

Rīgas Stradiņa universitāte
Medicīnas fakultāte
otrā līmeņa profesionālās augstākās izglītības
studiju programma „Medicīna”

Karpālā kanāla sindroma un pirkstu savstarpējās atkarības raksturojums un potenciālā saistība

PĒTNIECISKAIS DARBS - LITERATŪRAS APSKATS

Darba autore:
Nikola Katrīna Vasule
Studenta apliecības Nr. 18-036381

/paraksts/

20__ . gada _____

Darba vadītājs:
Vadošais pētnieks
Ph.D.
Valters Āboliņš
RSU Aroda un vides medicīnas katedra
RSU Darba drošības un vides veselības institūts

/paraksts/

20__ . gada _____

Rīga, 2026

SATURA RĀDĪTĀJS

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI	3
IEVADS	4
1. KARPĀLĀ KANĀLA SINDROMS.....	6
1.1. Definīcija un patofizioloģija	6
1.2. Epidemioloģija un riska faktori	7
1.3. Klīniskā aina	8
1.4. Diagnostika	9
1.5. Ārstēšana.....	9
2. PIRKSTU SAVSTARPĒJĀ ATKARĪBA	12
2.1. Pirkstu savstarpējās atkarības jēdziens	12
2.2. Pirkstu kustību mehāniskā pārnese un neirālā līdzaktivācija.....	13
2.3. Pirkstu kontroles kvantitatīvie rādītāji un sinerģiskā regulācija.....	14
2.4. Faktori, kas ietekmē pirkstu savstarpējo atkarību.....	15
2.4.1. Vecums.....	15
2.4.2. Prakse un meistarība	18
2.4.3. Neiroloģiskas un muskuloskeletālas slimības.....	19
3. PIRKSTU SAVSTARPĒJĀ ATKARĪBA KARPĀLĀ KANĀLA SINDROMA GADĪJUMĀ	22
SECINĀJUMI	26
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	27

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

BD – bilaterālais deficīts

CNS – centrālā nervu sistēma

EEG – elektroencefalogrāfija

EMG – elektromiogrāfija

FDP – *flexor digitorum profundus* cīpslas

FD – spēka deficīts

FE – *finger enslaving effect*, pirkstu pakļaušanas efekts

FS – *force sharing*, spēka sadale

KKS – Karpālā kanāla sindroms

MRI – Magnētiskās rezonanses izmeklējums

MVF – *maximum voluntary finger force*, maksimālais brīvprātīgais pirkstu spēks

NCS – *nerve conduction studies*, nervu vadīšanas izmeklējumi

IEVADS

Karpālā kanāla sindroms (KKS; angļu val. *Carpal Tunnel Syndrome, CTS*) ir bieži sastopama perifēra neiropātija, ko izraisa *nervus medianus* kompresija plaukstas locītavas apvidū (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012).

Tas ir viens no biežākajiem roku sāpju un rokas funkcijas traucējumu iemesliem, bieži saistīts ar darbnespēju, prombūtni darbā un būtiskām veselības aprūpes izmaksām (Ibrahim et al., 2012).

KKS simptomi pasliktinās naktī, nereti sensoriskie simptomi izstaro proksimāli pa apakšdelmu un izņēmuma gadījumos var sasniegt arī elkoni un pat plecu; kad simptomi ir noturīgi, tad virspusējās jušanas traucējumi ir jau vēlīnās stadijās, un simptomus var palielināt transportlīdzekļa vadīšana un rakstīšana ar datora klaviatūru (Liuke & Daneviča, 2020). Slimībai progresējot, parādās motoriski traucējumi: neizdodas noturēt vai atvērt kaut ko, kas neiroloģiski ir īkšķa abdukcijas un opozīcijas vājums, kā arī tenāro muskuļu hipotrofija vai atrofija (Liuke & Daneviča, 2020). Tas ir redzams 1. attēlā.

Karpālā kanāla simptomi atbilstīgi smaguma pakāpei	
Karpālā kanāla sindroma smaguma pakāpe	Simptomi
Viegla	■ notirpums, "skudriņu sajūta", diskomforts ■ nav hipestēzijas jeb virspusējā jušanas zuduma ■ nav motoriska deficīta ■ nav pamošanās naktī simptomu dēļ ■ nav traucēta plaukstas motoriskā aktivitāte ■ NG/EMG — pagarinātas sensorisko šķiedru latences. Motoriskās šķiedras intaktas. Nav aksonāla bojājuma
Vidēja	■ pievienojas hipestēzija ■ epizodiska mošanās naktīs simptomu dēļ ■ sāpes un jušanas traucējumi var nedaudz ietekmēt rokas funkciju, bet pacients tik un tā spēj veikt visas ikdienas aktivitātes ■ NG/EMG — pagarinātas sensorisko šķiedru latences + pagarināta motoriskā distālā latence. Nav aksonāla bojājuma
Smaga	■ muskuļu vājums. Nespēj veikt vienu vai vairākas ikdienas aktivitātes ■ regulāri mostas naktī nepatīkamo sajūtu dēļ ■ NG/EMG — aksonāls bojājums

1. att. Karpālā kanāla simptomi atbilstoši smaguma pakāpei (Liuke & Daneviča, 2020)

Hroniska KKS gadījumā var veidoties ilgstošas pārmaiņas vai adaptīvas izmaiņas rokas motorajā kontrolē. CNS, iespējams, var pārkārtot un optimizēt motorās komandas, ņemot vērā *nervus medianus* funkcijas ierobežojumus un šīs adaptīvās izmaiņas var saglabāties arī pēc nerva kompresijas novēršanas (Jacob et al., 2025).

KKS ir saistīts ne tikai ar jušanas un spēka traucējumiem, bet arī ar izmaiņām pirkstu savstarpējā koordinācijā un sensori motorajā kontrolē, kas var atspoguļot pārmaiņas pirkstu savstarpējā atkarībā (Abolins et al., 2026; Grandy et al., 2018; Jacob et al., 2025). KKS

pacientiem konstatētas saglabātas, taču vājākas vairāku pirkstu spēku stabilizējošas sinerģijas un ātras darbības uzsākšanas brīdī šī stabilitāte kļūst vēl trauslāka (Abolins et al., 2026). Turklāt KKS gadījumā rādītājpirksta muskuļu un spēka reakcijas uz neparedzamu ārēju slodzi (perturbācijām) ir palēninātas, kas liecina par traucētu sensorās informācijas un motorās atbildes integrāciju (Grandy et al., 2018). Pēc karpālā kanāla atbrīvošanas spēka kontrole var uzlaboties, bet pirkstu spēku koordinācijas rādītāji īstermiņā var saglabāties nemainīgi (Jacob et al., 2025). Šīs izmaiņas ir nozīmīgas, jo arī normālos apstākļos pirkstu kustības nav pilnībā neatkarīgas - apzināta viena pirksta kustība parasti izraisa netīšas kustības arī citos pirkstos biomehānisku un neirālu ierobežojumu dēļ (Schieber & Santello, 2004; Häger-Ross & Schieber, 2000). Tādēļ pirkstu savstarpējās atkarības izpratne ir būtiska, lai precīzāk raksturotu KKS ietekmi uz rokas funkciju un tās atjaunošanos pēc ārstēšanas (Abolins et al., 2026; Jacob et al., 2025).

Šajā pārskatā integrētas divas galvenās tēmas: KKS raksturojums un pirkstu savstarpējās atkarības raksturojums, lai veidotu pamatu izpratnei par to, kā KKS varētu ietekmēt pirkstu kustību koordināciju un neatkarību. Padziļināta izpratne par šo saistību varētu palīdzēt pilnveidot rehabilitācijas stratēģijas pacientiem ar KKS.

Darba mērķis – izpētīt un aprakstīt zinātniskajā literatūrā pieejamos datus par karpālā kanāla sindromu un pirkstu savstarpējo atkarību un to iespējamo saistību un savstarpējo ietekmi.

Darba uzdevumi: (1) definēt karpālā kanāla sindromu un tā patofizioloģiju, (2) raksturot karpālā kanāla sindroma epidemioloģiju, riska faktorus, klīnisko ainu, diagnostiku un ārstēšanu, (3) definēt pirkstu savstarpējo atkarību, (4) raksturot pirkstu kustību mehānisko pārnesei, neirālo līdzaktivāciju, pirkstu kontroles kvantitatīvos rādītājus un sinerģisko regulāciju, (5) noteikt faktorus, kas ietekmē pirkstu savstarpējo atkarību, (6) raksturot iespējamās pirkstu savstarpējās atkarības izmaiņas karpālā kanāla sindroma gadījumā.

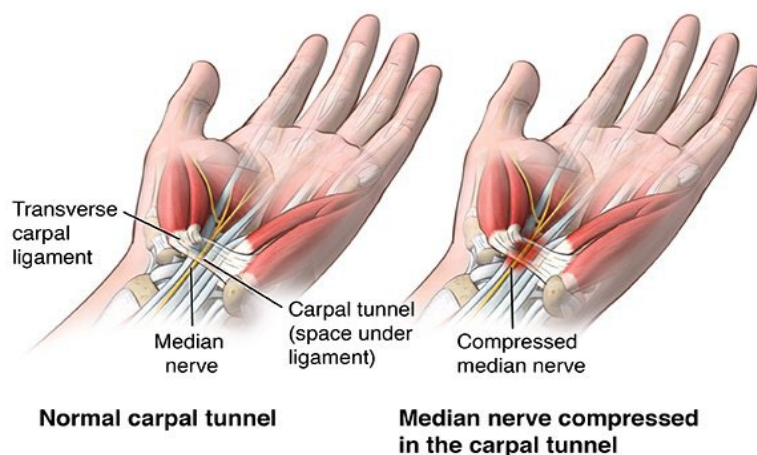
Šī tēma nav plaši pētīta, un literatūras pārskats veido kopsavilkumu tajā veiktiem pētījumiem.

1. KARPĀLĀ KANĀLA SINDROMS

1.1. Definīcija un patofizioloģija

Karpālā kanāla sindroms (KKS; angļu val. *Carpal Tunnel Syndrome, CTS*) ir nosaukts pēc ejas, caur kuru iet vidējais nervs (*nervus medianus*), proti, karpālā kanāla; tā ir bieži sastopama perifēra neiropātija, ko izraisa *nervus medianus* kompresija plaukostas locītavas apvidū karpālajā kanālā (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012).

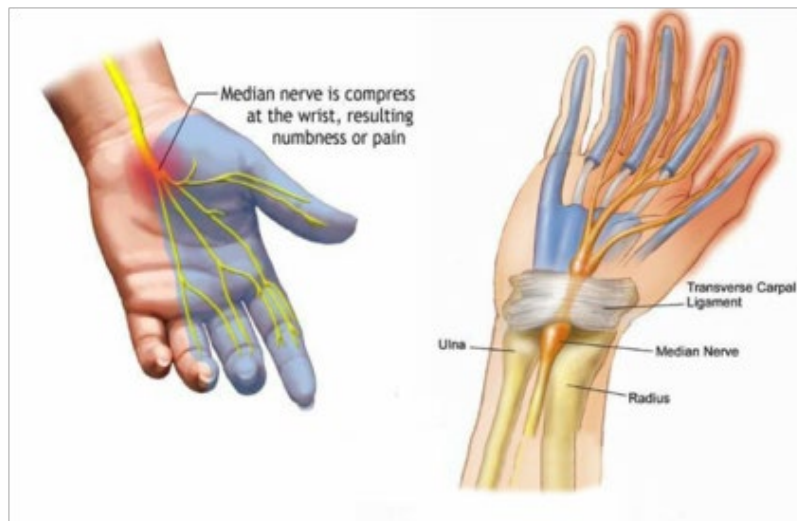
Karpālā kanāla sindroms (KKS) ir visbiežāk sastopamā augšējās ekstremitātes kompresijas (iesprostojuma) neiropātija, kas veido aptuveni 90% no visiem nervu kompresijas sindromiem (Ibrahim et al., 2012). Tas attīstās, kad *nervus medianus* tiek saspiests, tam virzoties cauri karpālajam kanālam plaukostas locītavas apvidū, kas ir šaura fibroosāla eja, kuru norobežo karpālie kauli un *ligamentum carpi transversum* (Dahlin et al., 2024; Presazzi et al., 2011). Paaugstināts spiediens šajā kanālā (piemēram, saliecējcīpslu apvalku iekaisuma, šķidruma aiztures, atkārtotas pārslodzes u. c. iemeslu dēļ) var mehāniski bojāt *nervus medianus* un mazināt tā asinsapgādi, izraisot nervu šķiedru išēmisku demielinizāciju (Dahlin et al., 2024). Laika gaitā hroniska kompresija var radīt segmentāru demielinizāciju un smagos gadījumos arī *nervus medianus* aksonu zudumu (Dahlin et al., 2024). Histopatoloģiski novēro nervu šķiedru tūsku, mielīna deģenerāciju un subsinoviālo saistaudu fibrozi (Ibrahim et al., 2012). Rezultātā tiek traucēta sensoro un motoro signālu vadīšana uz plaukstu un pirkstiem (Dahlin et al., 2024). Normāla karpālā kanāla un karpālā kanāla sindroma attēlojums ir redzams 2. attēlā.



2. att. Normāls karpālais kanāls, karpālā kanāla sindroms (CapralTunnel.com, 2026)

Karpālā kanāla sindroms neskar visus pirkstus; tas galvenokārt skar rādītājpirkstu, vidējo pirkstu, zeltnesi un īkšķi, bet nekad neskar mazo pirkstu, jo *nervus medianus* to neinervē (American Academy of Orthopedic Surgeons, 2016).

Karpālā kanāla sindroma izplatība ir redzama 3. attēlā.



3. att. KKS izplatība (American Academy of Orthopedic Surgeons, 2016).

1.2. Epidemioloģija un riska faktori

KKS ir ļoti izplatīts, skarot aptuveni 3-5% pieaugušo vispārējā populācijā (Ibrahim et al., 2012; Dahlin et al., 2024). Sievietēm KKS sastopams biežāk nekā vīriešiem un lielākā daļa gadījumu tiek diagnosticēti pusmūžā (Ibrahim et al., 2012; Dahlin et al., 2024). Zināmie riska faktori ir multifaktoriāli (Dahlin et al., 2024).

Sievietēm KKS attīstās biežāk multifaktoriālu iemeslu dēļ, nevis viena izolēta mehānisma rezultātā (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Anatomiski sievietēm karpālais kanāls un karpālā arka ir salīdzinoši mazāki, tādēļ *nervus medianus* un fleksoru cīpslām pieejamā telpa ir mazāka un kompresijai rasties ir vieglāk (Lakshminarayanan et al., 2019). Endokrīnie faktori var palielināt KKS risku, veicinot šķidruma aizturi un tūsku un, iespējams, ietekmējot arī lokālos saistaudus karpālajā kanālā (Cîmpeanu et al., 2024; Toesca et al., 2008; Kim et al., 2010). Īpaši nozīmīgi tas ir grūtniecības laikā, kad hormonālās un hemodinamiskās izmaiņas, svara pieaugums un venozās atteces samazināšanās var palielināt spiedienu karpālajā kanālā; ar grūtniecību saistīts KKS biežāk tiek aprakstīts trešajā trimestrī un bieži mazinās pēc dzemdībām (Cîmpeanu et al., 2024).

Profesionālās aktivitātes, kas ietver atkārtotas roku kustības, spēcīgu satvērienu vai ilgstošu plaukstas locītavas fleksiju/ekstensiju var veicināt KKS attīstību (Ibrahim et al., 2012; Dahlin et al., 2024). Savukārt noteikti sistēmiski un anatomiski faktori nepārprotami palielina risku: aptaukošanās, cukura diabēts un hipotireoze ir saistīti ar augstāku KKS sastopamību, tāpat kā iekaisīgas slimības, piemēram, reimatoīdais artrīts (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al.,

2012). KKS biežāk sastopams arī indivīdiem ar ģimenes predispozīciju vai iedzimti mazāku karpālā kanāla izmēru (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Dažkārt netiek identificēts viens konkrēts iemesls (“idiopātisks” KKS); biežāk tieši vairāku faktoru kombinācija rada predispozīciju *nervus medianus* kompresijai (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012).

KKS nav tikai medicīniska, bet arī sociālekonomiska problēma, jo var izraisīt būtisku darbaspēju zudumu: pacienti bieži ziņo par zaudētu darba laiku un samazinātu rokas funkcionalitāti ikdienas aktivitātēs (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). KKS var izraisīt daudzas dažādas slimības, stāvokļi un notikumi; pacientiem to raksturo nejutīgums, tirpšana, roku sāpes, kā arī muskuļu disfunkcija, kas nav saistīti ar vecumu, dzimumu, etnisko piederību vai nodarbošanos, un tos saista vai izraisa sistēmiska slimība un lokāli mehāniski un slimības faktori (American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024).

1.3. Klīniskā aina

KKS pacientu tipiskās sūdzības ir sāpes, jušanas traucējumi (nejutīgums) un tirpšana plaukstā (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Šie sensorie simptomi parasti lokalizējas *nervus medianus* inervācijas zonā, aptverot īkšķi, rādītājpirkstu, vidējo pirkstu un zeltneša radiālo pusi, īpaši plaukstas pusē (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Papildus šiem simptomiem KKS pacientiem var novērot arī samazinātu satvēriena spēku, pasliktinātu pirkstu veiklību un neveiklību smalku manipulāciju laikā, īpaši darbībās, kas saistītas ar plaukstas fleksiju vai atkārtotu rokas izmantošanu (Ibrahim et al., 2012; Zhang et al., 2013).

Pacienti bieži apraksta nakts laikā vai agri no rīta sastopamas izteiktas rokas parestēzijas, kas var pamodināt no miega; rokas sakratīšana (“*flick*” pazīme) nereti sniedz īslaicīgu atvieglojumu (Hansen et al., 2004; Dahlin et al., 2024). KKS progresējot, jušanas zudums KKS skartajos pirkstos (kuros radās un progresē KSS) var kļūt pastāvīgs, un pacienti var sūdzēties par vājumu vai neveiklību, satverot priekšmetus (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Daļai pacientu sāpes var izplatīties arī proksimāli virs plaukstas locītavas (Zanette et al., 2007;).

Objektīvā izmeklēšanā klasiskie provokācijas testi ir Tinela pazīme un Falena manevrs (Ibrahim et al., 2012; Dahlin et al., 2024). Tinela pazīmes gadījumā perkusija virs karpālā kanāla izraisa tirpšanas sajūtu *nervus medianus* inervētajos pirkstos, savukārt Falena manevrā piespiedu plaukstas locītavas turēšana fleksijā aptuveni 60 sekundes provocē nejutīgumu un sāpes plaukstā. Abi testi, lai arī ne pilnībā specifiski, pozitīva rezultāta gadījumā norāda uz KKS diagnozi (Wiesman et al., 2003; Ibrahim et al., 2012).

Ilgstoša vai smaga KKS gadījumā *nervus medianus* motorā zara iesaistes dēļ parādās kustību traucējumi; tie visizteiktāk izpaužas kā īkšķa abdukcijas/opozīcijas vājums un redzama tenārā paugura muskulatūras atrofija. Tenāro muskuļu atrofija ir vēlīna pazīme, kas liecina par nozīmīgu un ilgstošu nerva kompresiju (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Smaga KKS gadījumā pacienti var atzīmēt mazāk izteiktus sensoros simptomus, lai gan rokas funkcionālie ierobežojumi bieži kļūst izteiktāki; tas var būt saistīts ar to, ka pieaug jušanas zudums un parādās izteiktāki kustību traucējumi (Ibrahim et al., 2012).

1.4. Diagnostika

Karpālā kanāla sindroma diagnoze balstās raksturīgajā klīniskajā anamnēzē un fizikālās izmeklēšanas atradnē, ko nereti apstiprina ar nervu vadīšanas izmeklējumiem (*nerve conduction studies, NCS*) un elektromiogrāfiju (EMG): NCS un EMG tiek uzskatīti par “zelta standartu” KKS diagnostikā (Shapiro & Kamal, 2025).

NCS parasti atklāj *nervus medianus* vadīšanas ātruma samazināšanos un novirzes reģistrētā potenciāla formā un amplitūdā plaukstas locītavas līmenī, kas atspoguļo demielinizāciju kompresijas vietā (Shapiro & Kamal, 2025). Parasti vispirms tiek skarta sensoro šķiedru vadīšana, savukārt motorās šķiedras biežāk iesaistās nopietnākos gadījumos (Dahlin et al., 2024; Shapiro & Kamal, 2025). Standarta *nervus medianus* NCS jutība KKS diagnostikā ir apmēram 80-90% (Ibrahim et al., 2012). *Nervus medianus* un *nervus ulnaris* vadīšanas parametru salīdzināšana vienā un tajā pašā plaukstā var uzlabot diagnostisko precizitāti (Shapiro & Kamal, 2025). Arī muskuloskeletālā ultrasonogrāfija var kalpot par noderīgu palīgmetodi, jo ļauj vizualizēt sabiezējušu (tūskainu) *nervus medianus* karpālajā kanālā un izmērīt tā šķērssgriezuma laukumu, kas KKS gadījumā mēdz būt palielināts (Cartwright et al., 2012; Presazzi et al., 2011; Dahlin et al., 2024). Ultrasonogrāfija var palīdzēt izslēgt citus *nervus medianus* kompresijas iemeslus (piemēram, ganglija cistas vai tenosinovītu) (Presazzi et al., 2011; Cartwright et al., 2012; Dahlin et al., 2024). Magnētiskās rezonanses izmeklējums parasti nav nepieciešams rutīnas KKS diagnostikā, tomēr to var izmantot netipiskos vai terapijai rezistentos gadījumos, lai izvērtētu iespējamās anatomiskās īpatnības (Dahlin et al., 2024; Presazzi et al., 2011). Kopumā klīniskās ainas izvērtēšana un apstiprinošu NCS testu kombinācija vairumam pacientu nodrošina ticamu diagnozi (Dahlin et al., 2024; Shapiro & Kamal, 2025).

1.5. Ārstēšana

Agrīns vai viegls KKS vispirms tiek ārstēts konservatīvi (Dahlin et al., 2024; American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024). Ieteicama aktivitāšu mainīšana un ergonomisko apstākļu pielāgošana, lai mazinātu atkārtotas vai izteiktas plaukstas locītavas kustības (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Bieži tiek rekomendēta ortozes lietošana plaukstas locītavas imobilizācijai neitrālā pozīcijā nakts laikā, kas novērš locītavas fleksiju miega laikā, tādējādi samazinot spiedienu karpālajā kanālā un nereti atvieglojot nakts simptomus (Karjalainen et al., 2023; Walker et al., 2000; Dahlin et al., 2024). Pie konservatīvajām metodēm pieskaitāmi arī nesteroidie pretiekaisuma līdzekļi (sāpju mazināšanai) un kortikosteroīdu injekcijas karpālajā kanālā (Ibrahim et al., 2012; Dahlin et al., 2024). Kortikosteroīdu injekcijas var būtiski uzlabot simptomus īstermiņā, samazinot saliecējciņpslu apvalku iekaisumu un *nervus medianus* tūsku, tomēr efekts var būt īslaicīgs un pārejošs (Ashworth et al., 2023; Dahlin et al., 2024).

Ja simptomi ir smagi vai nereaģē uz konservatīvu terapiju, nepieciešama ķirurģiska karpālā kanāla atbrīvošana (Dahlin et al., 2024; American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024). Karpālā kanāla atbrīvošana ir plaši atzīta efektīva ķirurģiskas ārstēšanas metode idiopātiska karpālā kanāla sindroma gadījumā (Louie et al., 2012).

Karpālā kanāla atbrīvošanas operācija ietver *ligamentum carpi transversum* pārgriešanu, lai palielinātu kanāla tilpumu un samazinātu spiedienu uz *nervus medianus* (Dahlin et al., 2024; Presazzi et al., 2011). To var veikt caur atvērtu pieeju vai endoskopiski; abām metodēm ir līdzīgi augsti izdošanās rādītāji (*similarly high success rates*) (American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024; Li et al., 2020).

Operatīva ārstēšana vairumā gadījumu mazina simptomus, īpaši sāpes un nakts nejutīgumu (Dahlin et al., 2024; American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024). Pacientiem ar izteikti progresējošu KKS (piemēram, ar pastāvīgu nejutīgumu vai muskuļu atrofiju) arī pēc operācijas var nenotikt pilnīga funkciju atjaunošanās, tomēr tā var novērst turpmāku nerva bojājuma progresēšanu (Dahlin et al., 2024; American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024).

Pēcoperācijas periodā lielākā daļa pacientu satvēriena un pincetes satvēriena spēku atgūst pāris nedēļu līdz mēnešu laikā, lai gan iespējams neliels plaukstas locītavas spēka samazinājums (Dahlin et al., 2024; American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024).

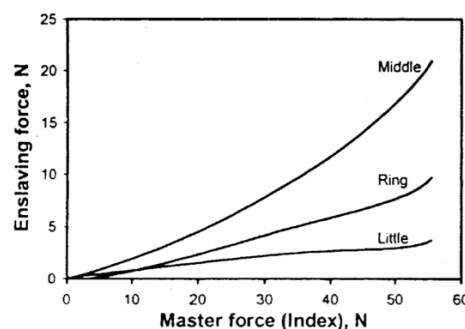
Kopumā savlaicīga KKS ārstēšana ir būtiska, lai novērstu neatgriezenisku nerva bojājumu un atjaunotu rokas funkcionalitāti (Dahlin et al., 2024; American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024). Ņemot vērā KKS biežo sastopamību un tā ietekmi uz darbspējīgā

vecuma populāciju, efektīvai sindroma vadībai ir liela nozīme sabiedrības veselības kontekstā (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012).

2. PIRKSTU SAVSTARPĒJĀ ATKARĪBA

2.1. Pirkstu savstarpējās atkarības jēdziens

Cilvēka roka spēj veikt izcili precīzas un veiklas kustības, tomēr atsevišķu pirkstu kustības nav pilnībā neatkarīgas (Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011). Pirkstu savstarpējā atkarība apzīmē parādību, kad viena pirksta kustība neizbēgami izraisa neapzinātu kustību vai spēka izmaiņas arī citos pirkstos (Lang & Schieber, 2004; Schieber & Santello, 2004). Pat tad, ja cilvēks mēģina kustināt tikai vienu pirkstu izolēti, blakus esošie pirksti parasti zināmā mērā arī iesaistās kustībā (Häger-Ross & Schieber, 2000). Šo efektu nereti dēvē par pirkstu “pakļaušanas efektu” (*enslaving effect*) (Zatsiorsky et al., 1998). Piemēram, mēģinot saliekt tikai zeltnesi, parasti nedaudz saliecas arī vidējais un mazais pirksts (Häger-Ross & Schieber, 2000; Lang & Schieber, 2004). Līdzīgi, ar vienu pirkstu spiežot pret kādu objektu, pirkstu "pakļaušanas efekta" dēļ arī citi pirksti netīši, bet ar mazāku spēku, spiedīs pret šo objektu (Zatsiorsky et al., 1998). Šis fenomens redzams 4. attēlā, kur redzams, ka palielinoties rādītājpirksta spēkam, pieaug arī citu pirkstu netīši radītais spēks. Vislielākā līdzaktivācija novērojama vidējā pirkstā, kas atbilst autoru secinājumam, ka pakļaušanas efekts ir izteiktāks blakus pirkstos (Zatsiorsky et al., 1998).



4. attēls. Pirkstu savstarpējās atkarības ilustrācija (Zatsiorsky et al., 1998).

Pirkstu savstarpējā atkarība ir labi dokumentēta normālas rokas motorās kontroles īpatnība, kas izriet gan no biomehāniskiem, gan neirāliem faktoriem (Lang & Schieber, 2004; Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011).

Lang & Schieber, (2004) pētīja, cik lielā mērā mehāniskā saikne starp pirkstiem un neiromuskulārā kontrole ierobežo pirkstu neatkarību, pētot pasīvas un aktīvas individuālas pirkstu kustības veselīgiem pieaugušajiem. Pasīvo kustību laikā subjekti atslābinājās, kamēr katrs pirksts, izmantojot speciāli izgatavotu ierīci, tika virzīts fleksijas un ekstensijas virzienā. Aktīvo kustību laikā subjekti pārvietoja katru pirkstu tajā pašā virzienā, cenšoties noturēt pārējos,

neiesaistītos pirkstus nekustīgi. Aktīvās kustības tika veiktas aptuveni ar tādu pašu kustību amplitūdu un ātrumu kā pasīvās kustības. Mehāniskās saistības ietekme tika noteikta no pasīvo kustību datiem, savukārt neiromuskulārās kontroles ietekme tika aprēķināta, no aktīvā stāvokļa rādītājiem atņemot pasīvās komponentes ietekmi. Pirkstu neatkarība pasīvo un aktīvo kustību laikā kopumā bija līdzīga, bet aktīvu, lielākas amplitūdas kustību laikā bija vērojama tendence uz mazāku neatkarību vidējā, zeltneša un mazā pirkstiņa gadījumā. Mehāniskā saikne visvairāk ierobežoja rādītājpirksta, vidējā pirksta un zeltneša neatkarību, kam sekoja mazais pirksts, un īkšķa neatkarībai radīja tikai niecīgus ierobežojumus. Turpretī neiromuskulārā kontrole galvenokārt ierobežoja zeltneša un mazā pirksta neatkarību lielākas amplitūdas kustību laikā un minimāli ietekmēja pārējos pirkstus. Šajos pētījumā pārbaudītajos kustību apstākļos mehāniskā saikne starp pirkstiem, šķiet, ir galvenais faktors, kas ierobežoja pilnīgu pirkstu kustību neatkarību (Lang & Schieber, 2004).

2.2. Pirkstu kustību mehāniskā pārnese un neirālā līdzaktivācija

Plaukstas ārējiem fleksoriem un ekstensoriem ir cīpslas, kas savstarpēji savienojas vai arī tām ir kopīga muskuļa kontraktīlā daļa ar vairākiem citiem pirkstiem (Reilly & Schieber, 2003; van Duinen et al., 2010; van Duinen & Gandevia, 2011). Piemēram, *flexor digitorum profundus* (FDP) cīpslām, kas iet uz rādītājpirkstu un mazo pirkstu, parasti ir sava, atsevišķa muskuļa kontraktīlā daļa, savukārt FDP cīpslas, kas iet uz vidējo pirkstu un zeltnesi, iziet no kopīgas muskuļa kontraktīlās daļas, kas ierobežo šo divu pirkstu neatkarīgu fleksiju (Reilly & Schieber, 2003; van Duinen & Gandevia, 2011). Līdzīgi, *extensor digitorum communis* pastāv starpcīpslu savienojumi (*juncturae tendinum*) ar blakus esošo pirkstu ekstensora cīpslām (von Schroeder & Botte, 1993). Šo saistaudu saišu dēļ spēks vai kustība no viena pirksta cīpslas var tikt mehāniski pārnests uz citu pirkstu (Lang & Schieber, 2004; von Schroeder & Botte, 1993). Arī pasīvie saistaudi plaukstā (piemēram, saites, starp pirkstiem esošā āda un citi struktūrelementi) var radīt pretestību, kas funkcionāli sasaista pirkstu kustības (Lang & Schieber, 2004).

Tāpat kā biomehānikai, arī nervu sistēmas kontrolei ir būtiska nozīme pirkstu savstarpējā atkarībā. Motorajā garozā un muguras smadzenēs atsevišķu pirkstu neirālā organizācija ievērojami pārklājas, un daudzi motorie neironi inervē muskuļus, kas piedalās vairāku pirkstu kustībās (Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011). Tādējādi centrālās nervu sistēmas komandas bieži aktivē pirkstu grupas sinerģiski, nevis nodrošina pilnībā izolētus signālus vienam konkrētam pirkstam (Häger-Ross & Schieber, 2000; Schieber

& Santello, 2004). Pastāv arī reflektorās ķēdes, kas koordinē pirkstu muskulatūras darbību un sensoro impulsu ieplūdi no viena pirksta var ietekmēt motoro izlādi citos pirkstos (Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011). Kopsavilkumā pirkstu savstarpējā atkarība rodas kopīgas muskuļu-cīpslu anatomijas un izkliedētu neirālās aktivācijas struktūru kombinācijas rezultātā (Lang & Schieber, 2004; Schieber & Santello, 2004).

2.3. Pirkstu kontroles kvantitatīvie rādītāji un sinerģiskā regulācija

Pētnieki ir izstrādājuši vairākas metodes, lai izmērītu pirkstu savstarpējās atkarības vai neatkarības pakāpi (Häger-Ross & Schieber, 2000; Lang & Schieber, 2004; Zatsiorsky et al., 1998). Viena no biežāk lietotajām pieejām ir pirkstu individualizācijas indekss (*finger individuation index*), kas raksturo to, cik lielā mērā konkrēts pirksts spēj kustēties vai radīt spēku patstāvīgi, neizraisot kustību vai spēka pieaugumu pārējos pirkstos (Häger-Ross & Schieber, 2000; Lang & Schieber, 2004). Eksperimenta laikā dalībniekiem var lūgt kustināt vai spiest ar vienu pirkstu noteiktā laikā, vienlaikus reģistrējot visu pirkstu kustības vai spēku. Netīšā kustība vai spēks pirkstos, kas netiek mērķtiecīgi aktivēti, kalpo kā savstarpējās atkarības rādītājs: jo lielākas ir piespiedu (*enslaved*) kustības, jo zemāka ir attiecīgā pirksta neatkarības pakāpe (Häger-Ross & Schieber, 2000; Zatsiorsky et al., 1998). Häger-Ross un Schieber (2000) izmantoja kustības fiksējošu cimdus, lai kvantitatīvi novērtētu individuālas kustības un konstatēja, ka neviens pirksts nespēj sasniegt 100% izolētu kustību, jo viena pirksta kustība zināmā mērā izraisa kustību arī citos pirkstos. Līdzīgi darīja arī Zatsiorsky et al. (1998), viena pirksta spēka uzdevumu laikā mērot netīšu spēka veidošanos pirkstos, kas uzdevumā nepiedalījās.

Šādi pētījumi ļāva izstrādāt kvantitatīvos indeksus katra pirksta neatkarības raksturošanai (Häger-Ross & Schieber, 2000; Zatsiorsky et al., 1998). Kopumā vislielākā neatkarība parasti ir novērojama īkšķim, rādītājpirkstam un mazajam pirkstam, savukārt zeltnešis un vidējais pirksts ir savstarpēji atkarīgāki (Häger-Ross & Schieber, 2000). Tas novērojams arī ikdienā - rādītājpirkstu ir vieglāk kustināt atsevišķi (piemēram, norādot vai rakstot uz tastatūras) nekā zeltneši, kas bieži kustas kopā ar blakus pirkstiem (Häger-Ross & Schieber, 2000). Minētās atšķirības skaidrojamas ar anatomiskām īpatnībām (rādītājpirkstam un mazajam pirkstam ir salīdzinoši nodalītāka muskulatūra, savukārt zeltnešis ir cieši saistīts ar blakus pirkstiem) un nervu sistēmas regulācijas īpatnībām (Lang & Schieber, 2004; Reilly & Schieber, 2003; Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011).

Pētnieki pirkstu koordinētas darbības raksturošanai izmanto arī jēdzienu sinerģija. Situācijās, kad vairāki pirksti vienlaikus rada spēku (piemēram, satvēriena laikā), nervu sistēma tos bieži kontrolē kā vienotu funkcionālu kopumu ar noteiktu spēka sadalījumu un spēka izmaiņas vienā pirkstā parasti tiek kompensētas ar spēka izmaiņām citos pirkstos (Latash et al., 2002; Zatsiorsky et al., 1998). Mūsdienu motorās kontroles teorijas paredz, ka smadzenes vienkāršo kustību vadību, izmantojot vairāku pirkstu sinerģisku kontroli, nevis kontrolējot katru pirkstu individuāli (Latash et al., 2002; Zatsiorsky et al., 1998).

Lai gan zināma pirkstu savstarpējās atkarības pakāpe ir iedzimta, to var ietekmēt prakse, attīstība un patoloģiski procesi (Elbert et al., 1995; Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011).

2.4. Faktori, kas ietekmē pirkstu savstarpējo atkarību

Pirkstu savstarpējās atkarības apmērs nav nemainīgs; tas var variēt atkarībā no vecuma, treniņa (prakses) un neiroloģiskā stāvokļa (Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011).

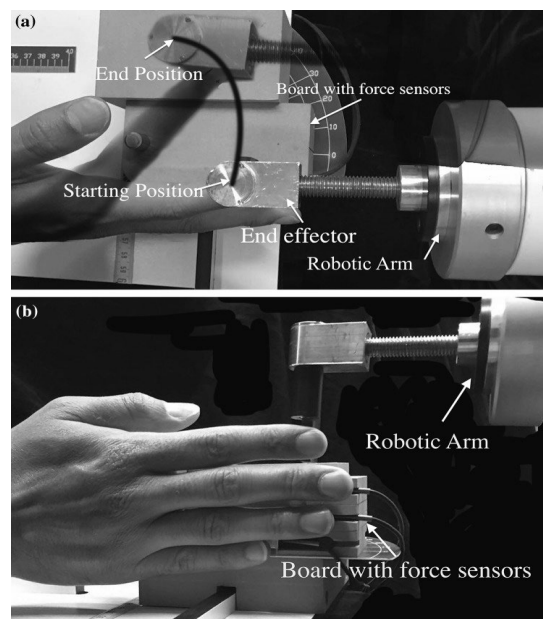
2.4.1. Vecums

Ir pretrunīgi pētījumi par vecuma ietekmi uz pirkstu savstarpējo atkarību. To jāapskatās detalizēti.

Veselīgas novecošanas laikā mēdz pieaugt pirkstu netīšā līdzaktivācija (*enslaving*). Gados vecākiem cilvēkiem uzdevumu laikā, ko veic viens pirksts, netīšā spēka veidošanās pirkstos, kuri uzdevumu neveic, ir mazāka nekā jauniem cilvēkiem, kas norāda uz lielāku pirkstu individualizāciju jeb neatkarību (Oliveira et al., 2008). Jāaplūko Oliveira et al. (2008) pētījumu detalizēti. Pētījumā tika salīdzināta jaunu un vecāka gadagājuma pieaugušo pirkstu darbība izometrisku fleksijas un ekstensijas uzdevumu laikā. Dalībniekiem bija nepieciešams radīt maksimālo spēku, saliecot un izstiepjot vienu pirkstu, pēc tam četrus pirkstus, izņemot īkšķi. Kā atkarīgie mainīgie tika aprēķināts maksimālais brīvprātīgais pirkstu spēks (*maximum voluntary finger force, MVF*), proti, maksimālais spēks, ko uzdevuma pirksts vai pirkstu grupa radīja attiecīgajā uzdevumā; spēka sadale (*force sharing, FS*); un pakļaušanas efekts (*force enslaving, FE*). FE pirkstu ekstensijas laikā bija lielāks nekā fleksijas laikā gan jauniešu, gan vecāka gadagājuma cilvēku grupās. Fleksijas un ekstensijas atšķirība bija lielāka vecāka gadagājuma cilvēku grupā. Iespējams, lielāka pirkstu fleksijas neatkarība ir saistīta ar to, ka pirkstu saliekšanas kustības ikdienas darbībās tiek izmantotas biežāk. Uzdevumu neveicošie pirksti, kas atrodas tuvāk uzdevuma pirkstam, radīja lielāku pakļaušanas efektu nekā pirksti,

nekā tālāk esošie pirksti. Spēka sadales modelis starp vecuma grupām neatšķīrās. Oliveira et al. (2008) secināja, ka novecošanās procesā pirkstu spēks samazinās, pirkstu neatkarība saliekšanas kustībās attīstības gaitā palielinās, bet spēka sadales modelis starp pirkstiem saglabājas relatīvi nemainīgs visa mūža laikā. Šīs ar vecumu saistītās izmaiņas, iespējams, nosaka gan muskuļu un saistaudu stīvuma pieaugums, gan neirālas pārmaiņas, piemēram, ar vecumu saistīts motoro vienību skaita zudums vai kortikālās inhibīcijas samazināšanās (van Duinen & Gandevia, 2011).

Turpretī ir pētījumi, kas parāda pirkstu savstarpējās atkarības palielināšanos novecošanas gaitā. Piemēram, Mirakhorlo, Maas, & Veeger (2018) konstatēja, ka novecošana ietekmē rokas motorisko kontroli, tostarp pirkstu pakļaušanas efektu statiskas presēšanas (*static pressing*) uzdevumu laikā. Pētnieki novērtēja, vai pirkstu spēka ierobežošanas apmērs mainās līdz ar novecošanu uzdevuma laikā, kas ietver gan statisko, gan dinamisko fāzi. Desmit jauniem labročiem (22-30 gadi) un desmit vecāka gadagājuma cilvēkiem (67-79 gadi) tika dots norādījums vispirms ar rādītājpirkstu izturēt nemainīgu 6 N (ņūtonu) spēku (statiskā fāze) un pēc tam saliekt rādītājpirkstu, vienlaikus pārvarot nemainīgu pretestības spēku (dinamiskā fāze). Pārējie pirksti (bez norādījumiem) tika turēti izstiepti. Šis process ir redzams 5. attēlā.

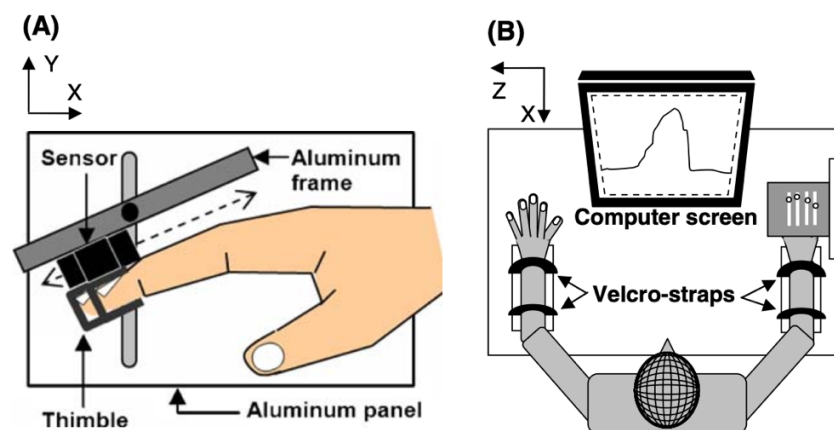


5. attēls. Eksperimentālā iekārta (Mirakhorlo, Maas, & Veeger, 2018).

Eksperimentālās iekārtas skats no augšas (a) un skats no sāniem (b). Attēlā redzama robotizētā roka, kas sekoja rādītājpirksta saliekšanas kustībai, un dēlis, uz kura tika novietoti neinstruētie pirksti. Melnā izliektā līnija (a) attēlā ir rādītājpirksta gala aptuvenais virziens (Mirakhorlo, Maas, & Veeger, 2018). Ar to tika mērīta *m. flexor digitorum superficialis* un *m.*

extensor digitorum EMG aktivitāte apakšdelma reģionos, kas atbilst rādītājpirkstam, vidējam pirkstam un zeltņiem, kā arī neinstruēto pirkstu spēks un rādītājpirksta pozīcija. Gan gados vecākiem, gan jauniem cilvēkiem neinstruēto pirkstu spēks rādītājpirksta izotoniskās saliekšanas laikā palielinājās aptuveni par 0,6 N, bet ar atšķirīgu aizkavēšanos vidēji par 100 ± 72 ms gados vecākiem cilvēkiem un 334 ± 101 ms jauniem cilvēkiem. Rezultāti arī liecina par atšķirīgu *m. flexor digitorum superficialis* un *m. extensor digitorum* aktivitātes reakciju neinstruēto pirkstu reģionos uz rādītājpirksta saliekšanu abās vecuma grupās. Pakļaušanas efekts bija ievērojami lielāks gados vecākiem cilvēkiem nekā jauniem cilvēkiem gan statiskajā, gan dinamiskajā fāzē. Šīs atšķirības vismaz daļēji var izskaidrot ar izmaiņām neiromuskulārajā kontrolē (Mirakhorlo, Maas, & Veeger, 2018).

Pētījumā par bērniem Shim, et al. (2007) novēroja ar vecumu saistītās MVF izmaiņas un fleksijas-ekstensijas atšķirības, kā arī pirkstu mijiedarbības rādītājus, piemēram, FE (pakļaušanas efekts), FS (spēka sadali) un FD (spēka deficītu). Šajā pētījumā piedalījās 25 labroči bērni vecumā no 6 līdz 10 gadiem un 25 pieaugušie vecumā no 20 līdz 24 gadiem (pieci subjekti katrā vecumā). Eksperimentu laikā subjektu apakšdelmi bija nostiprināti roku balstos. Subjekti ievietoja labās rokas distālās falangas C veida alumīnija uzgaļos, kas piestiprināti pie maziem spēka sensoriem; metakarpofalangeālās (MCP) locītavas bija aptuveni 20° fleksijā. Šis process redzams 6. attēlā.



6. attēls. Eksperimentālie iestatījumi (Shim, Oliveira et al., 2007).

Subjektiem tika dots uzdevums radīt maksimālo izometrisko spēku ar vienu pirkstu vai visiem četriem pirkstiem fleksijas vai ekstensijas stāvoklī. Lai pārbaudītu muskuļa spēka-garuma attiecību ietekmi uz MVF un citiem pirkstu mijiedarbības rādītājiem, no 25 pieaugušo subjektu grupas nejauši tika izvēlēti 6 subjekti un viņiem tika lūgts veikt to pašu eksperimentālo

protokolu, kas aprakstīts iepriekš. Tomēr MCP locītava bija 80° fleksijā. 20° MCP fleksijas apstākļos iegūtie rezultāti parādīja, ka (1) MVF palielinājās, bet FE samazinājās līdz ar vecumu, (2) bērniem pirkstu spēks ar vecumu pieauga straujāk fleksijā, nekā ekstensijā, (3) fleksijā tika konstatēta lielāka MVF, FE un FD nekā ekstensijā, (4) pirkstu FS bija ļoti līdzīgs bērniem un pieaugušajiem, (5) atsevišķu pirkstu FS modelis fleksijā un ekstensijā bija atšķirīgs, un (6) atšķirības starp fleksiju un ekstensiju, kas konstatētas 20° MCP locītavas apstākļos, bija spēkā arī 80° MCP locītavas apstākļos. Tika konstatēts, ka (a) pirkstu spēks un neatkarība palielinās no 6 līdz 10 gadu vecumam, un pieaugošās tendences ir vairāk redzamas fleksijā nekā ekstensijā, (b) pirkstu spēks un pirkstu neatkarība ir lielāka fleksijā nekā ekstensijā, un (c) bērniem spēka sadales modelis, šķiet, attīstās pirms 6 gadu vecuma vai arī tas ir rokas neiromuskuloskietālās sistēmas iedzimta īpašība. FE bija nedaudz mazāks 80° stāvoklī fleksijā nekā 20° stāvoklī, bet lielāks ekstensijā visiem subjektiem. To var interpretēt kā lielāku FE, kad saliecējmuskuļi vai ekstensormuskuļi ir izstiepti (Shim, Oliveira et al., 2007).

2.4.2. Prakse un meistarība

Cilvēki, kuri nodarbojas ar aktivitātēm, kurās nepieciešama smalka pirkstu kontrole, bieži attīsta izteiktāku neatkarību (Furuya & Soechting, 2012). Prasmīgi mūziķi, piemēram, pianisti vai ģitāristi, spēj kustību izpildē izteiktāk nošķirt viena pirksta aktivāciju no pārējiem pirkstiem un ilgstošs treniņš var mainīt pirkstu neirālo organizāciju (Elbert et al., 1995; Furuya & Soechting, 2012). Intensīva prakse var stiprināt noteiktus neirālos ceļus un veicināt tādu motoro kustību aktivācijas modeļu veidošanos, kas darbojas pretēji pamata sinerģijai, tādējādi uzlabojot pirkstu individualizāciju (Elbert et al., 1995).

Smalkām pirkstu kustībām vai mūzikas instrumentu spēlēšanai augsta pirkstu neatkarības pakāpe ir priekšrocība (Schieber & Santello, 2004). Prasmīgi indivīdi spēj sasniegt ļoti lielu pirkstu kontroles līmeni - piemēram, pianistiem ir izteiktāka pirkstu savstarpējā neatkarība nekā cilvēkiem, kuri nespēlē mūzikas instrumentus. Tas, visticamāk, ir ilgstoša treniņa rezultātā, kas pilnveido gan neirālo, gan muskulāro koordināciju (Furuya & Soechting, 2012).

Kad mūziķiem un cilvēkiem, kuri nespēlē mūzikas instrumentus, tika pētīti uzvedības un elektroencefalogrāfiskie (EEG) mērījumi, kas saistīti ar visvairāk pakļauto (zeltnesis) un vismazāk pakļauto (rādītājpirksts) pirkstu vadāmību, 6 pianisti un 6 vecumam atbilstoši kontroles dalībnieki veica virkni izometrisku spēka radīšanas uzdevumu ar rādītājpirkstu un zeltnesi. Subjekti radīja 3 dažādus spēka līmeņus ar rādītājpirkstu vai zeltnesi. Tika izmērīts

visu 4 pirkstu (rādītājpirksts, zeltnešis, vidējais un mazais) radītais izometriskais spēks gan dinamiskajā, uz mērķi virzītā kontakta spēka, gan statiskajā spēka uzturēšanas fāzē, izmantojot EEG, lai iegūtu 4 kustību saistīto kortikālo potenciālu komponentus pirms spēka reakcijām un to laikā. Tika secināts, kā pianisti precīzāk sasniedza vēlamu spēka līmeni nekā cilvēki, kuri nespēlē mūzikas instrumentus un pianisti uzrādīja mazāku pirkstu savstarpējo pakļaušanos salīdzinājumā ar tiem, kuri nespēlē mūzikas instrumentus. Treškārt, pakļaušanas apjoms palielinājās līdz ar nominālā spēka līmeņa pieaugumu neatkarīgi no tā, vai kā galvenais pirksts tika izmantots rādītājpirksts vai zeltnešis. Tas liecina par svarīgu iepriekšējās pieredzes lomu pirkstu neatkarīgā lietošanā un atbalsta ideju, ka pieredze ir saistīta ar izmaiņām uzvedības un EEG rādītājos uzdevumu izpildes laikā. Autori norāda, ka ar praksi saistītas pieejas var būt noderīgas rehabilitācijas stratēģiju izstrādē, tostarp tādu traucējumu gadījumā kā insults vai fokāla rokas distonija (Slobounov et al., 2002).

2.4.3. Neuroloģiskas un muskuloskeletālas slimības

Centrālās vai perifērās nervu sistēmas bojājums var būtiski ietekmēt pirkstu neatkarību. Pēc insulta, kas skar motorās garozas struktūras, pacientiem bieži zūd neatkarīga pirkstu kontrole un tā vietā parādās masīvas satvēriena kustības vai neapzinātas pirkstu “spoguļkustības” (*mirroring*), fenomens, ko hemiplēģijas gadījumā mēdz dēvēt par pirkstu fleksoru sinerģiju (*finger flexor synergy*). Tas būtībā ir ekstrēms patoloģiskas savstarpējās atkarības piemērs, ko nosaka izolētas kortikālās kontroles zudums (Lang & Schieber, 2003; Schieber & Santello, 2004).

Li et al. (2003) analizēja pirkstu savstarpējo atkarību pēc vienas pusēja insulta, izmantojot maksimālā brīvprātīgā spēka veidošanas uzdevumus ar dažādām pirkstu kombinācijām. Pētījumā tika iekļauti 16 pacienti pēc insulta un 16 vecumam un dzimumam atbilstoši kontroles dalībnieki. Tika reģistrēti individuālie pirkstu spēki un FE, FD un bilaterālais deficīts (BD, *bilateral deficit*). Rezultāti parādīja, ka insulta skartā roka radīja par aptuveni 36% mazāku spēku nekā neskartā roka, un tajā tika novērots lielāks FE, kas norāda uz samazinātu pirkstu neatkarību pēc insulta. Turklāt insulta skartajā rokā tika novērtos mazāks FD, kas var liecināt par relatīvi lielāku rādītājpirksta un vidējā pirksta iesaisti spēka veidošanā un mazākiem šo pirkstu funkcijas traucējumiem pēc insulta. Autori secināja, ka insults ietekmē ne tikai pirkstu spēku, bet arī vairāku pirkstu savstarpējās mijiedarbības veidu, kas liecina par izmainītu pirkstu koordinācijas neirālo kontroli pēc insulta (Li et al., 2003).

Arī perifēro nervu bojājumi vai tādi traucējumi kā distonija var mainīt pirkstu koordināciju. Fokālās rokas distonijas gadījumā (piemēram, mūziķiem) pacientiem novēro pārmērīgu netīšu pirkstu līdzaktivāciju (Lin & Hallett, 2009). Piemēram, Sadnicka et al. (2024) pētīja, vai mūziķiem ar uzdevuma specifisku fokālu distoniju ir traucēta pirkstu individualizācija, īpaši palielināts FE un spoguļkustības izolētu pirkstu kustību laikā. Pētījumā 20 profesionāli mūziķi (labroči), 11 ar distoniju un 9 veseli kontroles dalībnieki, veica pirkstu individualizācijas uzdevumu ar ierīci, kas reģistrēja izometrisko spēku viena pirksta spiediena laikā. Autori konstatēja, ka distonijas pacientiem bija izteikti lielāks FE un spoguļkustības, īpaši simptomātiskajā rokā. Tas norāda uz samazinātu pirkstu neatkarību un traucētu sensori motoro kontroli mūziķu distonijas gadījumā (Sadnicka et al., 2024).

Šie piemēri ilustrē, ka pirkstu savstarpējā atkarība neiroloģisku traucējumu gadījumā var būt ievērojami izteiktāka (Lang & Schieber, 2003; Lin & Hallett, 2009).

Runājot par citām neurodeģeneratīvām saslimšanām, piemēram, Parkinsona slimību, Park et al. (2012) pētīja vairāku pirkstu (*multifinger*) mijiedarbību Parkinsona slimības gadījumā un konstatēja, ka agrīnā slimības stadijā esošiem pacientiem salīdzinājumā ar veselām kontroles grupas dalībniekiem bija samazināta pirkstu individualizācija un traucēta vairāku pirkstu (*multifinger*) koordinācija. Galvenie pētījuma rezultāti liecina, ka Parkinsona slimība ir saistīta ar samazinātu maksimālo spēku, palielinātu pirkstu savstarpējo atkarību un traucētām vairāku pirkstu sinerģijām pat relatīvi agrīnā slimības stadijā (Park et al., 2012).

Vērts pieminēt Parkinsona slimību arī KKS kontekstā. Han et al. (2015) veica pētījumu, kurā tika iekļauti 33 *de novo* Parkinsona slimības pacienti ar vienpusēju rokas trīci. Tika secināts, ka roku trīce pacientiem ar nesenu Parkinsona slimības attīstību nebija tieši saistīta ar karpālā kanāla sindroma attīstību; gluži pretēji, visiem pacientiem ($n = 7$), kuriem tika diagnosticēts KKS, tas tika konstatēts rokā bez trīces. Biežāka netrīcošās rokas lietošana var izraisīt mehānisku slodzi un var būt saistīta ar KKS attīstību - tātad, Parkinsona slimības agrīna diagnostika un atbilstoša izglītošana par roku izmantošanu varētu būt būtiska, lai novērstu KKS profilaksē pacientiem ar Parkinsona slimību un trīci (Han et al., 2015).

Sistēmiskā pārskata un metaanalīzes rezultāti liecina, kā kopējā KKS izplatība Parkinsona slimības gadījumā tiek lēsta 15% apmērā; KKS relatīvā riska attiecība Parkinsona slimības gadījumā, salīdzinot ar kontroles grupu, bija 3,31, kas norāda uz potenciāli palielinātu karpālā kanāla sindroma izplatību indivīdiem ar Parkinsona slimību. Tāpēc jāpalielina uzmanība KKS simptomiem Parkinsona slimības pacientiem, kuriem ir augšējo ekstremitāšu

sensoriskas vai motoriskas sūdzības (Attia et al., 2026). No biomehāniskā un funkcionālā viedokļa šie atklājumi uzsver regulāras augšējo ekstremitāšu skrīninga un rehabilitācijas stratēģiju ieviešanas nozīmi fizioterapijas praksē, kas vērstas uz roku lietošanu, veiklību un sensori motorisko kontroli.

3. PIRKSTU SAVSTARPĒJĀ ATKARĪBA KARPĀLĀ KANĀLA SINDROMA GADĪJUMĀ

KKS kā *nervus medianus* kompresijas neiropātija sniedz salīdzinoši labu piemēru tam, kā sensorie un motorie deficīti var ietekmēt pirkstu koordināciju (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012). Lai gan KKS primāri izpaužas ar jušanas traucējumiem un muskuļu vājumu, ir pierādījumi, ka tas var mainīt arī tipisko pirkstu kustību sinerģiju (Grandy et al., 2018; Zhang et al., 2011). Traucēta sensorā atgriezeniskā saite no *nervus medianus* inervētajiem pirkstiem (īkšķa, rādītājpirksta, vidējā pirksta) var pasliktināt centrālās nervu sistēmas (CNS) spēju precīzi kontrolēt pirkstus neatkarīgi, savukārt tenārā paugura muskulatūras vājums vai atrofija var mainīt spēka sadalījumu plaukstā (Dahlin et al., 2024; Grandy et al., 2018; Ibrahim et al., 2012; Zhang et al., 2012).

Jaunākie pētījumi norāda par izmaiņām vairāku pirkstu mijiedarbībā KKS pacientiem (Abolins et al., 2026; Grandy et al., 2018; Jacob et al., 2025; Zhang et al., 2011). Piemēram, Grandy et al. (2018) parādīja, ka KKS pacientiem, saskaroties ar pēkšņu ārēju iedarbību, bija grūtības radīt neatkarīgu reakciju ar rādītājpirkstu. Šajā pētījumā deviņi pacienti ar klīniski diagnosticētu KKS un deviņi asimptomātiski kontroles grupas dalībnieki veica viena pirksta perturbācijas uzdevumu, lai novērtētu, cik efektīvi rādītājpirksts spēj reaģēt uz negaidītu ārēju slodzi. Dalībniekus lūdza izturēt stabilu 3 N apmērā esošu spiedienu ar rādītājpirkstu uz slīdošas plāksnes, kamēr tika radīta negaidīta ārēja slodze (perturbācija), atbrīvojot piekārtu svaru. Uzdevums bija pēc iespējas ātrāk apturēt plāksnes kustību, vienlaikus reģistrējot pirmā dorsālā interesālā muskuļa elektromiogrāfisko aktivitāti un rādītājpirksta radīto spēku. Salīdzinājumā ar kontroles grupu, KKS pacientiem bija pagarināts muskuļu atbildes latentais laiks un spēka atbildes latentais laiks, attiecīgi par 20,9% un 12,0%. Turklāt plāksnes slīdēšanas ilgums KKS grupā bija statistiski nozīmīgi ilgāks ($142,2 \pm 5,8$ ms) nekā kontroles grupā ($133,1 \pm 8,4$ ms), savukārt atbildes ilgums un intensitāte starp grupām statistiski nozīmīgi neatšķīrās. Tā kā šajā pētījuma protokolā tika vērtēts tikai rādītājpirksts, vairāku pirkstu savstarpējā atkarība netika tieši analizēta. Tomēr tas ir nozīmīgi pirkstu savstarpējās atkarības un KKS kontekstā, jo parāda, ka ar KKS saistītie sensorie un motorie traucējumi pasliktina šķietami izolēta pirksta savlaicīgu kontroli neparedzētas mehāniskas slodzes apstākļos un var izpausties kā mazāk diferencētas pirkstu kustības. Svarīgi, ka paši autori norādīja uz nepieciešamību nākotnes pētījumos izpētīt vairāku pirkstu perturbācijas uzdevumus un noteikt, cik lielā mērā viens pirksts KKS gadījumā iesaista blakus esošos pirkstus, sevišķi iespējama muskuļu pakļaušanas

efekta (*muscle enslaving*) kontekstā (Grandy et al., 2018). Tādēļ šo pētījumu korektāk interpretēt kā netiešu pierādījumu tam, ka KKS var pasliktināt pirkstu individualizāciju, nevis kā tiešu pierādījumu izmainītai pirkstu savstarpējai atkarībai.

KKS gadījumā šķietami tiek mainīta arī pirkstu koordinācija satvēriena uzdevumu laikā (Zhang et al., 2012). Zhang et al. (2012) pētījumā 14 KKS pacienti un 14 kontroles grupas dalībnieki satvēra, pacēla un noturēja priekšmetu, kura masas centra novietojums tika mainīts. Abas grupas veiksmīgi izpildīja uzdevumu – tās ar pirkstu spēkiem radīja stabilizējošu griezes momentu, kas kompensēja masas centra nobīdes izraisīto tendenci priekšmetam saskvērties, taču nozīmīgas veikspējas atšķirības starp grupām netika novērotas. Tomēr KKS pacienti šo rezultātu sasniedza ar atšķirīgu kontroles stratēģiju – viņi izmantoja lielāku kopējo satvēriena spēku nekā kontroles grupa un kamēr kontroles grupa tangenciālo spēku sadalījumu pielāgoja jau pirms pacelšanas atbilstoši uzdevuma prasībām, KKS pacientiem šāda agrīna pielāgošana netika novērota. KKS pacienti, pielāgojoties masas centra izmaiņām, galvenokārt balstījās uz normālo spēku pārdali starp pirkstiem, īpaši iesaistot rādītājpirkstu un mazo pirkstu. Autori secināja, ka KKS neizslēdz spēju izpildīt uzdevumu, bet traucē atsevišķu satvēriena kontroles parametru modulāciju, kas liecina par samazinātu sensomotorās sistēmas elastību. Šis pētījums sniedz tiešus pierādījumus par izmainītu vairāku pirkstu koordināciju, kas netieši norāda uz izmainītu pirkstu savstarpējo atkarību, jo KKS pacienti viena un tā paša mehāniskā mērķa sasniegšanai izmantoja mazāk elastīgas, kompensatoras spēka sadales stratēģijas (Zhang et al., 2012).

Abolins et al. (2026) pētījumā analizēja četru pirkstu sinerģiju (veidu kā pirksti piedalās kopīga uzdevuma veikšanā) izometriskā spēka radīšanas uzdevumā un konstatēja, ka KKS pacientiem pirkstu spēku stabilizējošā koordinācija ir vājāka. Stabilās spēka uzturēšanas fāzē sinerģijas indekss KKS grupā bija statistiski nozīmīgi zemāks nekā kontroles grupā ($0,47 \pm 0,48$ pret $0,97 \pm 0,46$), kas liecina par samazinātu vairāku pirkstu koordināciju. Autori secināja, ka KKS izraisa nevis vairāku pirkstu sinerģiju zudumu, bet to vājināšanos. Ātras spēka palielināšanas sākumā koordinācija KKS grupā kļuva vēl vājāka, taču šī atšķirība nebija statistiski nozīmīga. Rezultāti liecina, ka KKS neizslēdz vairāku pirkstu sadarbību, bet padara to vājāku un mazāk stabilu (Abolins et al., 2026). Pirkstu savstarpējās atkarības kontekstā tas nozīmē, ka pacienti spēj izpildīt uzdevumu, taču to dara ar mazāk efektīvu koordināciju starp pirkstiem. No funkcionālā viedokļa KKS pacienti, iespējams, paļaujas uz stingrākām un mazāk

adaptīvām koordinācijas stratēģijām, kompensējot samazinātu sensoro atgriezenisko saiti (Abolins et al., 2026; Zhang et al., 2012).

Jacob et al. (2025) pētīja, vai pacientiem ar KKS atveseļošanās pēc karpālā kanāla atbrīvošanas operācijas uzlabo ne tikai spēka regulāciju, bet arī pirkstu galu spēku koordināciju. 12 KKS pacienti veica satveršanas un pacelšanas uzdevumu ar instrumentētu rokturi trīs dažādos ārējā griezes momenta apstākļos. Mērījumi tika veikti vienu nedēļu pirms operācijas un trīs nedēļas pēc tās. Pēc operācijas pacienti kopumā izmantoja mazāku satvēriena spēku un viņiem bija mazāka satvēriena spēka variabilitāte starp mēģinājumiem, kas liecina par konsekvētāku un efektīvāku spēka kontroli un regulāciju atkārtotos mēģinājumos. Tomēr sinerģijas indeksi gan kopējam tangenciālajam spēkam, gan kopējam spēka momentam pirms un pēc operācijas statistiski nozīmīgi nemainījās (saglabājās līdzīgi), un ekvivalences analīze apstiprināja šo līdzību visos uzdevuma apstākļos. Autori secināja, ka operācija uzlaboja spēka kontroli, bet ne spēka koordināciju. Satvēriena spēka un tā variabilitātes samazinājumu viņi interpretēja kā uzlabotu sensoro atgriezenisko saiti pēc dekompresijas, savukārt nemainīgie sinerģiju indeksi norādīja, ka CNS agrīnā pēcoperācijas periodā nepārkārtoja koordinācijas pamatstratēģiju (*basic coordination strategy*) (Jacob et al., 2025). Šie rezultāti liecina, ka hroniska KKS gadījumā var veidoties ilgstošas pārmaiņas vai adaptīvas izmaiņas rokas motorajā kontrolē. Centrālā nervu sistēma, iespējams, var pārkārtot un optimizēt motorās komandas, ņemot vērā *nervus medianus* funkcijas ierobežojumus un šīs adaptīvās izmaiņas var saglabāties arī pēc nerva kompresijas novēršanas (Jacob et al., 2025). Pirkstu savstarpējās atkarības kontekstā šis pētījums neparāda, ka pēc operācijas tā būtu palielinājusies vai samazinājusies; drīzāk tas liecina, ka pamata veids kā pirksti sadarbojas kopīgā uzdevumā, īstermiņā paliek līdzīgs pirmsoperācijas stāvoklim. Netieši tas varētu sakrist ar domu, ka hroniska KKS gadījumā pirkstu koordinācija kļūst mazāk elastīga un, iespējams, vairāk saistīta, taču Jacob et al. (2025) šo aspektu tieši nemērīja.

Pacientiem ar KKS pirkstu savstarpējā atkarība varētu būt palielināta, tomēr tā kā līdz šim šādi pētījumi nav veikti un iepriekš aprakstītajos pētījumos tas nav pierādīts tieši, šāds pieņēmums interpretējams kā pamatota hipotēze, nevis kā vispārēji apstiprināts fakts (Grandy et al., 2018; Zhang et al., 2012; Abolins et al., 2026; Jacob et al., 2025). Plašākā pirkstu motorās kontroles literatūrā pirkstu pakļaušanas efekts tiek skaidrots ar vairāku mehānismu kopdarbību, tostarp mehāniskām saitēm starp cīpslām un mīkstajiem audiem, vairākus pirkstus ietekmējošām motorajām vienībām apakšdelma pirkstu muskuļos, kā arī kopīgām vai

diferencētām CNS komandām; attiecīgi būtu loģiski sagaidīt, ka pirkstu pakļaušanas efekts biežāk izpaudīsies situācijās, kad motorā kontrole mazāk balstās uz selektīvu katra pirksta regulāciju un vairāk uz kopīgu vairāku pirkstu aktivāciju (Zatsiorsky et al., 1998; Häger-Ross & Schieber, 2000). Šādu iespēju KKS gadījumā netieši atbalsta pierādījumi, ka *nervus medianus* kompresija pasliktina sensoro vadīšanu un sensori-motoro integrāciju, jo KKS pacientiem reakcija uz negaidītu ārēju slodzi (perturbācijām) ir aizkavēta un paši autori ir norādījuši nepieciešamību turpmāk pētīt, cik lielā mērā viena pirksta aktivācija KKS gadījumā iesaista blakus esošos pirkstus iespējamā muskuļu pakļaušanas kontekstā (Grandy et al., 2018; Ibrahim et al., 2012). Vēl viens netiešs arguments ir tas, ka KKS pacienti satvēriena uzdevumos saglabā spēju sasniegt mehānisko mērķi, taču to dara ar šaurāku koordinācijas stratēģiju klāstu, neizmantojot visu pieejamo pirkstu koordinācijas potenciālu un vairāk paļaujoties uz spēka sadali starp pirkstiem, kas saskan ar mazāk elastīgu un savstarpēji vairāk saistītu vairāku pirkstu kontroli (Zhang et al., 2012). Nozīmīgi ir arī Abolins et al. (2026) pētījumā iegūtie rezultāti, jo tie rāda, ka KKS ir saistīts ar saglabātām, bet pavājinātām pirkstu sinerģijām un lielāku uzdevuma izpildi destabilizējošu variabilitāti un diskusijas sadaļā pieļauj, ka šī atradne varētu būt saistīta ar izmainītu neirāli-mehānisko sasaisti vai izmaiņām pirkstu savstarpējā atkarībā centrālas adaptācijas dēļ. Šis pētījums sasaista KKS arī ar kortikālu reorganizāciju un mazāk skaidri nošķirtām atsevišķu pirkstu reprezentācijām CNS, kas teorētiski varētu veicināt mazāk diferencētu un vairāk sasaistītu pirkstu kontroli (Abolins et al., 2026). Savukārt fakts, ka pēc karpālā kanāla atbrīvošanas operācijas uzlabojas spēka kontrole, bet sinerģiju indeksi agrīnā pēcoperācijas periodā nemainās, leicina, ka pirkstu koordinācijas pamatstratēģija var saglabāties stabila arī pēc sensorās funkcijas uzlabošanās, tādēļ hroniska KKS gadījumā vairāk sasaistītais koordinācijas modelis varētu kļūt par noturīgu kompensējošu stratēģiju (Jacob et al., 2025).

Nemot vērā iepriekš aprakstītos pētījumus un no tiem izrietošos secinājumus, visdrošāk būtu apgalvot, ka iespējami palielināta pirkstu savstarpējā atkarība KKS gadījumā visdrīzāk varētu būt saistīta ar traucētu sensoro atgriezenisko saiti, samazinātu vairāku pirkstu koordinācijas elastību, lielāku destabilizējošu variabilitāti un iespējamām centrālām adaptācijām, nevis ar tieši pierādītu pirkstu pakļaušanas efekta pieaugumu (Grandy et al., 2018; Zhang et al., 2012; Abolins et al., 2026; Jacob et al., 2025).

SECINĀJUMI

Pirkstu savstarpējā atkarība ir rokas funkcijai raksturīga iedzimta īpašība, kas izriet no biomehāniskās un nervu sistēmas uzbūves (Lang & Schieber, 2004; Schieber & Santello, 2004; van Duinen & Gandevia, 2011).

Karpālā kanāla sindroms (KKS) ir bieži sastopama perifēra neiropātija, ko izraisa *nervus medianus* kompresija plaukstu locītavas apvidū (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012).

KKS, izmainot sensoros un motoros nervu sistēmas signālus uz roku, var ietekmēt šo trauslo līdzsvaru starp pirkstu neatkarību un savstarpējo sasaisti (Dahlin et al., 2024; Ibrahim et al., 2012; Zhang et al., 2011).

KKS pacienti bieži turpina veikt ikdienas aktivitātes, bet, iespējams, ar izmainītu koordināciju - izmantojot lielāku spēku vai iesaistot papildus pirkstus, lai kompensētu skarto pirkstu funkcijas ierobežojumus (Zhang et al., 2012).

Šo smalko izmaiņu atpazīšanai ir klīniska nozīme. Tas nozīmē, ka KKS rehabilitācijā būtu jācenšas ne tikai atjaunot spēku un jušanu, bet arī jāiekļauj vingrinājumi smalkās motorikas kontroles un pirkstu neatkarības atjaunošanai (American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2024).

Jaunie pētījumi par KKS saistītiem kustību deficītiem, tostarp izmainītām pirkstu sinerģijām, uzsver nepieciešamību terapijā īpašu uzmanību vērst rokas koordinācijas uzlabošanai (Abolins et al., 2026; Grandy et al., 2018; Jacob et al., 2025).

Hroniska KKS gadījumā var veidoties ilgstošas pārmaiņas vai adaptīvas izmaiņas rokas motorajā kontrolē. CNS, iespējams, var pārkārtot un optimizēt motorās komandas, ņemot vērā *nervus medianus* funkcijas ierobežojumus un šīs adaptīvās izmaiņas var saglabāties arī pēc nerva kompresijas novēršanas (Jacob et al., 2025).

Izpratne par to, kā KKS ietekmē pirkstu savstarpējo atkarību, var veicināt mērķētu intervenču izstrādi, lai palīdzētu pacientiem atgūt funkcionāli tuvāk normai esošu rokas darbību.

Darba mērķis – izpētīt un aprakstīt zinātniskajā literatūrā pieejamos datus par karpālā kanāla sindromu un pirkstu savstarpējo atkarību un to iespējamo saistību un savstarpējo ietekmi, identificējot galvenās atziņas, izaicinājumus un iespējamus risinājumus, kas balstīti uz mūsdienu medicīnas zināšanām – ir sasniegts, darba uzdevumi ir izpildīti.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

Abolins, V., Cuadra, C., Kalve, I., & Vanadzins, I. 2026. Impact of carpal tunnel syndrome on multidigit synergies and anticipatory synergy adjustments. *Neuroscience*, 592, 212-222. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2025.11.043>

American Academy of Orthopaedic Surgeons. 2024. Clinical practice guideline on the management of carpal tunnel syndrome. Iegūts no: <https://new.aaos.org/globalassets/quality-and-practice-resources/carpal-tunnel/carpal-tunnel-2024/cts-cpg.pdf> [sk. 02.02.2026.]

American Academy of Orthopedic Surgeons. 2016. Management of Carpal Tunnel Syndrome Evidence based clinical practice guidelines. Iegūts no: <https://specialty.medicaldialogues.in/management-of-carpal-tunnel-syndrome-american-academy-of-orthopaedic-surgeons-guidelines> [sk. 27.01.2026.]

Ashworth, N. L., Bland, J. D. P., Chapman, K. M., Tardif, G., Albarqouni, L., & Nagendran, A. 2023. Local corticosteroid injection versus placebo for carpal tunnel syndrome. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2(2), CD015148. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD015148>

Attia, A. N., Raafat, K. W., Ezz, M. R., Sabry, E. N., Mohammed, M. M., Amin, A. M., Syed, M. S., Pamboris, G. M., Plakias, S., Viseux, F., & Ibrahim, I. A. 2026. Prevalence and Risk of Carpal Tunnel Syndrome in Parkinson's Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 11(1), 66. <https://doi.org/10.3390/jfmk11010066>

CarpalTunnel.com. 2026. *When to Consider Carpal Tunnel Surgery*. Iegūts no: <https://carpaltunnel.com/patient-resources/when-to-consider-carpal-tunnel-surgery> [sk.24.02.2026.]

Cartwright, M. S., Hobson-Webb, L. D., Boon, A. J., Alter, K. E., Hunt, C. H., Flores, V. H., Werner, R. A., Shook, S. J., Thomas, T. D., Primack, S. J., Walker, F. O. 2012. Evidence-based guideline: Neuromuscular ultrasound for the diagnosis of carpal tunnel syndrome. *Muscle & Nerve*, 46(2), 287-293. <https://doi.org/10.1002/mus.23389>

Cîmpeanu, M.-C., Roman, N., Grigorescu, S., Grigorescu, O.-D., & Miclăuș, R. S. 2024. Management of “de novo” carpal tunnel syndrome in pregnancy: A narrative review. *Journal of Personalized Medicine*, 14(3), 240. <https://doi.org/10.3390/jpm14030240>

Dahlin, L. B., Zimmerman, M., Calcagni, M., Hundepool, C. A., van Alfen, N., & Chung, K. C. 2024. Carpal tunnel syndrome. *Nature reviews. Disease primers*, 10(1), 37. <https://doi.org/10.1038/s41572-024-00521-1>

Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. 1995. Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science (New York, N.Y.)*, 270(5234), 305-307. <https://doi.org/10.1126/science.270.5234.305>

Furuya, S., & Soechting, J. F. 2012. Speed invariance of independent control of finger movements in pianists. *Journal of Neurophysiology*, 108(7), 2060-2068. <https://doi.org/10.1152/jn.00378.2012>

Grandy, E. L., Xiu, K., Marquardt, T. L., Li, C., Evans, P. J., & Li, Z. M. 2018. Carpal tunnel syndrome impairs index finger responses to unpredictable perturbations. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 38, 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.03.001>

Häger-Ross, C., & Schieber, M. H. 2000. Quantifying the independence of human finger movements: comparisons of digits, hands, and movement frequencies. *The Journal of Neuroscience*, 20(22), 8542-8550. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-22-08542.2000>

- Han, S. W., Cheon, K. Y., Kim, J. Y., & Baik, J. S. 2015. Carpal Tunnel Syndrome in Patients with Tremor Dominant Parkinson's Disease. *PloS one*, 10(6), e0130779. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130779>
- Hansen, P. A., Micklesen, P., & Robinson, L. R. 2004. Clinical utility of the flick maneuver in diagnosing carpal tunnel syndrome. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 83(5), 363-367. <https://doi.org/10.1097/01.PHM.0000124439.14757.99>
- Ibrahim, I., Khan, W. S., Goddard, N., & Smitham, P. 2012. Carpal tunnel syndrome: a review of the recent literature. *The Open Orthopaedics Journal*, 6, 69-76. <https://doi.org/10.2174/1874325001206010069>
- Jacob, T., Ibrahim, M., Babu, G. V., Pandian, K. S. K., Krishnamoorthy, R., Karthikeyan, G., Jeyakumar, P., Valarmathy, V. S., Hussain, J., Ezhilavan, C. S., Sridhar, K., Balasubramanian, S., & Varadhan, S. K. M. 2025. Carpal tunnel release surgery restores force control but not force coordination in CTS patients. *Scientific Reports*, 15(1), 15866. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99250-y>
- Karjalainen, T. V., Lusa, V., Page, M. J., O'Connor, D., Massy-Westropp, N., & Peters, S. E. 2023. Splinting for carpal tunnel syndrome. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2(2), CD010003. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010003.pub2>
- Kim, J. K., Hann, H. J., Kim, M. J., & Kim, J. S. 2010. The expression of estrogen receptors in the tenosynovium of postmenopausal women with idiopathic carpal tunnel syndrome. *Journal of Orthopaedic Research*, 28(11), 1469–1474. <https://doi.org/10.1002/jor.21160>
- Lakshminarayanan, K., Shah, R., & Li, Z.-M. 2019. Sex-related differences in carpal arch morphology. *PloS One*, 14(5), e0217425. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217425>
- Lang, C. E., & Schieber, M. H. 2003. Differential impairment of individuated finger movements in humans after damage to the motor cortex or the corticospinal tract. *Journal of Neurophysiology*, 90(2), 1160-1170. <https://doi.org/10.1152/jn.00130.2003>
- Lang, C. E., & Schieber, M. H. 2004. Human finger independence: limitations due to passive mechanical coupling versus active neuromuscular control. *Journal of Neurophysiology*, 92(5), 2802-2810. <https://doi.org/10.1152/jn.00480.2004>
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schöner, G. 2002. Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 30(1), 26-31. <https://doi.org/10.1097/00003677-200201000-00006>
- Li, S., Latash, M. L., Yue, G. H., Siemionow, V., & Sahgal, V. 2003. The effects of stroke and age on finger interaction in multi-finger force production tasks. *Clinical Neurophysiology*, 114(9), 1646–1655. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(03\)00164-0](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(03)00164-0)
- Lin, P. T., & Hallett, M. 2009. The pathophysiology of focal hand dystonia. *Journal of Hand Therapy*, 22(2), 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2008.10.008>
- Liuke, K. & Daneviča, Z. 2020. *Mononeiropātijas. Biežākie iemesli ambulatorajā praksē*. Doctus. Iegūts no: <https://www.doctus.lv/raksts/medicina-un-farmacija/kliniska-prakse/mononeiropatijas.-biezakie-imesli-ambulatoraja-prakse-4617/> [sk. 25.02.2026.]
- Louie, D., Earp, B., & Blazar, P. 2012. Long-term outcomes of carpal tunnel release: a critical review of the literature. *Hand (New York, N.Y.)*, 7(3), 242–246. <https://doi.org/10.1007/s11552-012-9429-x>

- Mirakhorlo, M., Maas, H., & Veeger, H. E. J. 2018. Increased enslaving in elderly is associated with changes in neural control of the extrinsic finger muscles. *Experimental Brain Research*, 236(6), 1583-1592. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5219-1>
- Oliveira, M. A., Hsu, J., Park, J., Clark, J. E., & Shim, J. K. 2008. Age-related changes in multi-finger interactions in adults during maximum voluntary finger force production tasks. *Human Movement Science*, 27(5), 714-727. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2008.04.005>
- Park, J., Wu, Y.-H., Lewis, M. M., Huang, X., & Latash, M. L. 2012. Changes in multifinger interaction and coordination in Parkinson's disease. *Journal of Neurophysiology*, 108(3), 915-924. <https://doi.org/10.1152/jn.00043.2012>
- Presazzi, A., Bortolotto, C., Zacchino, M., Madonia, L., & Draghi, F. 2011. Carpal tunnel: Normal anatomy, anatomical variants and ultrasound technique. *Journal of Ultrasound*, 14(1), 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.jus.2011.01.006>
- Reilly, K. T., & Schieber, M. H. 2003. Incomplete functional subdivision of the human multitendoned finger muscle flexor digitorum profundus: an electromyographic study. *Journal of Neurophysiology*, 90(4), 2560-2570. <https://doi.org/10.1152/jn.00287.2003>
- Sadnicka, A., Wiestler, T., Butler, K., Altenmuller, E., Edwards, M. J., Ejaz, N., & Diedrichsen, J. 2024. Boundaries of task-specificity: bimanual finger dexterity is reduced in musician's dystonia. *Scientific Reports*, 14(1), 15972-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65888-3>
- Schieber, M. H., & Santello, M. 2004. Hand function: peripheral and central constraints on performance. *Journal of Applied Physiology*, 96(6), 2293-2300. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01063.2003>
- Shapiro, L. M., Kamal, R. N., Management of Carpal Tunnel Syndrome Work Group, & American Academy of Orthopaedic Surgeons. 2025. American Academy of Orthopaedic Surgeons/ASSH Clinical Practice Guideline Summary Management of Carpal Tunnel Syndrome. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 33(7), e356-e366. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-24-01179>
- Shim, J. K., Oliveira, M. A., Hsu, J., Huang, J., Park, J., & Clark, J. E. 2007. Hand digit control in children: age-related changes in hand digit force interactions during maximum flexion and extension force production tasks. *Experimental Brain Research*, 176(2), 374-386. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0629-x>
- Slobounov, S., Chiang, H., Johnston, J., & Ray, W. 2002. Modulated cortical control of individual fingers in experienced musicians: an EEG study. *Clinical Neurophysiology*, 113(12), 2013-2024. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00298-5](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00298-5)
- Toesca, A., Pagnotta, A., Zumbo, A., & Sadun, R. 2008. Estrogen and progesterone receptors in carpal tunnel syndrome. *Cell Biology International*, 32(1), 75-79. <https://doi.org/10.1016/j.cellbi.2007.08.014>
- van Duinen, H., & Gandevia, S. C. 2011. Constraints for control of the human hand. *The Journal of Physiology*, 589(Pt 23), 5583-5593. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.217810>
- van Duinen, H., Gandevia, S. C., & Taylor, J. L. 2010. Voluntary activation of the different compartments of the flexor digitorum profundus. *Journal of Neurophysiology*, 104(6), 3213-3221. <https://doi.org/10.1152/jn.00470.2010>

- von Schroeder, H. P., & Botte, M. J. 1993. The functional significance of the long extensors and juncturae tendinum in finger extension. *The Journal of Hand Surgery*, 18(4), 641-647. [https://doi.org/10.1016/0363-5023\(93\)90309-Q](https://doi.org/10.1016/0363-5023(93)90309-Q)
- Walker, W. C., Metzler, M., Cifu, D. X., & Swartz, Z. 2000. Neutral wrist splinting in carpal tunnel syndrome: a comparison of night-only versus full-time wear instructions. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81(4), 424-429. <https://doi.org/10.1053/mr.2000.3856>
- Wiesman, I. M., Novak, C. B., Mackinnon, S. E., & Winograd, J. M. 2003. Sensitivity and specificity of clinical testing for carpal tunnel syndrome. *Canadian Journal of Plastic Surgery*, 11(2), 70-72. <https://doi.org/10.1177/229255030301100205>
- Zanette, G., Marani, S., & Tamburin, S. 2007. Proximal pain in patients with carpal tunnel syndrome: a clinical-neurophysiological study. *Journal of the Peripheral Nervous System*, 12(2), 91-97. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8027.2007.00127.x>
- Zatsiorsky, V. M., Li, Z. M., & Latash, M. L. 1998. Coordinated force production in multi-finger tasks: finger interaction and neural network modeling. *Biological Cybernetics*, 79(2), 139-150. <https://doi.org/10.1007/s004220050466>
- Zhang, W., Johnston, J. A., Ross, M. A., Coakley, B. J., Gleason, E. A., Dueck, A. C., & Santello, M. 2012. Effects of carpal tunnel syndrome on adaptation of multi-digit forces to object mass distribution for whole-hand manipulation. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 9, 83. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-83>