znanstvenem smislu FM pomeni, da se svetloba **pulzno vklaplja in izklaplja** z določeno frekvenco. Celice ne sprejemajo le količine svetlobe, temveč tudi njen ritem. Zato se biološki odzivi razlikujejo:

- **neprekinjena svetloba (CW –continuous wave)** spodbuja metabolizem, rast in regeneracijo,
- **pulzna svetloba (FM – frequency modulation)** pa deluje bolj regulacijsko, nevromodulacijsko in sinhronizacijsko, zlasti na živčno tkivo in mikrožilni tonus.

Raziskave kažejo, da imajo **nižji frekvenčni pulzi (1–10 Hz)** pomirjevalni, regenerativni učinek, medtem ko **višje frekvence (50–1000 Hz)** spodbujajo komunikacijo med celicami in živčnimi mrežami. A prav v tem je skrivnost PBM: **svetloba ne vsiljuje odziva, temveč ponuja informacijo**, ki jo organizem uporabi po svoji notranji inteligenci.

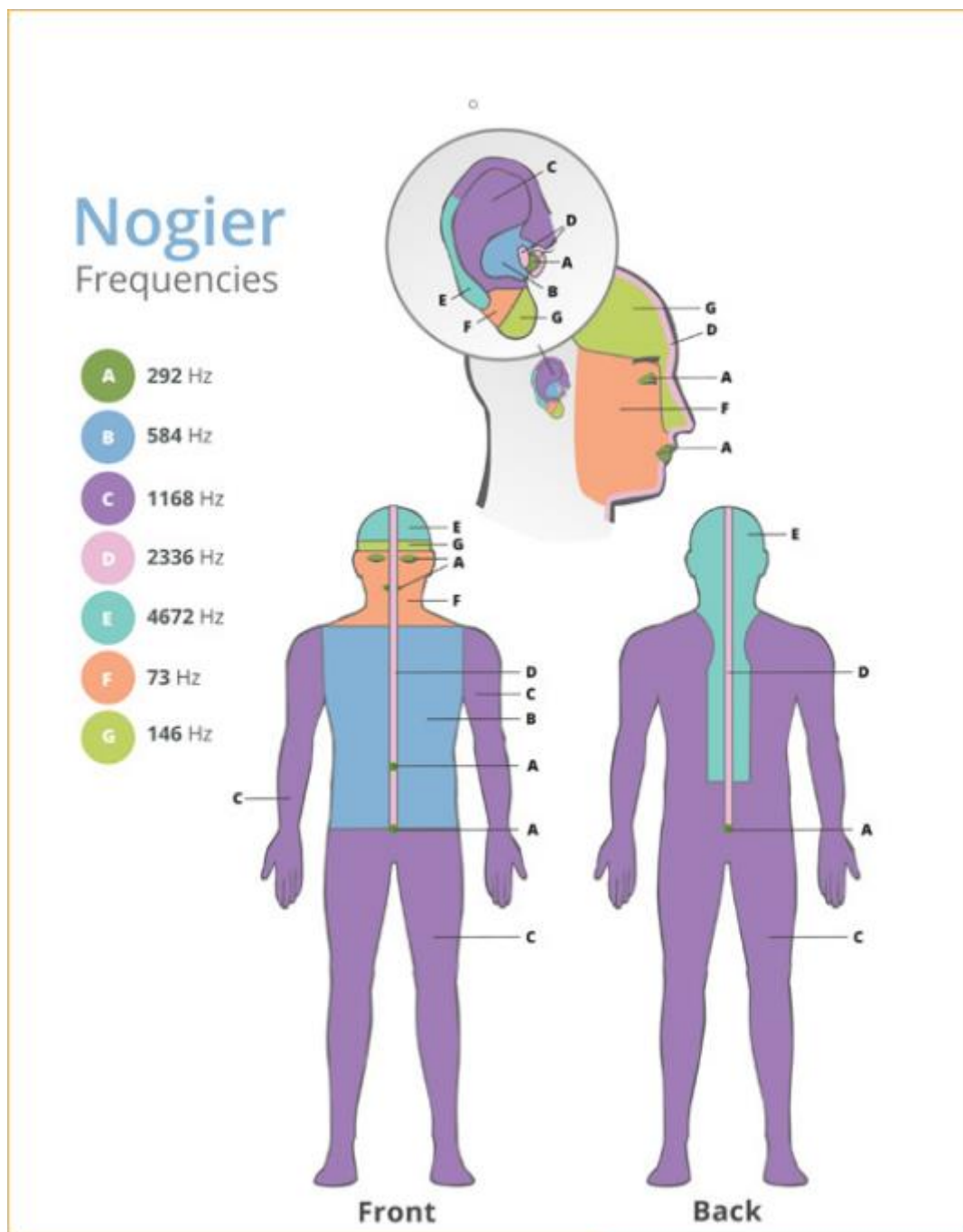
Svetloba ni statična. Tako kot dihanje ali srčni utrip ima tudi ona svoj ritem — frekvenco, ki določa njen ton v dialogu z biološkim sistemom. Ko govorimo o **frekvenčni modulaciji (FM)** v fotobiomodulaciji, govorimo o **umetnosti uravnavanja svetlobnega impulza**, da se ta uskladi z dinamično življenja samega.

Na simbolni ravni je FM **ritem pogovora med svetlobo in časom**. Če je valovna dolžina ton barve, je frekvenca ton trenutka. Tako postane PBM več kot fizikalna metoda – postane **sinhronizacija celičnega časa**.

Vsaka frekvenca nosi svoj pomen:

- nizke frekvence spominjajo na **mirno dihanje celice**,
- srednje na **obnavljanje in rast**,
- visoke pa na **prebujenje in komunikacijo**.

V prihodnosti bo prav frekvenčna modulacija tista, ki bo omogočila individualizirano svetlobno medicino. Tako kot glasbenik uglašuje svoj instrument, bo zdravnik uglaševal frekvenco svetlobe glede na potrebe tkiva, ritmično stanje organizma in subtilne biološke odzive.



Slika 2: Predel telesa, ki ga obsevamo z določeno Nogierjevo frekvenco

## 5 Klinične indikacije in parametri fotobiomodulacije

PBM ni le terapija, temveč spomin telesa na ravnovesje. Svetloba aktivira celično inteligenco, ki sama določi, kako energijo uporabiti: za obnovo, pomiritev ali preobrazbo. Uporablja se pri zdravljenju ran, vnetij, bolečin, neurodegenerativnih bolezni, depresiji, jetlagu in izboljšanju regeneracije.

V nadaljevanju so predstavljene najpogosteje raziskane in klinično preverjene indikacije PBM z orientacijskimi parametri.

## 5.1 Mišično-skeletni sistem

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Moč (mW/cm <sup>2</sup> )	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost/trajanje
Tendinitis tendinopatije	810–850	100–300	8–12	3× tedensko, 2–3 tedne
Artritis (osteo / revmatoidni)	660–850	150–250	6–10	2–3× tedensko, 4–6 tednov
Lumbalgija, išias	808–850	60–150	6–15	10 min, 3× tedensko
Mišične poškodbe	810–980	50–200	4–10	5–10 min, 3–5× tedensko

**Mehanizem:** zmanjšanje vnetnih mediatorjev (TNF- $\alpha$ , IL-6), povečana mikrocirkulacija, aktivacija fibroblastov in regeneracija tkiva

**V športni medicini** se PBM uporablja za **pospešitev regeneracije mišic**, zmanjšanje mlečne kisline, mikropoškodb in vnetja po naporu. Pri redni uporabi izboljša **mišično zmogljivost, vzdržljivost in zmanjšuje pojav DOMS** (delayed onset muscle soreness).

## 5.2 Dermatologija

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Moč (mW/cm <sup>2</sup> )	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost/trajanje
Akne vulgaris	415 / 630–660	30–100	3–6	2–3× tedensko, 4–6 tednov
Celjenje ran,	630–660	50–150	4–8	5× tedensko do

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Moč (mW/cm <sup>2</sup> )	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost/trajanje
brazgotine				epitelizacije
Regeneracija kože po posegih	630–660	25–100	4–6	3× tedensko, 2–4 tedne
Opekline (I–II stopnje)	630–660	50–100	3–5	Dnevno do zacelitve

**Mehanizem:** stimulacija fibroblastov, sinteza kolagena, izboljššan tonus kože, pospešeno celjenje, zmanjšanje vnetja in edemov.

### 5.2.1 Regeneracija kože ter sluznic in celjenje ran

FBM pospešuje **celjenje ran, razjed in opeklin** z izboljšanjem prekrvitve, povečano sintezo kolagena ter stimulacijo fibroblastov in keratinocitov. Uporablja se v dermatologiji, kirurgiji in diabetologiji. Posebej učinkovita je pri **kroničnih ranah** (diabetične, venske, pooperativne).

### 5.2.2 Zmanjšanje vnetja

Svetlobni impulzi v rdečem in bližnjem infrardečem spektru zmanjšujejo izražanje **pro-vnetnih citokinov (TNF- $\alpha$ , IL-1 $\beta$ )** ter povečujejo antioksidativno aktivnost (SOD, glutation). Zato PBM pomembno prispeva pri zdravljenju **tendinitisa, artritisa, miozitisa** in drugih vnetnih stanj.

### 5.2.3 Zmanjšanje bolečine

PBM modulira prevodnost živčnih vlaken, povečuje sproščanje **endorfina in serotonina**, hkrati pa zmanjšuje prevajanje bolečinskih signalov v perifernem in centralnem živčnem sistemu. Učinkovita je pri **akutni in kronični bolečini**, vključno z **nevralgijami, miofascialnimi sindromi in degenerativnimi obolenji sklepov**.

## 5.3 Nevrologija in psihiatrija

### 5.3.1 Nevroprotekcija in možganske funkcije

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Moč (mW/cm <sup>2</sup> )	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost/trajanje
Depresija anksioznost	810 / 660	25–75	4–6	3× tedensko, 6–8 tednov
Demenca, Alzheimerjeva, Parkinsonova	810–850	50–150	4–6	3× tedensko, 6 tednov
Po možganski kapi	810–850	50–150	4–6	3× tedensko, 6 tednov
Jetlag, nespečnost	850–940	50–100	2–6	20 min zvečer, po potrebi

**Mehanizem:** povečana sinteza ATP v možganskih celicah, zmanjšanje oksidativnega stresa, aktivacija nevrogeneze in cirkadiane regulacije.

**Opomba:** tPBM (transkraniialna PBM) deluje predvsem na prefrontalni skorji (Fp1, Fp2, BA9/10) in pinealni osi.

FBM ima močne **nevroprotektivne učinke**. Obsevanje glave z nizko energijo (t.i. transkraniialna PBM) spodbuja nevrogenezo, sinaptično plastičnost in izboljšano oksigenacijo. Uporablja se v raziskavah pri **depresiji, anksioznosti, Alzheimerjevi bolezni, postkonkuzijskem sindromu in kognitivni utrujenosti**.

### 5.3.2 Psihofizična regulacija in motnje spanja

Svetloba uravnava **cirkadiane ritme** in vpliva na izločanje melatonina. Fotobiomodulacija pomaga pri **jet lagu** (časovni zamik), sezonski razpoloženski motnji (**SAD**) ter **motnjah spanja in kronični utrujenosti**. Deluje blago antidepresivno in stabilizira hormonsko ravnovesje.

## 5.4 Podpora imunskemu sistemu in homeostazi

PBM posredno vpliva tudi na **imunski sistem**, saj stimulira mitohondrije v imunskih celicah (makrofagi, limfociti). Učinek je pogosto **normalizacijski** – ne spodbuja ali zavira, ampak uravnava odziv glede na potrebo telesa.

## 5.5 Alergije

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Moč (mW/cm <sup>2</sup> )	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost / trajanje
Alergijski rinitis	630–660	30–60	3–5	vsak ali vsak drugi dan, 2–3 tedne
PBM nosne sluznice (nosni aplikator)	633–650	5–25	1–3	15 min, 1–2×/dan
Imunska regulacija	660–850	30–80	4–8	3× tedensko

**Mehanizem:** zmanjšanje histamina, izboljššan pretok v nosni sluznici, povečanje IgA, stabilizacija vegetativnega živčevja.

## 5.6 Urologija in ginekologija

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Moč (mW/cm <sup>2</sup> )	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost/ trajanje
Inkontinenca (urinska ali fekalna)	808–850	100–300	6–12	2–3× tedensko, 4–6 tednov
Mišice medeničnega dna	808–850	100–250	4–10	5–10 min, 3× tedensko
Hormonsko neravnovesje/ menopavza	660 / 2336 Hz (modulirano)	25–75	3–6	2–3× tedensko
Disparevnija, vaginalna suhost	660–810	25–75	4–8	2–3× tedensko, 4 tedne

**Mehanizem:** stimulacija mikrocirkulacije, regeneracija epitela, zmanjšanje vnetja in aktivacija hormonske osi (NO-signalizacija, oksitocin).

## 5.7 Zobozdravstvo in ustna votlina

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost / trajanje
Po izdrtju zoba	660–830	2–8	1–2× dnevno prvih nekaj dni
Gingivitis, parodontitis	660–830	4–6	2–3× tedensko
Suhost (kserostomija) ust	660–830	2–5	3× tedensko

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Pogostost / trajanje
Ortodontija, protetika	630–660	—	1–3 min/točka
Pooperativni edem	810–830	6–10	vsak drugi dan prvi teden

**Mehanizem:** protivnetni učinek, stimulacija žlez slinavk, pospešeno celjenje, analgezija in zmanjšan edem.

## 5.8 Fotobiomodulacija v kozmetiki in regenerativni estetiki

Svetloba ne zdravi le telesa – prebuja spomin kože, da ponovno zasije. PBM v kozmetiki temelji na stimulaciji mitohondrijev v fibroblastih, kar spodbuja tvorbo kolagena, elastina in antioksidativnih encimov. Brez toplotne poškodbe in brez invazivnih postopkov svetloba nežno povrne koži ton, sijaj in vitalnost.

Indikacija	Valovna dolžina (nm)	Doza (J/cm <sup>2</sup> )	Moč (mW/cm <sup>2</sup> )	Pogostost / trajanje
Anti-age, kolagenska stimulacija (gube, tonus kože)	630–850	3–6	30–60	2–3× tedensko, 4–8 tednov
Regeneracija po posegih (laser, piling, injekcije)	630–660	4–8	25–100	3× tedensko, 2–4 tedne
Brazgotine, strije	630–850	4–10	50–150	3× tedensko, do 8 tednov
Celulit, limfna drenaža	850–940	6–10	80–200	2–3× tedensko, lokalno
Rdečica in občutljiva koža	590–630	3–5	25–50	2–3× tedensko
Lasje (alopecija, rast)	630–670	3–5	30–60	3× tedensko, 8–12 tednov

### Mehanizmi delovanja:

- povečanje ATP v dermalnih fibroblastih,
- stimulacija kolagena tipa I in III,
- znižanje izražanja MMP-1 (kolagenaza),
- povečana mikrocirkulacija in limfna drenaža,
- pomiritev vnetja in zmanjšanje eritema.

## Posebnosti:

- PBM se pogosto uporablja po **mikroiglični terapiji, radiofrekvenci in injekcijskih posegih**, saj zmanjšuje rdečino in pospeši obnovo.
- Pri **alopeciji** (androgeni ali difuzni) kombinacija 630–670 nm (rdeča) in 810–850 nm (NIR) dokazano spodbuja rast lasnih foliklov.
- Za **občutljivo in reaktivno kožo** je priporočena nizka moč (25–40 mW/cm<sup>2</sup>) in pulzno osvetljevanje.

V estetiki PBM ni orodje popravljanja, temveč spodbujanje celičnega spomina.

## 6 Fotobiomodulacija (PBM) in javno zdravje

PBM ima velik potencial tudi v okviru javnega zdravja, saj predstavlja varno, cenovno učinkovito in dostopno dopolnilno terapijo. Njena uporaba lahko zmanjša breme kroničnih bolezni, zmanjša potrebo po zdravljenih in izboljša kakovost življenja v skupnosti. Zaradi svoje preprostosti in ne invazivnosti se lahko vključi v klinične in preventivne programe.

### 6.1 Fotobiomodulacija kot javnozdravstveno orodje

Pozitivni vpliv PBM na javno zdravstvo in bolnika:

- Zmanjšanje bremena kroničnih bolezni (npr. mišično-skeletne motnje, kronična bolečina).
- Manjša potreba po zdravljenih in s tem manj stranskih učinkov
- Cenovna učinkovitost – dolgoročno zmanjšanje stroškov zdravstvene oskrbe.
- Možnost uporabe tudi v skupnostih z omejenimi finančnimi in kadrovskimi viri

### 6.2 Fotobiomodulacija v preventivi

Pozitivni vpliv PBM v preventivi:

- Krepitev regeneracije in dobrega počutja pri splošni populaciji.
- Podpora starejšim osebam pri ohranjanju mobilnosti in kakovosti življenja.
- PBM kot ne farmakološka rešitev za obvladovanje bolečine in kroničnih stanj.
- Možnost vključevanja v javne zdravstvene programe in rehabilitacijo.

### 6.3 Fotobiomodulacija in kognitivne funkcije

Poleg vpliva na telesno zdravje ima PBM pomembno vlogo tudi pri podpori kognitivnih funkcij. Raziskave so pokazale, da lahko stimulacija z rdečo in bližnjo infrardečo svetlobo izboljša spomin, pozornost, hitrost obdelave informacij in splošno nevroplastičnost možganov.

V javnozdravstvenem kontekstu je to pomembno, saj fotobiomodulacija lahko prispeva k:

- preprečevanju ali upočasnitvi kognitivnega upada pri starejših,
- podpori pri učnih težavah pri otrocih in mladostnikih,
- zmanjševanju bremena demence in drugih nevrodegenerativnih bolezni.

S tem fotobiomodulacija neposredno vpliva na zmanjšanje socialne in ekonomske obremenitve zdravstvenih sistemov ter prispeva k večji kakovosti življenja posameznikov in skupnosti.

### 6.4 Fotobiomodulacija in koncept One Health

Koncept **One Health** ali »**Eno zdravje za ljudi in planet**« temelji na spoznanju, da so zdravje ljudi, živali, rastlin, gliv, mikroorganizmov in okolja neločljivo prepleteni. Vse oblike življenja – od nevidnih mikrobov do človeka – so del enotnega sistema, ki ga imenujemo narava. Ko se ravnovesje v tem sistemu poruši, to vpliva na zdravje vseh njegovih delov.

PBM se v ta okvir vključuje na več načinov:

- Manjša uporaba zdravil (npr. antibiotikov, analgetikov), kar zmanjša tveganje za odpornost.
- Možnost enotnih protokolov za uporabo PBM v humani in veterinarski medicini.
- Krepitev trajnostnega pristopa k zdravju s poudarkom na preventivi

# PBM v javnem zdravju



Slika 3: Možnost uporabe fotobiomodulacije v javnem zdravstvu

## 7 Fotobiomodulacija v veterinarski medicini

PBM se je v zadnjem desetletju uveljavila kot pomembna dopolnilna terapija v veterinarski medicini. Njena uporaba je posebej pomembna na področju ortopedije, bolečinskega nadzora, dermatologije in stomatologije pri živalih. Zaradi ne invazivnosti, varnosti in učinkovitosti je PBM postala dostopen pristop tako v specializiranih veterinarskih klinikah kot tudi v domačem okolju.

### 7.1 Najpogostejše indikacije

Najpogostejše indikacije v veterinarski medicini so:

- Ortopedske poškodbe: rupture vezi, artritis, pooperativna rehabilitacija
- Bolečinski nadzor pri kroničnih stanjih
- Dermatološke težave: celjenje ran, kožne bolezni
- Stomatologija živali: parodontalna bolezen, stomatitis, oralne rane

### 7.2 Klinični učinki fotobiomodulacije

Študije potrjujejo, da PBM pri živalih pospeši celjenje tkiv, zmanjša vnetje in bolečino, ter izboljša kakovost življenja, predvsem pri starejših psih in mačkah z degenerativnimi boleznimi sklepov.

### 7.3 Etični vidiki uporabe fotobiomodulacije

- Dobrobit živali: zmanjšanje bolečine brez invazivnih postopkov in farmakoloških tveganj
- Zmanjšanje uporabe zdravil: manj stranskih učinkov in večja varnost
- Celostna oskrba: skladnost s konceptom One Health
- Dostopnost in udobje: varen, neboleč in dobro sprejet s strani živali

### 7.4 Priporočila za uporabo fotobiomodulacije v veterini

**Veterinarji:** vključitev PBM kot del celostne terapije, spremljanje rezultatov, kombinacija z rehabilitacijo.

**Lastniki hišnih ljubljencev:** uporaba LED naprav doma pod veterinarskim nadzorom, npr. artritis, kronične rane.

**Skrbniki tekmovalnih živali:** PBM kot preventiva pri športnih obremenitvah, uporaba pred in po tekmovanjih za zmanjšanje utrujenosti in pospešeno okrevanje.

## 7.5 Fotobiomodulacija v veterinarski stomatologiji

**Indikacije:** parodontalna bolezen, stomatitis pri mačkah, celjenje ran po ekstrakcijah, oralne razjede.

Klinični učinki: zmanjšanje bolečine, pospešeno celjenje, manjša potreba po analgetikih in antibiotikih.

**V veterini** se prepleteta znanost in empatija, saj gre tu za področje, kjer svetloba zdravi v najčistejši obliki — brez placebo učinka, le biološki odziv in zaupanje med človekom in živaljo.

PBM je v veterinarski medicini vse bolj prepoznana kot varna in učinkovita metoda podpore **celjenju, regeneraciji in lajšanju bolečin** pri živalih. Zaradi svoje neinvazivne narave in odsotnosti farmakoloških stranskih učinkov postaja PBM del sodobne integrativne veterine – v ambulantah, rehabilitacijskih centrih in na terenu.

Zaradi neinvazivnosti, varnosti in učinkovitosti je PBM postala dostopen pristop sodobne integrativne veterine – v ambulantah, rehabilitacijskih centrih in na terenu.

## 7.6 Mehanizmi delovanja pri živalih

Osnovni biološki procesi so podobni kot pri ljudeh – svetlobni fotoni prodirajo v tkiva, kjer jih absorbirajo mitohondrijski kromofori, kar poveča celično energijo (ATP), izboljša mikrocirkulacijo, zmanjša oksidativni stres in pospeši regeneracijo. Živalska tkiva pogosto reagirajo celo hitreje kot človeška, saj je njihov metabolizem intenzivnejši.

### 7.6.1 Psi

Pri psih se PBM najpogosteje uporablja pri **ortopedskih poškodbah, artritisu, displaziji kolkov, poškodbah vezi (ACL) in pooperativnem okrevanju**. Svetlobna terapija dokazano skrajša čas rehabilitacije in zmanjša potrebo po analgetikih. Uporablja se tudi pri **dermatoloških težavah, vnetjih ušes in ranah mehkih tkiv**.

## 7.6.2 Mačke

Pri mačkah je PBM dragocena zaradi njihove občutljivosti na številna zdravila. Uporablja se za **celjenje ran po sterilizacijah, zdravljenje abscesov, vnetij dlesni (gingivitis, stomatitis) in artritičnih težav starejših mačk**. Svetloba deluje pomirjujoče, kar je pri tej živalski vrsti dodatna terapevtska vrednost.

## 7.6.3 Konji

V veterinarski praksi za konje PBM deluje kot **regenerativna in preventivna terapija**, še posebej v športni medicini. Uporablja se pri **poškodbah tetiv, mišic in sklepov**, pa tudi za **zmanjšanje laktata po tekmah**, hitrejšo regeneracijo in **stabilizacijo mišičnega tonusa**. PBM zmanjšuje stresni odziv in izboljšuje splošno kondicijo ter psihofizično športno pripravljenost.

## 7.6.4 Druge živalske vrste

Uporaba PBM se širi tudi pri **glodavcih, kunčih, pticah in eksotičnih vrstah**. V raziskavah se kaže zmanjšanje vnetnih markerjev in hitrejšo celjenje ran. Pri rejnih živalih (npr. pri kravah in prašičih) se PBM že testira kot orodje za zmanjšanje okužb in izboljšanje imunske odpornosti, kar bi lahko prispevalo k zmanjšani uporabi antibiotikov.

## 7.7 Preventiva in dobrobit

PBM ni namenjena le zdravljenju, temveč tudi **preventivi**. Redna uporaba nizkoenergijske svetlobe lahko izboljša **regeneracijski potencial mišic, prepreči mikropoškodbe** ter pomaga živalim pri **obvladovanju stresa**. Pri starejših živalih spodbuja vitalnost, pri mladičih pa podpira zdrav razvoj tkiv.

PBM v veterini predstavlja **dialog med človekom in živaljo, posredovan skozi svetlobo**. Ni zgolj tehnologija, temveč izraz empatije – dotik brez dotika, ki povezuje dve živi bitji v skupni energiji okrevanja.

PBM je uporabna kot podporna rehabilitacija pri okrevanju po poškodbah in boleznih, pa tudi preventivno za zmanjšanje verjetnosti poškodb, regeneracijo mišic in zmanjšanje laktata pri športnih živalih.

## 8 Varnost in previdnost

PBM je ena najvarnejših znanih terapevtskih metod, če se uporablja **v okviru ustreznih parametrov in z razumevanjem bioloških meja**. Kljub širokemu varnostnemu profilu zahteva pozornost in spoštovanje fiziologije – svetloba ni agresivna, a tudi ne nevtralna; njena moč je v subtilnem vplivu na celične procese.

Uporaba fotobiomodulacije zahteva previdnost:

- V nosečnosti (obseg trebuha in genitalnega področja),
- Pri obsevanju možganskega debla,
- pri kaheksiji in pri sindromu kronične izgorelosti
- v primeru epilepsije
- pri malignih obolenjih
- pri uporabi fotosenzitivnih zdravil

### 8.1 Splošna varnost

V več kot petih desetletjih klinične uporabe PBM niso bile zabeležene resne neželene reakcije, če so bile upoštewane priporočene doze. Občasno lahko pride do **prehodnega povečanja občutka toplote, blagega zardevanja ali kratkotrajne utrujenosti**, kar velja za fiziološki odziv na aktivacijo mikrocirkulacije in presnovnih procesov.

### 8.2 Nosečnost

PBM ni kontraindicirana v nosečnosti, vendar se **izogibamo neposrednemu obsevanju trebušne votline** in medeničnega predela, saj vpliv na hormonsko in oksitocinsko regulacijo še ni povsem raziskan. Svetlobo lahko varno uporabljamo na okončinah, vratu, obrazu ali pri terapevtskih točkah, oddaljenih od maternice.

### 8.3 Obsevanje možganskega debla

Transkraniialna PBM ima potencialne koristi pri nevroprotekciji in kognitivnih funkcijah, vendar zahteva **posebno previdnost**. Območje možganskega debla je izjemno občutljivo na termične in nevrofiziološke spremembe.

Priporoča se uporaba **nižje energijske gostote** ( $\leq 10 \text{ mW/cm}^2$ ) ter **pulznega režima** z nizkimi frekvencami (1–10 Hz).

## 8.4 Kaheksija in sindrom kronične izgorelosti

Pri kaheksiji, izčrpanosti ali kroničnem stresu se PBM uporablja le **posredno** – kot podpora regeneraciji in presnovi, ne pa za močno stimulacijo. Svetloba lahko v teh stanjih prehitro sproži metabolične procese, kar povzroči občutek preobremenjenosti. Priporoča se **kratko trajanje, nizka moč in daljši intervali med terapijami**.

## 8.5 Maligne bolezni

PBM se pri malignih procesih uporablja **izključno v paliativnem okviru**, za **zmanjšanje bolečine, mukozitisa ali vnetij po radioterapiji**, nikoli pa neposredno na aktivno tumorsko tkivo. V teh primerih je potreben **medicinski nadzor** in jasno opredeljen terapevtski cilj.

## 8.6 Interakcije in občutljivost

Pri osebah z **fotosenzitivnimi zdravili** (npr. tetraciklini, retinoidi) je priporočljiva nižja doza in krajša izpostavljenost. Prav tako je potrebna previdnost pri ljudeh z **epileptično občutljivostjo** – v teh primerih je primerna **nepulzna ali nizkofrekvenčna svetloba**.

## 8.7 Etični okvir

Varnost PBM ni zgolj tehnična kategorija, temveč tudi **etika svetlobe**. Terapevt s svetlobo vstopa v energijski prostor drugega bitja – človeškega ali živalskega – in zato zahteva spoštljiv, zmeren in zavesten pristop. Namen svetlobne terapije ni premagati bolezni, temveč **povrniti ravnovesje in notranjo koherenco**.

## 9 Zaključek in filozofsko-poetični epilog

PBM ni zgolj tehnološka inovacija, temveč **spomin narave, ujet v foton**, kajti življenje je samo po sebi svetlobni proces.

Svetloba ne tekmuje s temo, temveč jo razume kot del celote. Tako tudi PBM ne napada bolezni, temveč v tkivu **prebuja inteligenco homeostaze**. V njej ni boja, ampak povabilo k ravnovesju. Je nežna sinergija med fiziko in biologijo, med svetlobo in celičnim spominom. Praznina atoma daje prostor kvantnemu dogajanju, kjer celice prebudijo svoj spomin na zdravje.

Ko foton sreča mitohondrij, se ne zgodi le kemijska reakcija – zgodi se **spominjanje življenja**, kot da bi telo za trenutek prepoznalo svoj izvor. V tem srečanju med svetlobo in snovjo se skriva najtišja oblika komunikacije, ki jo znanost šele začenja razumeti, umetnost pa že tisočletja čuti.

PBM nas uči poslušati telo kot orkester, v katerem vsaka celica igra svoj ton, svetloba pa je dirigentka, ki usklajuje ritem. Tam, kjer bolečina postane tišina, lahko znova zazvenijo toni zdravja in boljšega počutja.

V prihodnosti bo svetlobna medicina morda postala **osnova preventivne in regenerativne medicine**, most med klasično znanostjo in subtilno biofiziko. A še preden to postane, nas vabi k preprostemu razumevanju: da smo – v svojem bistvu – **bitja svetlobe**, in da zdravljenje ni vnos energije le od zunaj, temveč **obuditev notranje svetlobe**, ki nikoli zares ne ugasne.

Naj bo ta priročnik popotnica tistim, ki svetlobo uporabljajo z znanstveno natančnostjo in srčno prisotnostjo. Kajti svetloba, uporabljena z namero in spoštovanjem, ni le terapija – je **dejanje sočutja**.

## 10 Literatura

1. Hamblin MR. Mechanisms and applications of the anti-inflammatory effects of photobiomodulation. **AIMS Biophys.** 2017;4(3):337–361.
2. Chung H, Dai T, Sharma SK, et al. The nuts and bolts of low-level laser (light) therapy. **Ann Biomed Eng.** 2012;40(2):516–533.
3. Bjordal JM, Lopes-Martins RA, Iversen VV. A randomized, placebo-controlled trial of low-level laser therapy for activated Achilles tendinitis. **Photomed Laser Surg.** 2006;24(1):33–39.
4. Wong-Riley MT, Liang HL, Eells JT, et al. Photobiomodulation directly benefits primary neurons functionally inactivated by toxins: role of cytochrome c oxidase. **J Biol Chem.** 2005;280(6):4761–4771.
5. Hamblin MR. Photobiomodulation for the brain: low light therapy for neurodegenerative diseases. **BBA Clin.** 2016;6:113–124.
6. de Freitas LF, Hamblin MR. Proposed mechanisms of photobiomodulation or low-level light therapy. **IEEE J Sel Top Quantum Electron.** 2016;22(3):7000417.
7. Salehpour F, Cassano P, Hamblin MR. Near-infrared photobiomodulation in depression and anxiety: a systematic review and meta-analysis. **BMC Psychiatry.** 2022;22(1):182.
8. Hashmi JT, Huang YY, Sharma SK, et al. Role of low-level laser therapy in neurorehabilitation. **PM&R.** 2010;2(12):S292–S305.
9. Assis L, Milares LP, Almeida T, et al. Photobiomodulation therapy accelerates muscle recovery and reduces inflammation in mice subjected to endurance exercise. **Lasers Med Sci.** 2020;35(8):1771–1781.
10. Lapchak PA, et al. Transcranial near-infrared photobiomodulation improves motor function following embolic strokes in rabbits. **Brain Res.** 2021;1766:147492.
11. Pruitt T, et al. Photobiomodulation therapy for chronic pain management in small animals: a review of current veterinary applications. **Front Vet Sci.** 2023;10:1170542.
12. dos Santos F, et al. Frequencies in low-level laser therapy: exploring modulation effects on biological systems. **Photochem Photobiol Sci.** 2022;21(6):993–1008.
13. El Massri N, et al. Photobiomodulation therapy: shining light on mitochondrial function and neuroprotection. **Front Neurosci.** 2023;17:1123458.
14. Carroll JD, et al. Consensus guidelines for photobiomodulation therapy in dentistry and medicine. **Lasers Dent Sci.** 2022;6(1):15–32.
15. Hamblin MR. Photobiomodulation and the future of regenerative medicine. **Int J Mol Sci.** 2024;25(2):657–678.
16. Low-level laser (light) therapy (LLLT) for treatment of hair loss. *Lasers Surg Med.* 2014;46(2):144-151. (Za vrstico: **Lasje**)
17. **Barolet D.** Light-emitting diodes (LEDs) in dermatology. *Dermatol Clin.* 2014;32(3):373-381. (Za vrstici: **Anti-age in Rdečica**)
18. **Wunsch A, Matuschka K.** A controlled trial to determine the efficacy of red and near-infrared light treatment in patient satisfaction and collagen density. *Photomed Laser Surg.* 2014;32(2):93-100. (Za vrstico: **Regeneracija po posegih**)
19. **Savoia A, et al.** Low-level laser therapy and cellulite treatment: updated review. *J Cosmet Laser Ther.* 2013. (Za vrstico: **Celulit**)