دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

طرح حرکت در عمل برخاستن از صندلی بر اساس تقسیم حرکت به زیرکارهای آن

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

محسن صادقی

استاد راهنما

دکتر مهران عمادی اندانی
دکتر عباس فتاح

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

طرح حرکت در عمل برخاستن از صندلی بر اساس تقسیم حرکت به زیرکارهای آن

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

محسن صادقی

استاد راهنما

دکتر مهران عمادی اندانی
دکتر عباس فتاح

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک آقای محسن صادقی

تحت عنوان

طرح حرکت در عمل برخاستن از صندلی بر اساس تقسیم حرکت به زیرکارهای آن

در تاریخ ۹۰/۱۲/۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- اساتید راهنمای پایان‌نامه	دکتر مهران عمادی اندانی
	دکتر عباس فتاح
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمد پرنیان‌پور
۳- استاد داور	دکتر محمد جعفر صدیق
۴- استاد داور	دکتر مصطفی غیور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد رضا سلیم‌پور

تشکر و قدردانی

پروردگار بلندمرتبه را سپاس‌گزارم که قله‌ای دیگر را بر من هموار ساخت، و نعمت کسب دانش را بر من ارزانی داشت.

پیش از هر چیز، مایلم از پدر و مادر عزیز و برادر بزرگوارم، به دلیل تمام محبت‌ها و حمایت‌های بی‌دریغشان، که برشمردن آنها در این مجال نمی‌گنجد تشکر و قدردانی نمایم. همچنین، بر خود لازم می‌دانم به دلیل زحمات بسیار و حمایت‌های بی‌شمار جناب آقای دکتر مهران عمادی اندانی، که نه تنها به عنوان یک راهنمای دلسوز، بلکه به عنوان یک همراه در طول مطالعات بنده را یاری نمودند، خالصانه تشکر کنم.

شایسته است از زحمات، دلگرمی‌ها و حمایت‌های اساتید بزرگوار، جناب آقای دکتر عباس فتاح و جناب آقای دکتر محمد پرنیان‌پور که کمک شایانی در جهت‌گیری و پیش‌برد مطالعات داشتند سپاس‌گزاری کنم.

از سرکار خانم دکتر فریبا بهرامی و جناب آقای دکتر مسعود مظاهری که امکان بهره‌گیری از داده‌های مورد نیاز و امکانات آزمایشگاهی را برای ما فراهم نمودند خالصانه تشکر می‌کنم.

در نهایت، لازم است از تمامی دوستان و همراهانی که حضور و پشت-گرمی آنها را در طول مسیر، همراه خود یافتم، قدردانی نمایم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدر، مادر و برادر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- سیستم حرکتی انسان از دیدگاه فیزیولوژی ۴
۱-۱-۱- سیستم حرکتی مرکزی ۴
۱-۱-۲- سیستم حرکتی محیطی ۹
۱-۲- تاریخچه و سابقه علمی ۱۰
۱-۲-۱- تحلیل ویژگی‌های حرکتی ۱۱
۱-۲-۲- مدل‌های ارائه شده جهت طرح حرکات انسان ۱۳
۱-۳- تعریف مسئله ۱۵
۱-۳-۱- حرکت برخاستن از صندلی ۱۶
۱-۴- اهمیت و کاربرد مسئله ۱۷
۱-۵- روند تدوین پایان‌نامه ۱۸
۱-۶- نوآوری‌ها و دست‌آوردهای پروژه ۱۹

فصل دوم: ارائه مدلی جدید به منظور طرح حرکت مبتنی بر بهینه‌سازی و بر اساس فازهای حرکتی

۲-۱- مقدمه ۲۱
۲-۲- شناسایی فازهای حرکتی به روش تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) ۲۳
۲-۲-۱- روش تحلیل مولفه‌های اصلی ۲۳
۲-۲-۲- ارائه روش جدیدی به منظور تفکیک فازهای حرکتی مبتنی بر PCA ۲۵
۲-۳- اجزای سازنده حرکت در هر فاز حرکتی ۲۸
۲-۳-۱- معرفی روشی جدید به منظور استخراج اجزای حرکتی با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی، و مبتنی بر فرض وجود فازهای حرکتی ۲۹
۲-۳-۲- اجزای حرکتی جرک کمینه با فرض وجود فازهای حرکتی ۳۳

۲-۴- ارائه مدل مبتنی بر بهینه‌سازی با توجه به مفهوم فازهای حرکتی به منظور طرح حرکت برخاستن از صندلی ۳۴
۲-۴-۱- مدل بیومکانیکی بدن و صندلی ۳۵
۲-۴-۲- توابع هدف و قیود بهینه‌سازی با توجه به فازهای حرکتی ۳۷
۲-۵- نتایج ۴۰
۲-۵-۱- حالت اول ۴۱
۲-۵-۲- حالت دوم ۴۲
۲-۵-۳- حالت سوم ۴۳
۲-۵-۴- حالت چهارم ۴۵
۲-۶- بحث و نتیجه‌گیری ۴۵

فصل سوم: مدل سلسله‌مراتبی و مدولار جهت توصیف طرح حرکت در سیستم اعصاب مرکزی

۳-۱- مقدمه ۵۰
۳-۲- ساختار مدل طراح مسیر سلسله‌مراتبی و مدولار (MHMP) ۵۳
۳-۲-۱- مدول‌های تخمین‌گر سینماتیک ۵۵
۳-۲-۲- مدول تخمین‌گر زمان ۵۶
۳-۲-۳- مدول تعیین مسئولیت ۵۷
۳-۲-۴- شبکه مبتنی بر اجزای حرکتی ۵۸
۳-۳- حرکت انتخابی ۵۸
۳-۴- فرآیند آموزش مدول‌ها ۵۹
۳-۴-۱- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۹
۳-۴-۲- داده‌های آموزشی ۶۱
۳-۵- نتایج ۶۴
۳-۵-۱- ارزیابی مدل تحت شرایط محیطی تجربه شده ۶۴
۳-۵-۲- ارزیابی مدل تحت شرایط محیطی جدید ۶۷
۳-۵-۳- تحلیل نتایج ۷۲
۳-۶- بحث و نتیجه‌گیری ۷۴
۳-۶-۱- عملکرد مدل ۷۴

۳-۶-۲- ساختار مدل سلسله‌مراتبی و مدولار پیشنهاد شده در این مطالعه ۷۶

فصل چهارم: مطالعات آزمایشگاهی و اعتبارسنجی ساختار سلسله مراتبی و مدولار ارائه شده بر اساس داده‌های تجربی

۴-۱- مقدمه ۸۰

۴-۲- آزمایشگاه ثبت حرکت ۸۱

۴-۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی ۸۲

۴-۲-۲- قواعد و قراردادها ۸۳

۴-۳- تحلیل داده‌ها ۸۶

۴-۴- ارزیابی ساختار مدولار بر اساس داده‌های تجربی ۸۹

۴-۴-۱- برخاستن از صندلی به ازای ارتفاع‌های متفاوت ۹۰

۴-۴-۲- برخاستن از صندلی به ازای سطوح اتکاء متفاوت ۹۳

۴-۵- بحث و نتیجه‌گیری ۹۳

فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادها

۵-۱- جمع‌بندی ۹۸

۵-۲- کارهای آینده و افق‌های پیش رو ۱۰۱

پیوست‌ها

پیوست الف ۱۰۶

پیوست ب ۱۰۷

پیوست ج ۱۰۹

مراجع ۱۱۱

چکیده

در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی عملکرد سیستم اعصاب مرکزی در طرح و کنترل حرکات، توجه و علاقه بسیاری از محققین در عرصه علوم اعصاب و مهندسی پزشکی را به خود جلب کرده است. شناخت رفتار سیستم اعصاب مرکزی و راهبردهای اتخاذ شده توسط آن در تولید حرکت، می‌تواند نقش موثری در بهبود روش‌های توان‌بخشی و شناخت اختلالات حرکتی ایفا کند. بر این اساس و در مطالعه حاضر، مدلی محاسباتی جهت توصیف عملکرد سیستم اعصاب در طرح حرکت برخاستن از صندلی، به عنوان یک حرکت چالش برانگیز، ارائه شده است. در اولین قدم، این فرضیه مطرح است که سیستم اعصاب مرکزی در طرح حرکات پیچیده، آنها را به حرکات ساده‌تر (فازهای حرکتی) تفکیک می‌کند. با توجه به این فرضیه و بر اساس رویکردی نوین، پایه‌های سازنده حرکت در هر فاز حرکتی از درون داده‌های ثبت شده آزمایشگاهی استخراج شده، و با الگوهای جرک کمینه مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس شواهد، به نظر می‌رسد سیستم اعصاب مرکزی در هر فاز حرکتی سیاست جرک کمینه را در نظر می‌گیرد. همچنین، با ارائه یک مدل مبتنی بر بهینه‌سازی بر اساس یک ساختار جدید، نشان داده شد که بر خلاف روش‌های پیشین، در نظر گرفتن توابع هدف متمایز و متناسب با هر فاز حرکتی، روش مناسب‌تری جهت توصیف حرکات پیچیده همچون بر خاستن از صندلی است. گویی که سیستم اعصاب مرکزی در هر فاز حرکتی، راهبرد متناسب با همان فاز را اتخاذ می‌کند. با این وجود، مدل‌های مبتنی بر بهینه‌سازی به دلیل محدودیت‌هایی از قبیل حجم محاسباتی بالا، در بیان برخی از جنبه‌های طرح حرکت در سیستم اعصاب ناتوان هستند. قابلیت این سیستم در طرح گستره وسیعی از حرکات در همان تلاش اول، نشان می‌دهد که نیازی به درگیر شدن در یک فرآیند بهینه‌سازی برای تولید هر حرکت وجود ندارد. از این رو، در مرحله دیگری از مطالعه حاضر، یک ساختار مدولار و سلسله‌مراتبی جهت توصیف عملکرد سیستم اعصاب در طرح حرکات چند فازی تحت شرایط متعدد ارائه شده است. این ساختار که از چهار بخش عملکردی با عنوان مدول‌های تخمین‌گر سینماتیک، مدول تخمین‌گر زمان، مدول تعیین مسئولیت و شبکه مبتنی بر اجزای حرکتی تشکیل شده است، این قابلیت را دارد که با استفاده از تجربیات گذشته، حرکت را در شرایط محیطی جدید طرح نماید. ارزیابی ساختار ارائه شده در دو مرحله صورت گرفته است؛ با استفاده از مدل مبتنی بر بهینه‌سازی و با استفاده از حرکات ثبت شده در آزمایشگاه. نتایج نشان می‌دهد که تجزیه حرکت به فازهای حرکتی و استفاده از یک ساختار مدولار، می‌تواند قابلیت طرح حرکت به صورت بلادرنگ، بهینه و تحت شرایط محیطی مختلف را فراهم سازد. دقت بالای مدل در مقایسه با مدل‌های دیگر، نیاز محاسباتی اندک به همراه شواهد رفتاری و نوروفیزیولوژیکی فراوان در حمایت از ساختار مدل، بیان‌گر آن است که سیستم اعصاب مرکزی، به احتمال فراوان از یک ساختار مدولار و سلسله‌مراتبی در طرح حرکات بهره می‌گیرد. از این رو، مفاهیم مهم ارائه شده در این مطالعه همچون تفکیک فازهای حرکتی، در نظر گرفتن توابع هدف متفاوت برای هر فاز حرکتی و ساختار طراح مسیر مدولار و سلسله‌مراتبی، می‌توانند در طراحی ربات‌های انسان‌نما و یا در کاربردهای دیگر رباتیکی مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی:

طرح حرکت، مدل مبتنی بر بهینه‌سازی، برخاستن از صندلی، تفکیک فازهای حرکتی، ساختار مدولار و سلسله-مراتبی.

فصل اول

مقدمه

پدیده‌های شگفت‌انگیز طبیعی اغلب الهام‌بخش ایده‌ها، اکتشافات و اختراعات متعددی توسط دانشمندان بوده‌اند. در این میان، شناخت انسان به عنوان یک موجود پیچیده و با ابعاد وجودی متعدد بیش از هر موضوع دیگری در محوریت مطالعات بشر قرار داشته‌است. شاخه‌های پرتعداد در علوم پزشکی و روان‌پزشکی حاکی از آن است که در هر جزء از وجود انسان، دانسته‌ها و ندانسته‌های بیشماری وجود دارد. در این میان و در سال‌های اخیر، مهندسین نیز بیش از هر زمان به مطالعه ابعاد مختلف انسان علاقه نشان می‌دهند، که این امر باعث متولد شدن شاخه جدیدی از علم به نام مهندسی پزشکی شده‌است. ورود مهندسین به این عرصه، نه‌تنها به الهام‌گیری از طبیعت در تحلیل مسائل مهندسی، که به شناخت بهتر طبیعت از دریچه قوانین مهندسی منجر شده است. ارائه مدل‌های مبتنی بر ریاضیات برای توصیف سیستم‌های بیولوژیکی باعث شده تا این سیستم‌های پیچیده، تا حدودی قابل شناخت و درک باشند. در این بین، ویژگی انسان در تولید حرکت، توجه مهندسین رباتیک و مکانیک را به خود جلب کرده‌است. حرکات انسان، هرچند به ظاهر ساده و ابتدایی، اما در قالب مدل‌های محاسباتی بسیار چالش برانگیزند، به‌طوری که دانشمندان، هنوز موفق نشده‌اند حرکت راه رفتن را (که در مقایسه با حرکات ارادی غیر متناوب، سطوح پایین‌تری از سیستم اعصاب مرکزی را درگیر می‌کنند) به خوبیِ انسان و در شرایط متعدد تولید کنند. وجود درجات آزادی بالا در اندام‌های حرکتی انسان، او را قادر می‌سازد تا در شرایط متفاوت و تحت قیود متعدد، حرکت را با موفقیت به انجام برساند. یکی از پیچیدگی‌های سیستم حرکتی انسان، چگونگی انتخاب تعداد و نوع درجات آزادی متناسب با هر عمل است.

از دیگر سو، هر یک از درجات آزادی در سیستم حرکتی انسان، توسط تعداد زیادی از عملگرها (عضلات) کنترل می‌شود. انتخاب عضلات و تعیین نیروی لازم برای هر کدام نیز از جمله چالش‌هایی است که بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. از دیگر قابلیت‌های مهم در سیستم حرکتی، می‌توان به یادگیری و استفاده از حافظه حرکتی در کسب حرکات ماهرانه اشاره کرد. انسان قادر است با تمرین و تکرار، حرکاتی تولید کند که انرژی، خستگی و زمان کمتری را طلب کند و با بیشترین دقت انجام پذیرد. این حرکات را حرکات ماهرانه می‌نامند. در انجام اینگونه حرکات، تعامل بخش‌های مختلف سیستم و همچنین تعامل سیستم با محیط، از پارامترهای کلیدی به شمار می‌روند که چگونگی تحقق آن همچنان ناشناخته مانده است.

در طول ۲۰ سال گذشته، شاخه نوینی از دانش، تحت عنوان "علم کنترل حرکت[۱]" معرفی و توسعه داده شد. هدف اصلی محققین در این زمینه پژوهشی آن است که بدانند سیستم اعصاب مرکزی[۲] چگونه با بدن و محیط اطراف خود تعامل برقرار می‌کند تا بتواند حرکاتی هماهنگ و هدف‌دار تولید نماید. در حقیقت، تمام حرکات ارادی انسان انعکاسی از فعالیت سیستم اعصاب مرکزی هستند، و طبیعتا می‌توانند ما را در شناخت این سیستم یاری دهند. در این شاخه پژوهشی، حرکات انسان در آزمایشگاه‌های متعدد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته، ویژگی‌های حرکتی وی شناسایی شده و در نهایت مدلی محاسباتی جهت بیان این ویژگی‌ها ارائه می‌شود. از این رو، نیاز است تا مجموعه علومی همچون نوروفیزیولوژی[۳]، حرکت شناسی[۴]، روان‌شناسی[۵]، بیومکانیک، مدل‌سازی محاسباتی[۶] و فیزیک به کار گرفته شوند تا بتوان تحلیل جامعی از جنبه‌های متعدد حرکت انسان ارائه داد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در علم کنترل حرکت، کاربردهای فراوانی در شناخت نقص‌های حرکتی و ارائه روش‌های موثر در توانبخشی بیماران حرکتی دارد. همچنین، می‌توان این شاخه تحقیقاتی را پلی میان علم رباتیک و علوم توانبخشی در نظر گرفت، و از نتایج آن در طراحی و ساخت ربات‌های انسان نما و ربات‌های توانبخشی بهره جست.

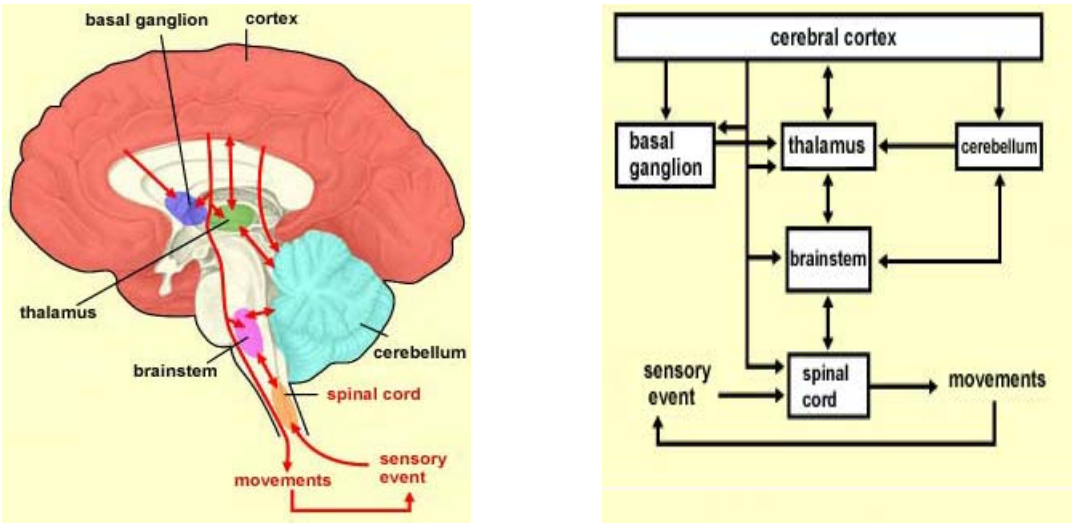
همان‌طور که اشاره شد، هدف اصلی درعلم کنترل حرکت، شناسایی قابلیت‌ها و ویژگی‌های سیستم اعصاب مرکزی در تولید حرکات است. در این گزارش، ما نیز قصد داریم تا جنبه‌هایی از قابلیت سیستم اعصاب را در طراحی مسیر حرکات، در حد توان مورد مطالعه قرار دهیم. البته، توجه به این نکته نیز ضروری است که پیچیدگی-های فراوان این سیستم رمزآلود، اجازه اظهار نظر قطعی را در مورد قواعد حاکم بر آن به محققین نمی‌دهد. جهت آشنایی بیشتر با این سیستم، در ابتدا لازم است مروری بر آناتومی و فیزیولوژی سیستم حرکتی انسان داشته باشیم.

---

[1] Motor Control
[2] Central Nervous System
[3] Neurophysiology
[4] Kinesiology
[5] Psychology
[6] Computational Modeling

۱-۱- سیستم حرکتی انسان از دیدگاه فیزیولوژی

در این بخش، به معرفی اجزای مختلف سیستم حرکتی از دیدگاه فیزیولوژیکی می‌پردازیم. سیستم حرکتی انسان متشکل از دو بخش مهم است: قسمت مرکزی و قسمت محیطی. سیستم حرکتی محیطی شامل عضلات و رشته اعصاب حرکتی (وابران[۱]) و حسی (آوران[۲]) می‌باشد که به‌طور عمده فرمان‌های حرکتی صادر شده در سیستم اعصاب مرکزی را به اجرا در می‌آورد. سیستم حرکتی مرکزی در درون سیستم اعصاب مرکزی جای دارد که شامل قسمتی از قشر حرکتی[۳]، عقده‌های قاعده‌ای[۴]، ساقه مغز[۵]، مخچه[۶] و نخاع[۷] می‌باشد. در شکل (۱-۱)، نمایی از اجزای سیستم حرکتی مرکزی و ارتباط آن‌ها نشان داده شده‌است. در ادامه، هر یک از بخش‌های مذکور را به اختصار شرح می‌دهیم.



شکل ۱-۱ : نمایی از اجزای مختلف سیستم حرکتی مرکزی و ارتباط آن‌ها [۱]

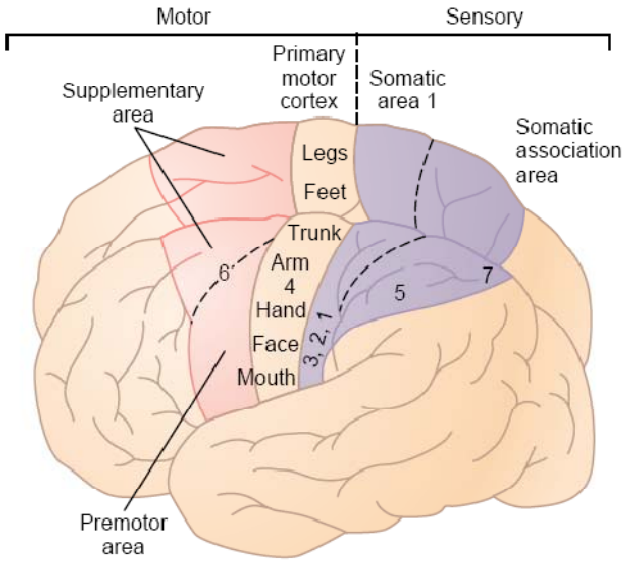
۱-۱-۱- سیستم حرکتی مرکزی

به نظر می‌رسد تولید حرکت توسط مهره‌داران، پیش از آنکه به مرحله اجرا برسد، ابتدا طراحی و برنامه‌ریزی می‌شود [۲]. شواهد نشان می‌دهد، سیستم اعصاب مرکزی که شامل بخش‌های مختلف مغز و نخاع است، وظایف مهمی از جمله یادگیری حرکت، طراحی حرکت، تخمین نتایج حاصل از حرکت طرح شده، محاسبات مربوط به دینامیک

[1] Efferent
[2] Afferent
[3] Motor Cortex
[4] Basal Ganglia
[5] Brain Stem
[6] Cerebellum
[7] Spinal Cord

بدن و محیط، کنترل حرکات و وظایفی از این قبیل را بر عهده دارد [۲]. در این بخش، مختصری از وظایف برخی از اجزای سیستم اعصاب مرکزی را که در تولید حرکات نقش دارند، شرح می‌دهیم.

الف- قشر حرکتی: قشر حرکتی به سه بخش اصلی ناحیه پیش‌حرکتی[1]، قشر حرکتی اولیه[2] و ناحیه حرکتی تکمیلی[3] تقسیم می‌شود. شکل(۱-۲) این نواحی را نشان می‌دهد.



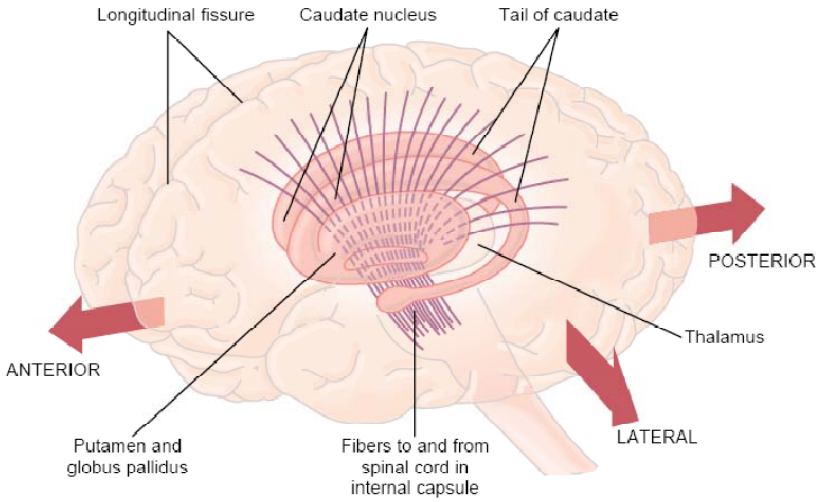
شکل ۱-۲: بخش‌های حسی و حرکتی قشر مخ. در قشر حرکتی، سه ناحیه قشر حرکتی اولیه، ناحیه پیش‌حرکتی و کمک حرکتی نشان داده شده‌اند [۳].

در ناحیه پیش‌حرکتی، ابتدا طرحی از حرکت اندام‌ها در حین انجام حرکت تهیه شده، و سپس یک الگوی اولیه از فعالیت عضلات جهت تحقق طرح آماده می‌گردد [۳]. الگوی به دست آمده در اختیار قشر حرکتی اولیه قرار می‌گیرد. قسمت اعظم قشر حرکتی اولیه مسئولیت کنترل عضلات دست و زبان را بر عهده دارد [۳]. در این بخش، با توجه به خروجی ناحیه پیش‌حرکتی، دسته‌ای از فرمان‌های حرکتی متناسب با حرکت مورد نظر، جهت ارسال به عضلات آماده می‌شود. به نظر می‌رسد وظیفه انتخاب نوع و تعداد عضلات مورد نیاز جهت اجرای حرکت نیز بر عهده قشر حرکتی اولیه باشد [۳]. نهایتا، ناحیه حرکتی تکمیلی که ارتباط تنگاتنگی با ناحیه پیش‌حرکتی دارد، در تولید حرکات تمام بدنی و کنترل حرکت سر و چشم مشارکت می‌کند [۳].

ب- عقده‌های قاعده‌ای: یکی از مهمترین بخش‌های سیستم حرکتی مرکزی، عقده‌های قاعده‌ای هستند که تقریبا

[1] Premotor Area
[2] Primary Motor Cortex
[3] Supplementary Motor Area

تمامی رشته‌های حسی و حرکتی بین قشر حرکتی و نخاع، از این ناحیه عبور می‌کنند. عقده‌های قاعده‌ای در هسته مرکزی مغز قرار دارند (شکل ۱-۳) و نقش مهمی در کنترل حرکات ایفا می‌کنند. از جمله فعالیت‌های این بخش می‌توان به کنترل حرکات ماهرانه‌ای که به صورت ناخودآگاه درآمده‌اند اشاره کرد [۳]. به عنوان مثال، زمانی که متنی را می‌نویسیم، کلیه حرکات دست در حین نوشتن توسط عقده‌های قاعده‌ای کنترل می‌شود. از این رو، اگر کسی با آسیب‌های جدی در این ناحیه مواجه باشد، دیگر قادر به تولید اشکال حروف الفبا نخواهد بود [۳].

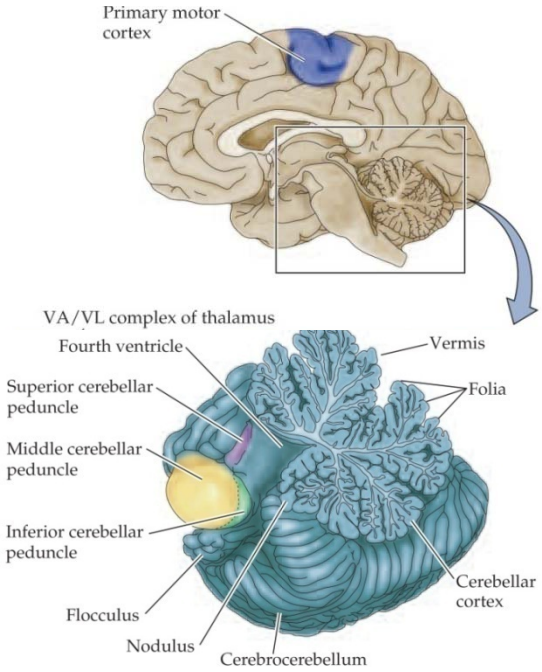


شکل ۱-۳: عقده‌های قاعده‌ای در هسته مرکزی مغز (ناحیه پر رنگ) که ارتباط تنگاتنگی با قشر مخ و نخاع دارد [۳].

از دیگر فعالیت‌های عقده‌های قاعده‌ای می‌توان به تنظیم حرکات پی‌درپی و اولویت‌بندی مجموعه‌ای از الگوهای حرکتی جهت رسیدن به یک هدف پیچیده اشاره نمود [۴]. همچنین، زمان‌بندی حرکات و تعیین سرعت انجام آنها نیز از جمله فعالیت‌های این بخش به شمار می‌رود. در حقیقت، در این ناحیه، تخمینی از زمان مورد نیاز جهت انجام حرکت به دست آمده و در اختیار بخش طراحی مسیر قرار می‌گیرد.

پ- ساقه مغز: این بخش، از یک سو به نخاع و از سوی دیگر به بخش زیرین مغز ارتباط دارد. فعالیت‌هایی از جمله کنترل تنفس، کنترل سیستم قلبی عروقی، کنترل حرکات تقلیدی، حفظ تعادل و کنترل حرکات چشم در این ناحیه صورت می‌پذیرد. همچنین، این بخش به عنوان راه‌گاهی برای عبور فرمان‌های حرکتی از قشر مخ به نخاع عمل می‌نماید [۳].

ت- مخچه: مخچه تشکیل شده از دو نیم‌کره کوچک در پسِ سر که در کنترل موقعیت (تعادل) و حرکات ارادی نقش موثری دارد. در حالت کلی می‌توان گفت که مخچه در کاهش تغییرات زمان‌بندی و نیروی عضلات مشارکت می‌کند [۲]. شکل(۱-۴) نمایی از مخچه و ساقه مغز را نشان می‌دهد.



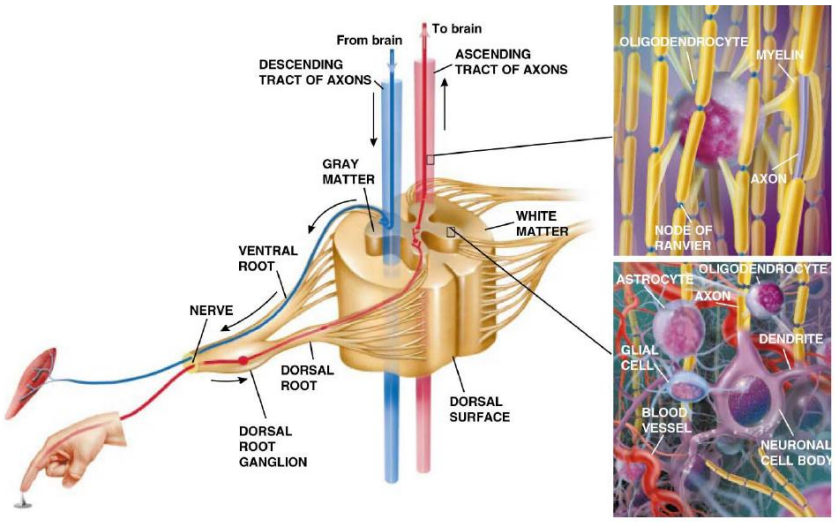
شکل ۱-۴ : نمایی جانبی از مخچه و ساقه مغز [۵]

یکی از قابلیت‌های شگفت‌انگیز سیستم اعصاب مرکزی این است که می‌تواند نتایج حاصل از فرمان‌های حرکتی خود را قبل از آنکه به مرحله اجرا برسند، تخمین بزند [۲]. در واقع زمانی که حرکتی طراحی می‌شود و فرمان‌های متناظر آن جهت ارسال به عضلات آماده می‌گردد، سیستم اعصاب می‌تواند مقدار نیروی عضلات را در ازای فرمان-های به‌دست آمده محاسبه کرده و با مقادیر دریافتی از حس‌گرهای موجود در عضلات، مقایسه نماید. بر این اساس، بسیاری از محققین عقیده دارند که سیستم اعصاب مرکزی، از مدل‌های داخلی همچون دینامیک معکوس بهره می-گیرد [۲]. گامی و شیدارا (۱۹۸۱)، شواهد فیزیولوژیکی ارائه کردند که احتمالا محاسبات مربوط به دینامیک معکوس، در مخچه صورت می‌گیرد [۶]. بر اساس این نتیجه و مطالعات تصویرگری فعالیت مغز و همچنین مشاهده تطبیق و یادگیری در مخچه، کاواتو (۱۹۹۹) اعلام کرد که مخچه مکان اصلی مدل‌های داخلی به شمار می‌رود [۷].

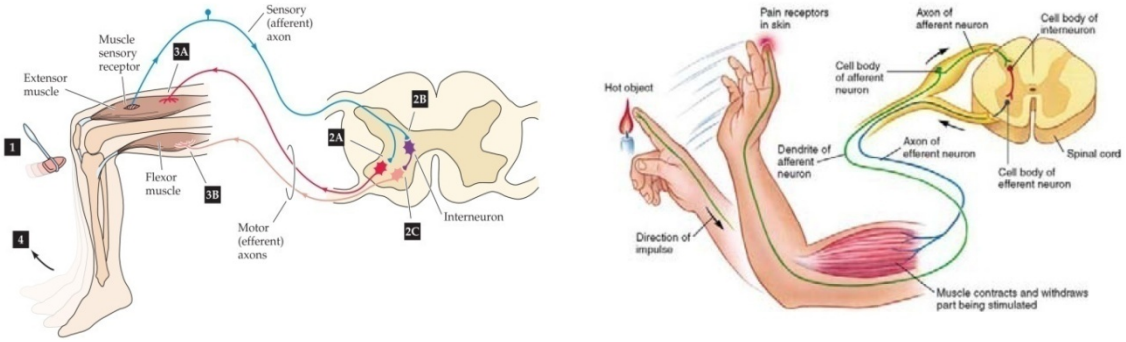
ث- نخاع: در حالت کلی می‌توان نخاع را به عنوان واسطه‌ای بین سیستم حرکتی محیطی (شامل سیستم اسکلتی عضلانی) و سطوح بالای سیستم اعصاب مرکزی دانست. نخاع دارای نورون‌هایی است که فرمان‌های حرکتی صادره را به عضلات ابلاغ می‌کنند. این نورون‌ها که به اعصاب حرکتی (یا اعصاب وابران) معروفند، به واسطه واکنش‌های شیمیایی، عضله را به تغییر طول و یا تولید نیروی مطلوب وادار می‌سازند. همچنین دسته دیگری از نورون‌ها به نام اعصاب حسی (یا آوران)، تغییرات محیطی و حتی داخلی را سیگنال کرده و از طریق راه‌گاه‌های موجود در نخاع، به سطوح بالاتر ارسال می‌کنند [۲]. شکل(۱-۵)، نمایی از عملکرد نخاع را نشان می‌دهد.

گاهی نخاع، فراتر از یک انتقال‌دهنده فرمان ظاهر می‌شود و خود، مستقیما در تولید حرکات دخالت می‌کند. در

واقع، در دسته خاصی از حرکات که به حرکات رفلکسی معروفند، به‌جای آنکه اطلاعات حاصل از اعصاب حسی به سطوح بالای مغز منتقل شوند، در همان نخاع پردازش شده و عکس‌العمل مناسب تعیین می‌شود [۵]. در این میان می‌توان به رفلکس‌های کششی دست و یا زانو اشاره کرد (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۵: بخشی از نخاع که در ارسال فرمان‌های حرکتی و دریافت سیگنال‌های حسی نقش دارد [۲].



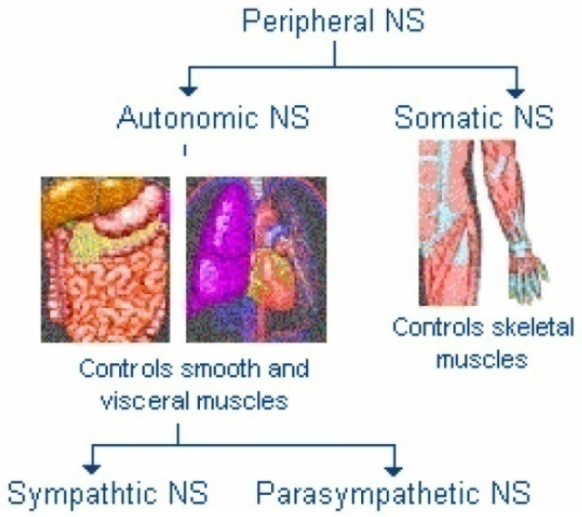
شکل ۱-۶: حرکات رفلکسی کشیدنی بازو (سمت راست) و زانو (سمت چپ) که توسط نخاع تولید می‌شوند [۵]

اجزای بسیار دیگری نیز وجود دارند که در طراحی، برنامه‌ریزی و کنترل حرکت در سطوح بالای سیستم اعصاب مرکزی نقش دارند. در این خصوص می‌توان به سیستم‌های مشبک نخاعی[1]، آوران‌های دهلیزی[2] و یا هسته قرمز[3] اشاره کرد [۳]. امروزه با استفاده از امکانات تصویرگری، نقش برخی از این اجزا تا حدودی مشخص شده است، اما پیچیدگی ساختار آنها و ارتباط خاصی که با دیگر اجزا دارند، کماکان موضوع تحقیق و پژوهش است.

[1] Reticulospinal system
[2] Vestibular
[3] Red Nucleus

۱-۱-۲- سیستم حرکتی محیطی

سیستم حرکتی محیطی را می‌توان در دو بخش اعصاب خودمختار و اعصاب بدنی[1] بررسی کرد (شکل۱-۷). اعصاب خودمختار، اغلب ارگان‌های داخلی بدن که حرکاتی غیر ارادی دارند را کنترل می‌کنند. قلب، ریه‌ها و دستگاه گوارش از جمله ارگان‌هایی هستند که توسط سیستم اعصاب خودمختار کنترل می‌شوند. سیستم اعصاب بدنی، سلسله اعصاب و عضلاتی هستند که در اجرای حرکات ارادی نقش دارند. می‌توان عضلات را به عنوان محرک‌های[2] سیستم اسکلتی بدن نامید. تفاوت‌های عمده‌ای بین محرک‌های مکانیکی یا الکتریکی و محرک‌های بیولوژیکی (عضلات) وجود دارد. نیروی تولید شده توسط عضلات، به طول عضله و سرعت تغییر طول آن وابسته است [۲].



شکل ۱-۷: سیستم حرکتی محیطی شامل اعصاب و عضلات بدنی (سمت راست) و اعصاب خودمختار (سمت چپ)

یکی دیگر از ویژگی‌های عضلات به عنوان تولیدکننده نیرو، آن است که عضلات دارای خاصیت فنری هستند و علاوه بر نیروهای فعال[3]، نیروهای منفعل[4] نیز تولید می‌کنند. همین امر باعث می‌شود تا طول عضلات در نیروی تولیدی موثر باشد. عضلات، به واسطه فعل و انفعالات شیمیایی که در آنها رخ می‌دهد، مولدهای کندی به شمار می‌روند. هر عضله از تعداد بیشماری رشته‌های پروتئینی تشکیل شده است که به صورت شبکه‌های زنبوری شکل دسته‌بندی شده‌اند. شکل(۱-۸) نحوه کنار هم قرار گرفتن این رشته‌ها را نشان می‌دهد. رشته‌های عضلانی به دو نوع رشته-

[1] Somatic
[2] Actuators
[3] Active
[4] Passive