

# Funkcionalna organizacija autonomnog živčanog sustava

Ana Hladnik<sup>1</sup>, Zdravko Petanjek<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Zavod za anatomiju "Drago Perović", Medicinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

<sup>2</sup>Hrvatski institut za istraživanje mozga, Medicinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## Sažetak:

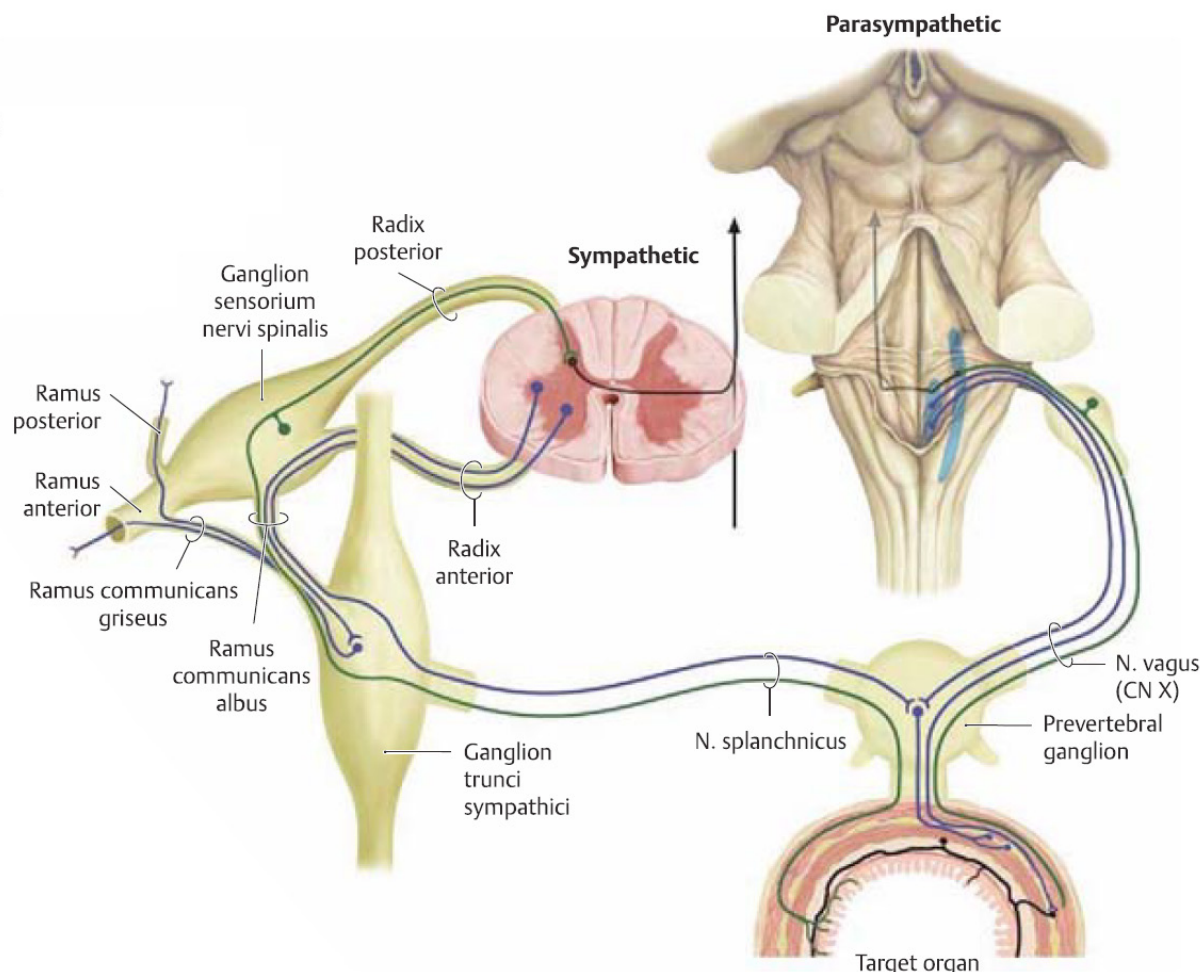
Autonomni živčani sustav uz endokrini sudjeluje u održavanju stabilnog unutarnjeg stanja organizma (homeostaze). To je omogućeno ravnotežom u djelovanju funkcionalno antagonističkih regulatornih komponenti autonomnog sustava, simpatikusa i parasimpatikusa. Visceromotorni neuroni iz kraniosakralnog parasimpatičkog i torakolumbalnog simpatičkog dijela središnjeg živčanog sustava tek nakon prekapčanja u odgovarajućim ganglijima parakrinim mehanizmima inerviraju glatko i srčano mišićje te žlijezde unutarnjih organa i kože. Regulaciju izlaznih neurona autonomnog živčanog sustava većinom provode viši integrativni autonomni centri smješteni u moždanom deblu, a integraciju i kontrolu svih struktura uključenih u održavanje homeostaze provodi hipotalamus.

## Pregled autonomnog živčanog sustava

Autonomni živčani sustav čine dijelovi središnjeg i perifernog živčanog sustava koji nadziru, prilagođavaju i upravljaju vitalnim aktivnostima unutrašnjih organa: probavom, tjelesnom temperaturom, vazomotorikom, metabolizmom, spolnim funkcijama, adaptacijom oka i uha, tonusom bronha, izlučivanjem. Spomenute se funkcije najvećim dijelom zbivaju bez utjecaja svijesti te su od temeljnog značenja za održavanje osnovne biološke ravnoteže tijela (homeostaze), koju uz autonomni regulira i endokrini sustav. U hijerarhijskom nizu najviše upravljачko središte održavanja homeostaze je hipotalamus koji preko veza s hipofizom regulira rad endokrinih žlijezda, a putem projekcija s moždanim deblom koordinira rad autonomnih struktura. Iako postoje i izravne projekcije iz hipotalamusa prema izlaznim autonomnim neuronima (npr. hipotalamo-sakralne projekcije na preganglijske neurone intermedijalnih jezgara u sakralnim segmentima kralježnične moždine), hipotalamus rad autonomnog sustava uglavnom regulira preko projekcija prema retikularnoj formaciji moždanog debla. Unutar retikularne formacije nalaze se centri koji koordiniraju rad izlaznih autonomnih i motoričkih neurona i reguliraju organske funkcije (naprimjer, unutar retikularne formacije identificiran je centar za rad srca, centar za regulaciju disanja, centar za regulaciju krvnog tlaka itd.).

Po prirodi svoje neuronske građe autonomni živčani sustav je eferentni živčani sustav. Autonom-

na vlakna mogu teći samostalno (rami viscerales), no pretežno se priključuju spinalnim živcima (rami spinales) ili teku zajedno sa žilama oko kojih stvaraju spletove (rami vasculares). Iz središnjeg dijela živčanog sustava opći visceromotorni neuroni pružaju vlakna koja potiču rad struktura koje se razvijaju iz endoderma i visceralnog dijela mezoderma te se stoga definiraju kao opća visceralna eferentna vlakna (specifična visceromotorna pristupaju na glatke mišićje u organima, vazomotorna u arterijama, pilomotorna oko korijena dlaka, a sekretomotorna pristupaju na žlijezdane stanice). Aksoni centralnih neurona ne završavaju izravno na efektornim organima (glatko i srčano mišićje, žlijezde), već se prekidaju i nastavljaju dalje tek nakon sinaptičkog prekapčanja na neuronima smještenim izvan središnjeg živčanog sustava. Nakupine tih neurona izvan središnjeg živčanog sustava oblikuju autonomne ganglije. Svi autonomni živci koji se pružaju od tijela centralnog neurona (od kojega i polaze) do neurona autonomnih ganglija nazivaju se preganglijskim, a živci koji potječu od neurona ganglija i pružaju se do ciljnog organa nazivaju se postganglijskim. Perikarioni (tijela i dendriti) preganglijskih živaca nalaze se unutar parasimpatičkih jezgara mozga (moždanog debla) i intermedijalne jezgre kralježnične moždine, te predstavljaju centralni (prvi) neuron, dok perikarioni postganglijskih živaca koji se nalaze u autonomnim ganglijima predstavljaju periferni (drugi) neuron. U ganglijima se ostvaruje sinaptička veza između završetka preganglijskog živca i perikariona postganglijskog neurona. S obzirom na njihov smještaj, razlikuju se



OPIS SLIKE 1: Djelovanje autonomnog živčanog sustava. AŽS inervira gletke mišiće, srčani mišić i žlijezde. Dijelimo ga na simpatički (crveno) i parasimpatički (plavo) živčani sustav koji često djeluju antagonistički u regulaciji protoka krvi, djelovanju organa i lučenju. Zeleno: aferentno. Ljubičato: eferentno. Ilustracija preuzeta iz: Gilroy A M et al; Anatomski atlas s latinskim nazivljem, Medicinska naklada 2011.g.

paravertebralni, prevertebralni i terminalni (ekstramuralni u vanjskim ovojnica, a intramuralni dublje unutar stijenke organa) gangliji. Paravertebralni gangliji isključivo pripadaju simpatičkom sustavu, dok su terminalni parasimpatički, iako vrlo mali dio pripada i simpatičkom sustavu.

Bitna karakteristika autonomnog sustava je parakrino djelovanje perifernog neurona prema ciljnoj strukturi. U odnosu na sinaptičku kontrolu poprečno-prugastih mišića preko neuromišićne ploče, volumna transmisija ne omogućava takvu finu vremensko-prostornu regulaciju aktivnosti ciljnog organa. No, u odnosu na endokrini sustav, ipak postoji regionalna distribucija koja omogućava koordiniranu grubu vremensku i pravilnu topografsku aktivaciju dijelova organa. Ovo je bitno za funkcije kao što su peristaltika crijeva i više karakterizira parasimpatički od simpatičkog dijela autonomnog živčanog sustava. Difuzniji učinak aktivacije simpatičkog sustava vezan je uz činjenicu da se adrenalin iz perifernih sinaptičkih neurona izlučuje i u centralnu cirkulaciju. Neuroni srži nadbubrežne žlijezde su zapravo periferni neuroni simpatičkog sustava te, po analogiji, srž nadbubrežne žlijezde predstavl-

ja simpatički ganglij. Za razliku od neurona ostalih simpatičkih ganglija, neuroni srži nadbubrežne žlijezde nemaju aksone i neurotransmiter izlučuju u centralnu cirkulaciju te po mehanizmu egzocitoze pripadaju endokrinom sustavu.

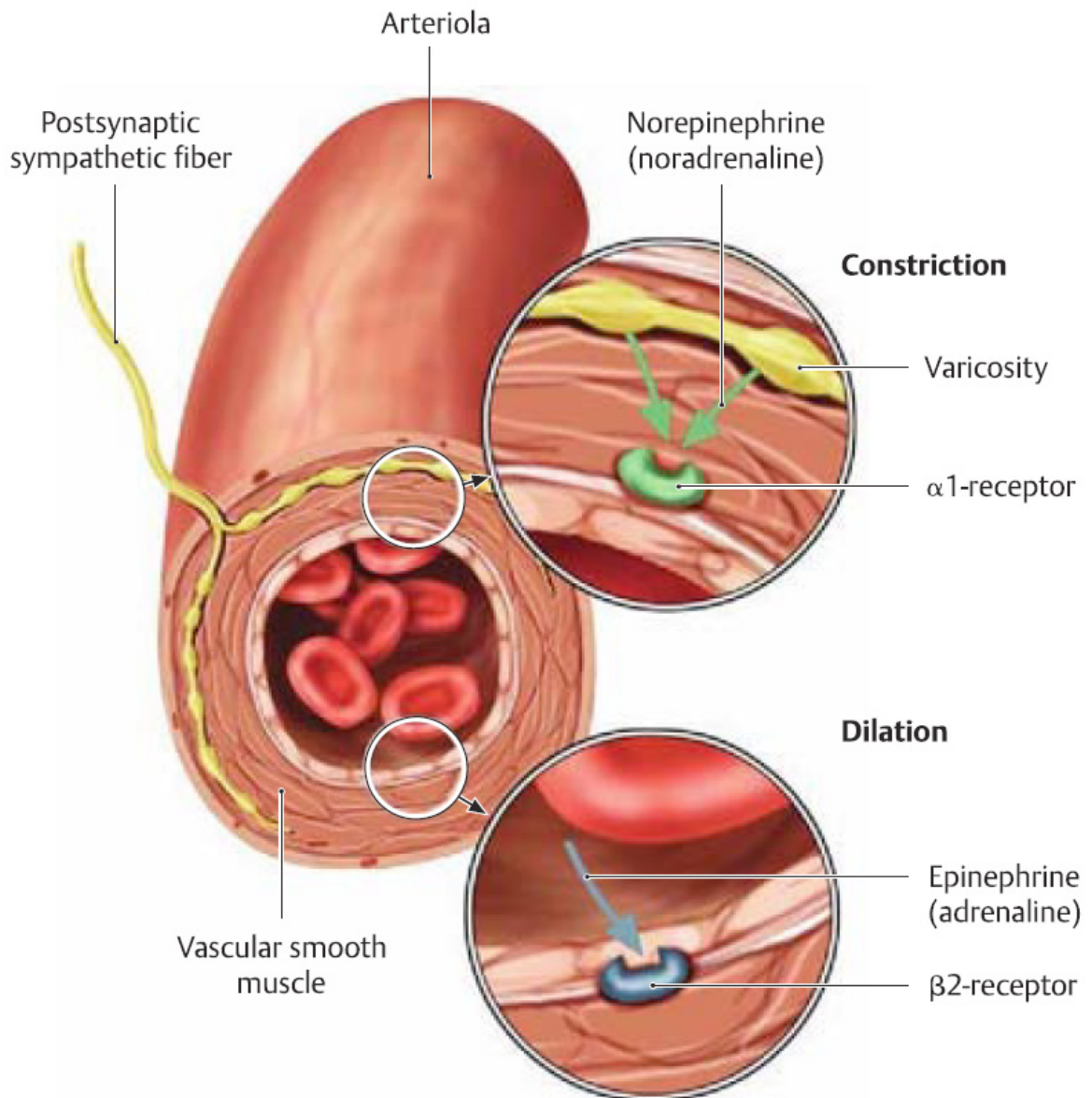
Iako su eferentni putovi dominantni u funkciji autonomnog živčanog sustava, viscerosenzibilna (aferentna) vlakna koja donose osjet koji se može svjesno percipirati čine dio autonomnog živčanog sustava kada sudjeluju u visceralnim refleksima. Stanična tijela aferentnih vlakana nalaze se u senzibilnim kranijalnim ili spinalnim ganglijima čiji neuroni pristupaju na strukture endoderma i visceralnog mezoderma. No, općenito su ta vlakna priključena simpatičkim živcima, nn. splanchnici thoracici, te kroz stražnje korjenove ulaze u grudni i gornji slabinski odsječak kralježnične moždine. Viscerosenzibilne informacije iz utrobnih organa služe u refleksima prema eferentnim neuronima. Gustoća osjetnih receptora u unutarnjim organima daleko je manja i vrstom daleko oskudnija nego u somatskom sustavu. Zbog toga se percepcija osjeta iz unutarnjih organa kvalitativno značajno razlikuje od one u somatskim strukturama, gdje posebno

treba istaknuti vrlo grubu lokalizaciju visceralnog osjeta. Komponenta svjesne percepcije osjeta iz unutarnjih organa velikim se dijelom temelji na preklapanju projekcija prema somatskom neuronu na razini osjetne jezgre pa se unutarnji podražaj često doživljava kao somatski osjet (primjer je prenesena bol).

### Funkcionalna podjela autonomnog živčanog sustava

Autonomni živčani sustav se u funkcionalnom smislu dijeli na simpatički i parasimpatički dio, pars sympathica et parasympathica. Ovdje treba naglasiti da zapravo autonomni živčani sustav samo u cjelini predstavlja funkcionalnu podjedinicu perifernog živčanog sustava, dok su simpatikus i para-

simpatikus antagonističke regulatorne komponente autonomnog živčanog sustava. Simpatički sustav pomaže u povećanju sposobnosti organizma u stanjima ugroženosti i napora, a parasimpatički pomaže izmjeni tvari, obnavljanju i stvaranju tjelesnih zaliha i energije. Podraživanje simpatikusa uzrokuje ubrzanje rada srca i disanja, proširenje zjenica, nakostriješenje dlaka i povećano znojenje, a istodobno smanjuje motilitet želuca i crijeva te izlučivanje žlijezda. Parasimpatikus povećava motilitet crijeva i sekreciju, sužava zjenice i usporava rad srca i disanja. Maternicu inerviraju samo simpatička vlakna, dok je djelovanje simpatičkih vlakana u inervaciji mokraćnog mjehura dvojbena. Iako se iz navedenih primjera vidi da simpatički i parasimpatički sustav često imaju suprotne učinke na ciljna tkiva, te je nekoliko visceralnih funkcija pod kontrolom pretežito jednog ili drugog sustava, ravnoteža u njihovom



Slika 2: Regulacija krvnog tlaka. Simpatika vlakna mogu otpuštati noradrenalin, potičući kontrakciju glatkih mišića krvnih žila. Cirkulirajući adrenalin djeluje tako što potiče vazodilataciju. Važno: parasimpatička vlakna ne završavaju na krvnim žilama. (Gilroy A M et al; Anatomski atlas s latinskim nazivljem, Medicinska naklada 2011.g.)

djelovanju pomaže u održavanju stabilnog unutarnjeg stanja organizma (homeostaze). Oba dijela sustava, i simpatički i parasimpatički, djeluju zajedno te u sprezi sa somatomotornim sustavom usklađuju rad organa s obzirom na promjene okoline (održavanje tjelesne temperature aktivacijom metabolizma, vazokonstrikcijom, piloerekcijom, drhtanjem, traženjem toplijeg okruženja).

Posebno se opisuje enterički živčani sustav kojeg čini fina mreža kolinergičkih ili noradrenergičkih vlakana koja uz krvne žile ulaze u stijenkku probavne cijevi. Snopovi živčanih vlakana različite debljine čine mreže, a na mjestima njihova ukriženja nalaze se nakupine živčanih stanica koje oblikuju male intramuralne ganglije. U submukozi je smješten plexus submucosus Meissneri, a između poprečnog i uzdužnog sloja mišićja probavne cijevi nalazi se plexus myentericus Auerbachii. Zbog velikog broja živčanih stanica te njihovog rasporeda, ovaj sustav ima veću autonomiju, pa je probavni sustav i nakon denervacije sposoban održati svoju funkciju. Ipak, treba naglasiti da postoji recipročna inervacija između autonomnih postganglijskih neurona smještenih u organima i neurona koji ne pripadaju simpatičkom ili parasimpatičkom sustavu.

### Pars parasymphathica. parasymphatikus

Izlazne jezgre parasymphatičkog dijela autonomnog živčanog sustava smještene su u moždanom deblu i manjim dijelom u sakralnim segmentima kralježnične moždine. Preganglijski parasymphatički živci imaju dugačke aksone koji se prekapčaju u ganglijima smještenima blizu ili u stijenci ciljnog organa. Stoga su postganglijska presinaptička vlakna u odnosu na postsinaptička puno kraća. Neurotransmiter koji omogućuje sinaptičku transmisiju između preganglijskih i postganglijskih parasymphatičkih živaca jest acetilkolin, kao i neurotransmiter koji omogućuje transmisiju između postganglijskih parasymphatičkih živaca i efektornih stanica. Zato se parasymphatički sustav naziva i kolinergičkim sustavom, a postganglijska vlakna kolinergičkim vlaknima.

Kranijalni dio parasymphatičkog sustava čine preganglijska vlakna čiji su perikarioni smješteni u moždanom deblu. Njihovi aksoni (preganglijska parasymphatička vlakna) pridružuju se kranijalnim živcima (III., VII., IX., X.) i nakon prekapčanja u parasymphatičkim ganglijima inerviraju strukture glave, vrata, prsne šupljine i abdomena sve do Cannon-Böhmmove točke koja se nalazi u blizini zavoja, flexura colli sinistra.

- Iz jezgre nucleus oculomotorius accessorius (Edinger- Westphal) preganglijska vlakna odlaze III. mozgovnim živcem (n. oculomotorius) u ganglion ciliare.
- Intermedijsni dio VII. mozgovnog živca, n. fa-

cialis, sadržava preganglijska vlakna iz jezgre, nucleus salivatorius superior, koja se funkcionalno dijeli u salivatorni središnji dio s gusto zbijenim neuronima i periferni lakrimomukonazalni dio koji čine difuznije i u manjoj gustoći distribuirani neuroni oko središnjeg dijela. Stoga se to područje može izdvojeno definirati kao nucleus lacrimomukonasalis. Neuroni središnjeg salivatornog dijela čine parasymphatičku komponentu živca chorda tympani i odlaze u ganglion submandibulare (et ganglion sublinguale), a lakrimomukonazalni neuroni oblikuju n. petrosus major i pristupaju na ganglion pterygopalatinum.

- N. glossopharyngeus vodi vlakna iz jezgre nucleus salivatorius inferior koja putem živca n. petrosus minor dolaze u ganglion oticum.
- N. vagus nosi parasymphatička vlakna koja izlaze iz jezgre nucleus dorsalis nervi vagi, a prekapčaju se u neposrednoj blizini ili stijenci ciljnih organa (vratnih, prsnih i trbušnih organa).
- Sakralni dio parasymphatikusa čine perikarioni u postraničnim rogovima sakralnog dijela kralježnične moždine (S2-S4) čiji aksoni (preganglijska parasymphatička vlakna) putuju sakralnim živcima (najvećim dijelom trećim i četvrtim sakralnim živcem).
- Preganglijska vlakna čine nn. splanchnici pelvini koji preko plexus hypogastricus inferior sudjeluju u inervaciji crijeva distalno od Cannon-Böhmmove točke, te inerviraju urogenitalne organe u području male zdjelice.

Dio poprečnog i silaznog dijela debelog crijeva oko lijeve fleksure (Cannon-Böhmmove točka) je područje preklapanja vagalne i sakralne inervacije, a područje preklapanja je također i središnji dio mokraćovoda. Od funkcionalnih sustava jedino su spolni organi isključivo inervirani od strane sakralnog parasymphatikusa.

### Pars symphathica, sympatikus

Simpatički dio autonomnog živčanog sustava čine središnji neuroni smješteni u intermedijalnoj jezgri grudnog i gornjeg slabinskog odsječka kralježnične moždine i periferni neuroni koji oblikuju dva lanca ganglija uz kralješnicu, truncus symphathicus, te izolirane ganglije oko abdominalne aorte i njezinih glavnih grana. Neurotransmiter koji omogućuje sinaptičku transmisiju između preganglijskih i postganglijskih simpatičkih živaca jest acetilkolin, ali neurotransmiter koji omogućuje transmisiju između postganglijskih simpatičkih živaca i efektornih stanica je noradrenalin. Stoga se simpatički sustav naziva i adrenergičkim sustavom. No, nisu sva postganglijska simpatička vlakna adrenergička - postganglijska simpatička vlakna za inervaciju žli-

jezda znojnica su kolinergička.

S obje strane kralježnice (paravertebralno) u ravnini poprečnih nastavaka kralježaka nalaze se najčešće 22 veća, jasno prepoznatljiva i definirana paravertebralna simpatička ganglija. No, postoji i varijabilan broj manjih nakupina simpatičkih neurona oko većih ganglija. Neurone ganglija međusobno povezuju rr. interganglionares u lanac, truncus sympathicus. Izravne veze lijevoga i desnoga simpatičkoga lanca, rami transversi, su nepravilne: u prsnom su i trbušnom području rjeđe, a u zdjelničnom području češće. U području vrata nalaze se 3 simpatička ganglija: ganglion cervicale superius, ganglion cervicale medium et ganglion inferius (prvi torakalni i donji cervikalni ganglij najčešće su spojeni i tvore ganglion stellatum). Grudni dio simpatičkog lanca stoga sadrži 10 ili 11 torakalnih simpatičkih ganglija, slabinski dio 3 ili 4, a križni dio 4 ganglija. Simpatički lanac završava malim neparnim ganglijem u središnjoj ravnini ispred trtične kosti, ganglion impar.

Na mjestima odvajanja 3 neparne visceralne grane aorte (truncus coeliacus, a. mesenterica superior i inferior) nalaze se 3 veća prevertebralna ganglija, parni ganglia coeliaca, te neparni ganglion mesentericum superius et ganglion mesentericum inferius, koji su opsežno međusobno spojeni te su okruženi mnogobrojnim manjim ganglijima. Često ne nalazimo niti jasni veći individualni ganglij, već se radi o topografski grupiranim nakupinama manjih ganglija.

Perikarioni simpatičkih preganglijskih neurona nalaze se u postraničnim rogovima grudnog i slabinskog odsječka kralježnične moždine (Th1-L2/C8-L3) i oblikuju jezgru nucleus intermedius (nu. intermediolateralis et intermediomedialis). Njihovi aksoni čine preganglijska vlakna koja izlaze kroz prednji rog kralježnične moždine prednjim korjenovima spinalnih živaca. Od spinalnih živaca se zatim odvajaju kao mijelinizirana vlakna, rami communicantes albi, koja povezuju spinalni živac s paravertebralnim ganglijem. Preganglijska vlakna se u paravertebralnom gangliju mogu:

- prekopčati u gangliju pridruženom uz isti segment kralježnične moždine,
- kao rami interganglionares simpatičkim lancem ići do rostralnije ili kaudalnije smještenih ganglija i tamo se prekopčati,
- samo proći kroz ganglij, bez prekapčanja, tvoreći splanhničke živce.
- Nakon prekapčanja u paravertebralnom gangliju postganglijska vlakna mogu:
- kao nemijelinizirana vlakna, rr. communicantes grisei, ponovno se pridružiti spinalnom živcu i njime doći do kože gdje u pripadajućim dermatomima inerviraju krvne žile, žlijezde znojnice i glatko mišićje dlaka,

- kao rami vasculares tvoreći spletove oko žila (perivaskularne spletove) doći do ciljnih organa,
- samostalno kao rami viscerales doći do ciljnih organa.

Dio preganglijskih vlakana može samo proći kroz paravertebralni ganglij ne tvoreći sinapsu te se kao splanhnički živci, nn. splanchnici, prekopčati u prevertebralnim ganglijima. U ganglia coeliaca završavaju n. splanchnicus major (Th5-Th9) i n. splanchnicus minor (Th9-Th11), a nn. splanchnici lumbales iz Th11-L2 u ganglion mesentericum superior i ganglion mesentericum inferior. Postganglijska vlakna koja izlaze iz prevertebralnih ganglija tvore spletove oko žila i s njima odlaze prema utrobnim organima. Za razliku od parasimpatičkog sustava, prosječna dužina preganglijskih simpatičkih vlakana kraća je od postganglijskih vlakana.

Uspoređujući simpatički i parasimpatički neurotransmiterski sustav, treba istaknuti da stimuliranje simpatičkog sustava uzrokuje mnogo difuzniji učinak. Razlog je tome jedinstveno (centralizirano) ishodište simpatičkog sustava pa se u slučaju stimulacije aktivira kao cjelina, te ekstenzivno grananje adrenergičnih živaca, kao i izlučivanje adrenalina iz srži nadbubrežne žlijezde u centralnu cirkulaciju čime simpatički sustav uz parakrine mehanizme ciljni učinak postiže i endokrinim djelovanjem. Nasuprot tome, nadražaj kranijalnog ili sakralnog dijela parasimpatičkog sustava uzrokuje mnogo lokaliziraniji učinak. Iz toga proistječu razlike u širini rasprostranjenosti učinka između simpatikusa i parasimpatikusa. Naime, povećanje simpatičkog tonusa nužno za reagiranje u stresnim situacijama mora aktivirati cijeli organizam pa je povećan sistemni krvni tlak, srce kuca ubrzano i snažnije, perfuzija skeletnog mišića krvlju je povećana, razina šećera u krvi je povišena, bronhi i zjenice su prošireni. Budući da nadražaj parasimpatikusa usporava srčanu akciju, ruši krvni tlak, potiče peristaltiku u probavnom sustavu, sužava bronhe, uzrokuje mikciju i defekaciju te suženje i slinjenje, očito da difuzna aktivacija svekolikog parasimpatikusa nije poželjna.

#### Literatura:

1. Jalšovec D. Sustavna i topografska anatomija čovjeka. Zagreb: Školska knjiga, 2005.
2. Kahle W, Leonhard H, Platzer W. Priručni anatomske atlas 3.dio, Živčani sustav i osjetila. Zagreb: Medicinska naklada, 2011.
3. Krmpotić - Nemanić J. Anatomija čovjeka. Zagreb: Medicinska naklada; 1993.
4. Fanghänel J, Pera F, Anderhuber F, Nitsch R, editors. Waldeyerova anatomija čovjeka. Zagreb: Golden marketing – Tehnička knjiga, 2009.