

# طراحی مفهومی دستگاه توان‌سنجی سه‌محوره عضلات کمر در حالت ایزومتریک

محمودرضا آذغانی<sup>۱\*</sup>؛ فرزاد فرهمند<sup>۲</sup>؛ علی مقداری<sup>۳</sup>؛ فراس حکاک<sup>۴</sup>؛ محمد پرنیانپور<sup>۵</sup>

## چکیده

درک بهتر نقش بیومکانیکی اجزاء مختلف سامانه اسکلتی عضلانی عصبی تنه می‌تواند به انتخاب راهکارهای مناسب برای پیشگیری از بروز کمردرد و نیز پیشنهاد تمرین‌های مناسب برای بهبود آن منجر شود. مطالعات آزمایشگاهی که با استفاده از دستگاه‌های توانسنجی، گشتاور حاصل از فعالیت عضلات تنه را به ازاء سطوح مختلف شدت فعالیت عضلات اندازه‌گیری می‌کنند، مهمترین منابع برای درک بهتر بیومکانیک تنه و اجزاء آن محسوب می‌شوند. در این مطالعه طراحی یک نمونه جدید از دستگاه توانسنجی عضلات کمر، بر مبنای کمترین خیز تحت بارهای وارده، رعایت تنگناهای ناشی از ابعاد بدنی جامعه مورد مطالعه و ملاحظات خاص اندازه‌گیری ارائه می‌گردد که با استفاده از حسگرهای تک‌محوره و چیدمان مناسبی از بندها و مفاصل، اندازه‌گیری دقیق سه بعدی گشتاورهای کمر را در وضعیت‌های استقرار مختلف بدنی به دور محورهای آناتومیک امکان‌پذیر می‌کند. از دیگر ویژگی‌های طرح حاضر می‌توان به تقارب محورهای مفاصل، پایداری بالا، امکان موقعیت‌دهی تنه در دامنه‌ای وسیع از ترکیب زوایا در هر سه محور آناتومیک، و امکان قرارگیری اندامهای تحتانی در حالت‌های نشسته و ایستاده اشاره نمود.

**کلمات کلیدی:** طراحی مفهومی، توانسنجی، عضلات تنه، حالت ایزومتریک

## *Conceptual Design of an Apparatus for Tri-axial Measurement of Lumbar Torques in Isometric Mode*

M.R. Azghani, F. Farahmand, A. Meghdari, F. Hakkak, M. Parnianpour

### ABSTRACT

Understanding the role and significance of the different components of the trunk neuro-musculo-skeletal system is of great importance for development of proper preventive and curative measures for low back pain. The experimental investigations, using lumbar moment measurement devices, are considered the most useful sources of information for detail understanding of the biomechanics of trunk and its components. This paper describes the conceptual design of a new lumbar moment measurement system, based on minimum deflection, anthropometric characteristics, and measurement considerations. The system is capable to measure the 3-D trunk moments using uni-directional torque sensors within a proper configuration of links and joints. Some other features of the system include convergence of its joints, high stability, and ability to adapt to a wide range of anatomical postures in standing and sitting positions.

**KEY WORDS:** Conceptual design; Lumbar moments, Isometric, measurement

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۷/۵

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۶/۲۵

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف: Email: m\_azghani@mech.sharif.edu

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف: Email: farahmand@sharif.edu

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف: Email: meghdari@sharif.edu

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف: Email: f\_hakkak@yahoo.com

<sup>۵</sup> استادمعین دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف: Email: parnianpour@sharif.edu



دستگاه مورد توجه قرار گیرند تبیین شوند. مهمترین این ملاحظات عبارتند از:

- دستگاه باید توانایی تحمل گشتاورهای حداکثر کمر با تغییر شکل ناچیز باشد. مقادیر حداکثر گشتاورهای کمر در سه محور برای صدک نودوپنج بزرگسالان در جدول ۱ نشان داده شده است [۳] - [۶].

جدول ۱- حداکثر گشتاورهای کمر در سه محور حول مفصل کمری- خاجی برای صدک ۹۵ افراد سالم در حالت ایزومتریک (نیوتن-متر)

مرجع	جنس	خمش به جلو	خمش به عقب	خمش به راست	خمش به چپ	چرخش به راست	چرخش به چپ
[۳]	مرد	--	۳۳۵	--	--	--	--
[۴]	مرد	۲۸۹	۲۷۶	۲۲۵	۲۲۳	۱۵۱	۱۵۰
[۵]	مرد	۱۴۹	۲۱۰	۱۵۱	۱۴۳	--	--
	زن	۸۷	۱۱۷	۸۰	۷۸	--	--
[۶]	مرد	۱۵۹	۲۱۵	۱۶۹	۱۷۳	۹۲	۸۳
	زن	۶۶	۱۱۸	۸۴	۹۳	۵۴	۴۷

- دستگاه باید از دامنه حرکتی کافی برای تامین محدوده حرکات طبیعی کمر در فعالیت های بدنی روزمره برخوردار باشد. دامنه حرکتی بخش کمری ستون فقرات برای خمش به جلو و عقب به ترتیب معادل ۶۰ و ۲۵ درجه و برای خمش به راست/چپ و چرخش به راست/چپ به ترتیب ۲۵ و ۳۰ درجه گزارش شده اند [۱۲].

- ابعاد دستگاه باید بر اساس داده‌های آنتروپومتری جامعه آماری هدف انتخاب گردد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری گشتاورهای کمر در طیف وسیعی از جامعه مورد نظر است، مناسب است که ابعاد بدنی ۹۰٪ میانی جمعیت بزرگسالان (از صدک پنجم تا صدک نود و پنجم) مورد توجه قرار گیرند. همچنین دستگاه باید از امکان قراردادی فرد مورد آزمایش در کلیه حالات ایستاده، نیمه‌نشسته، و نشسته و نیز امکان تنظیم ارتفاع برای افراد مختلف (کفی و پستی) برخوردار باشد [۱۳].

- با توجه به ماهیت دستگاه و لزوم کنترل خطاهای اندازه‌گیری، طراحی باید بر اساس کمترین خیز و انعطاف اجزاء تحت بارهای وارده و نویزهای محیطی صورت گیرد. به منظور افزایش صلبیت دستگاه باید آرایش مناسبی از مفاصل و بندها انتخاب شده و از مفاصل فراوان و بندهای طولانی تا حد امکان پرهیز گردد. همچنین فرکانس طبیعی دستگاه باید تا حد امکان بالا باشد تا اثر نویزهای دینامیکی کاهش یابد.

- همزمان با بالا بودن صلبیت، ممان اینرسی بخش متحرک دستگاه باید تا حد امکان پایین باشد تا برای کار در حالت‌های کاری دینامیکی، کمترین مقاومت را در مقابل حرکت بدن ایجاد نماید.

هم اکنون کمردرد یکی از شایع‌ترین عوارض اسکلتی-عضلانی است که اکثر مردم در طول عمر خود به آن دچار می‌شوند. اغلب محققان کمردرد را ناشی از اعمال بارهای بیش از حد مجاز به بافت‌های نرم می‌دانند که این خود از ناکافی بودن استحکام و پایداری سامانه اسکلتی-عضلانی ستون مهره‌ها نتیجه می‌شود. درک بهتر نقش اجزاء مختلف سامانه اسکلتی-عضلانی عصبی تنه در تأمین پایداری و تحمل بار می‌تواند به انتخاب راهکارهای مناسب به منظور پیشگیری از بروز کمردرد و نیز ارائه تمرین‌های مناسب برای بهبود آن منجر شود [۱۰ و ۱۱]. مطالعات آزمایشگاهی که بیشتر با استفاده از دستگاه‌های توانسنجی به اندازه‌گیری گشتاور حاصل از فعالیت عضلات تنه می‌پردازند، همواره مهمترین و معتبرترین منبع شناخت بیومکانیک کمر بوده‌اند [۳ و ۴ و ۵ و ۶]. تا کنون نمونه‌های زیادی از دستگاه‌های سنجش گشتاورهای کمر ارایه شده اند که در اغلب آنها اندازه گیری تنها بصورت تک محوره انجام می‌شود. از دستگاه‌های دو یا سه محوره می‌توان به دستگاه‌های ویلیام ماراس [۸ و ۷]، دستگاه ایزواستیشن B۲۰۰ [۹ و ۱۰] و دستگاه LIST ۲۰۰۴ [۱۱] اشاره نمود. بررسی‌های تفصیلی [۹] - [۱۱] نشان داده اند که کلیه دستگاه‌های سنجش سه محوره گشتاورهای کمر که تاکنون ارائه شده‌اند دچار مشکلاتی اند که اعتبار نتایج آنها را مورد تردید قرار می‌دهد. از مهمترین این مشکلات می‌توان به مواردی نظیر نداشتن تقارب محورهای اندازه‌گیری، لقی مفاصل در حالت اندازه‌گیری ایزومتریک، محدودیت وضعیت استقرار به حالت ایستاده قائم، و بروز خطاهای ناشی از پایین بودن فرکانس طبیعی و وارد شدن بارهای ترکیبی به سنسورها اشاره نمود.

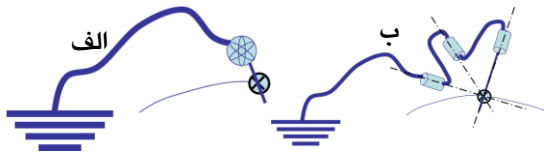
با توجه به ملاحظات یادشده هدف از این مطالعه، طراحی یک دستگاه سه‌محوره اندازه‌گیری گشتاورهای کمر بوده است که ضمن قابلیت کاربرد راحت و ایمن در وضعیت های استقرار مختلف در حالت‌های ایستاده و نشسته، از صلبیت و پایداری لازم برای اندازه گیری دقیق گشتاورها در حالت فعالیت ایزومتریک عضلات برخوردار باشد و بتواند با آرایش مناسب بندها و مفاصل، نتایج را دور محورهای متقارب آناتومیک، منطبق بر استانداردهای پذیرفته شده بالینی، ارایه نماید.

## ۲- روش

### ۲-۱- ملاحظات طراحی

پیش از هر چیز لازم است ملاحظاتی که باید در طراحی

دوران حول دیسک کمربندی خارجی (بعنوان مرکز دوران ثابت قفسه سینه) در نظر گرفت. با این فرض، حرکت بالاتنه معادل حرکت یک جسم صلب حول یک مفصل گوی و کاسه و تنها شامل سه درجه آزادی دورانی خواهد بود.



شکل ۱- الف) طرحواره بازوی ۶ درجه آزادی (ب) طرحواره روبات سه درجه آزادی با امتداد مفاصل همسر

بنابراین در صورتی که سازوکار موقعیت‌دهی دستگاه بگونه‌ای طراحی شود که موقعیت پایه آن بر مفصل کمربندی خارجی منطبق گردد، تنها به سه درجه آزادی نیاز خواهد داشت. روشن است که بدلیل تداخل دستگاه با بدن فرد امکان قرار گرفتن پایه در موقعیت مزبور بصورت فیزیکی وجود ندارد اما می‌توان طراحی را بگونه‌ای انجام داد که محورهای امتدادیافته مفاصل سازوکار موقعیت‌دهی از مفصل کمربندی خارجی فرد آزمونی عبور نمایند (شکل ۱ ب).

در این صورت مسئله انتخاب سازوکار موقعیت‌دهی دستگاه بصورت مسئله طراحی یک سازوکار کروی در می‌آید که در آن مفاصل در نقطه ثابتی همسر هستند و بندها حول آن روی سطوح کروی فرضی دوران می‌کنند. سازوکارهای کروی را می‌توان بطور کلی به دو گروه سازوکارهای موازی و سری تقسیم نمود. در حالت موازی سه محور مستقل از یکدیگر وجود دارد که در یک انتها با گشتاورسنج به پشتی نصب شده‌اند و در انتهای دیگر به زمین اتصال یافته‌اند. در این حالت می‌توان محورها را بصورت دو به دو متعامد در نظر گرفت که این امر از نظر دقت اندازه‌گیری مهم است. اما موقعیت‌دهی محورها در وضعیت‌های استقرار مختلف بصورتی که همواره در مرکز دیسک خارجی کمربندی همسر باشند بسیار دشوار یا ناممکن است.

در حالت سری، سه محور بصورت عمود بر هم (یا تحت زاویه) نسبت به یکدیگر مفصل می‌شوند. یک گشتاورسنج در انتهای متصل به پشتی و دو گشتاورسنج در محل مفاصل محورها قرار می‌گیرند و انتهای دیگر به زمین ثابت می‌شود.

در ارزیابی کلی، سازوکارهای موازی نسبت به سازوکارهای سری از پایداری (صلبیت) بیشتری برخوردارند اما در عوض دامنه حرکت آنها محدودتر است و دارای مفاصل بیشتری هستند [۱۴]

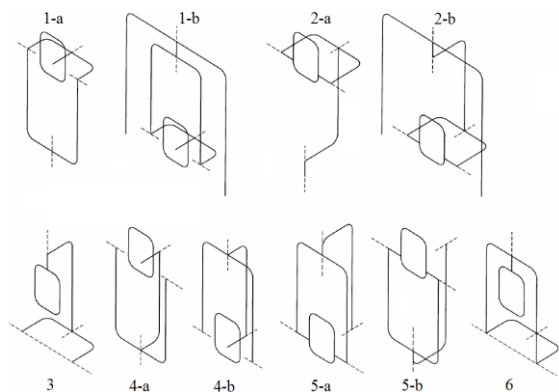
- دستگاه باید از راحتی و ایمنی کافی برای آزمایش افراد آزمودنی برخوردار باشد. نداشتن احساس راحتی و ایمنی فرد حین آزمایش می‌تواند نتایج حاصل را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین دستگاه باید از حجم مناسب و زیبایی ظاهری نسبی برخوردار باشد تا احساس ناخوشایندی در فرد آزمودنی ایجاد نکند.

## ۲-۲- طراحی سازوکارها

توانسنجی سه محوره عضلات کمر نیازمند اندازه‌گیری گشتاورهای کمر حول دیسک کمربندی خارجی است. بعبارت دیگر هدف دستگاه، اندازه‌گیری گشتاورهایی است که در محل دیسک از بالاتنه به پایین تنه (و بطور وارون) منتقل می‌شوند. برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای عمل‌کننده بر بالاتنه با توجه به اینکه اتصال مستقیم حسگرهای نیرو و گشتاور به بدن فرد آزمودنی امکان‌پذیر نیست پیش از هرچیز باید جسم صلبی را بصورت مستحکم به بالاتنه متصل کرد تا حسگرهای نیرو و گشتاور به آن اتصال یابند. روش متداول، استفاده از یک پشتی است که با تسمه به بدن متصل می‌گردد. در حالت کلی داده‌هایی که باید اندازه‌گیری شوند سه مولفه نیرو و سه مولفه گشتاور را شامل می‌شوند اما روشن است که اگر بتوان گشتاورهای وارده بر پشتی را حول مفصل کمربندی خارجی اندازه‌گیری نمود دیگر نیازی به اندازه‌گیری نیروها نخواهد بود.

### سازوکار موقعیت‌دهی

سازوکار موقعیت‌دهی در دستگاه سه‌محوره توانسنجی عضلات کمر وظیفه انطباق دستگاه سنجش با موقعیت بالاتنه (قفسه سینه) را در فضای سه‌بعدی بر عهده دارد. در حالت کلی، حرکت بالاتنه در فضا از ۶ درجه آزادی برخوردار است. لذا سازوکار موقعیت‌دهی باید از حداقل ۶ درجه آزادی برخوردار باشد تا بتواند با موقعیت‌های مختلف تنه در فضا انطباق یابد. بر این اساس، نخستین سازوکاری که مطرح می‌شود یک ربات ۶ درجه آزادی است که حرکات انتهای آن همواره بر حرکات قفسه سینه منطبق است و سازوکار سنجش (حسگرهای نیرو و گشتاور) در انتهای آن نصب شده‌اند (شکل ۱-الف). اما چنین سازوکاری به دلایلی از جمله تعداد بندها و مفاصل، نیاز به نیروسنج‌ها و گشتاورسنج‌های سه‌محوره، دشواری قفل کردن مفاصل و هزینه‌های بالای ساخت، گزینه‌ای برتر محسوب نمی‌شود. در این میان، منابع زیادی نشان داده‌اند که برخلاف این که حرکت بالاتنه نسبت به پایین‌تنه با استفاده از حرکات جزئی مهره‌های ستون فقرات صورت می‌گیرد، می‌توان در عمل، حرکت مزبور را بصورت



شکل ۲- چیدمان‌های مختلف بندها نسبت به هم

روش‌های متفاوتی برای بیان زوایا و گشتاورهای سه بعدی کمر ارائه شده‌اند که روش مناسب روشی است که هم از لحاظ فیزیکی و هم از لحاظ ریاضی پایدار و معنی‌دار باشد. دو روش اویلر/کاردان (سامانه مختصات مفصلی) و روش تصویر زوایا هر دو دارای نقاط تکین در زوایای خاص می‌باشند. روش تیلت/توئیسیت نسبت به روش‌های اویلر/کاردان و تصویر زاویه، پایدار می‌باشد و تعبیر فیزیکی ملموس‌تری ایجاد می‌کند [۱۵]. روش زاویه‌ای هلیکال، روشی مبتنی بر محاسبات ریاضی است که برخلاف پایداری، تعبیر فیزیکی ندارد [۱۶]. چندی پیش کمیته علمی استاندارد انجمن بین‌المللی بیومکانیک برای یکسان سازی چگونگی بیان نتایج محاسبات و اندازه‌گیری‌ها، سامانه مختصات مفصلی (JCS) را ارائه نموده است [۱۷]. در این روش دو سامانه مختصات متعامد (CCS) بر روی هر یک از دو عضو مجاور مفصل قرار می‌گیرند و سامانه مختصات مفصلی بگونه‌ای تعریف می‌شود که دو محور آن (I1 و I2 در شکل ۳)، بر روی دو سامانه مختصات متعامد مجاور و محور سوم (I3 در شکل ۳) عمود بر دو محور قبلی قرار گیرد. بدین ترتیب، برای ستون فقرات، محور دوران محوری سامانه مختصات مفصلی بر روی مهره تحتانی، محور خمش به جلو/عقب بر روی مهره فوقانی و محور خمش جانبی به صورت شناور تعریف می‌شود (شکل ۳).

### ۳-۲- ارزیابی طرحها و تحلیل تفصیلی طرح برگزیده

نخست برای انتخاب چیدمان مناسب از بین جایگشت‌های ممکن برای سه محور هم‌مرس به عنوان چارچوب اندازه‌گیری، جدول امتیازدهی با توجه به ملاحظات و معیارهای طراحی تشکیل شده و طرحها امتیازدهی شدند تا در پایان طرحی که حایز بالاترین امتیاز می‌باشد، انتخاب گردد (جدول ۲). بدین

در پی انطباق دستگاه سنجش با موقعیت بالاتنه (قفسه سینه) توسط سازوکار موقعیت‌دهی، سازوکار گشتاورسنجی وظیفه تثبیت این موقعیت و اندازه‌گیری گشتاورهای کمری را در امتداد سه محور بر عهده دارد. برای اندازه‌گیری گشتاورهای کمری می‌توان از سه روش استفاده نمود:

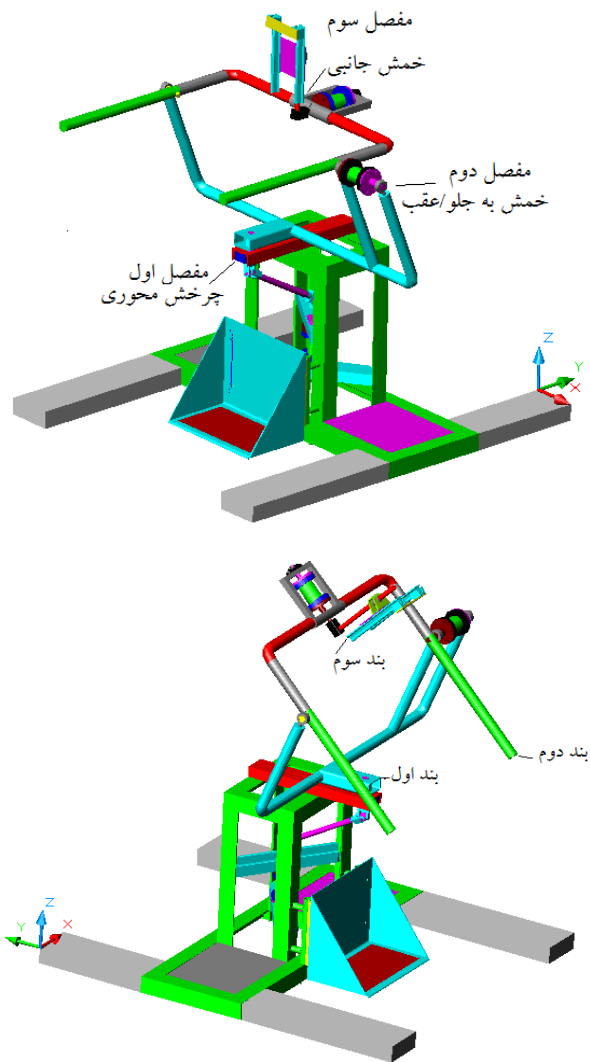
- ۱) اندازه‌گیری نیروها با ۶ نیروسنج تک‌محوره و بدست آوردن گشتاورها با ضرب نیروها در بازوهای گشتاوری
- ۲) اندازه‌گیری همزمان نیروها و گشتاورها با استفاده از یک نیروسنج شش‌محوره و یا ترکیبی از چند نیروسنج و گشتاورسنج تک‌محوره (در مجموع ۶ محور)
- ۳) اندازه‌گیری گشتاورها بطور مستقیم با چند گشتاورسنج تک‌محوره در مفاصل بندها

روش اول نیاز به جایگذاری شش نیروسنج در مفاصل یا در قسمت‌های دیگر مانند نشیمنگاه دستگاه دارد که اجرای آن دشوار است و دقت بالایی در پی نخواهد داشت. در روش دوم کافی است که یک نیروسنج شش‌محوره روی بند سوم دستگاه قرار گیرد. اما این روش برخلاف کارآمدی نیازمند هزینه قابل توجهی است. در روش سوم با استفاده از سه گشتاورسنج تک‌محوره با محورهای هم‌مرس در یک نقطه (دیسک کمری-خاجی فرد مورد آزمایش) می‌توان با توجه به ترکیب خاص ماتریس ژاکوبی، بدون آنکه سه نیروی کمر به عنوان مجهول وارد معادلات شوند، سه گشتاور کمر را بدست آورد.

چیدمان‌های متفاوتی از سه محور متقاطع هم‌مرس نسبت به همدیگر می‌توان ارائه نمود (۶=۳!). که تصاویر آنها در شکل ۲ آمده است.

از سوی دیگر، برای اندازه‌گیری گشتاورهای کمر حول سه محور، باید چارچوب اندازه‌گیری متشکل از سه گشتاورسنج تک‌محوره با محورهای هم‌مرس، از توانایی چرخش در زوایای مورد نظر برخوردار باشد که برای این مسئله نیز دو امکان وجود دارد:

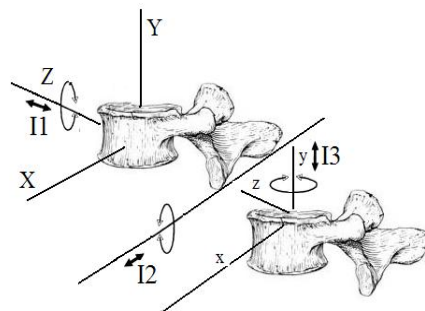
- ۱) استفاده از یک چارچوب ثابت با سه محور متقاطع عمود بر هم هم‌مرس همراه با یک سازوکار کروی سری یا موازی سه درجه آزادی که نقاط هم‌مرسی آنها بر هم منطبقند و اندازه‌گیری گشتاور بعد از قفل شدن مفاصل سازوکار کروی صورت می‌گیرد.
- ۲) استفاده از یک سازوکار سه درجه آزادی با مفاصل هم‌مرس که گشتاورسنج‌ها در مفاصل آن نصب شده‌اند و بعد از قفل مفاصل در جهت‌های مختلف، اندازه‌گیری گشتاور حول سه محور صورت می‌گیرد.



شکل ۴- مدل سه بعدی دستگاه: الف- در موقعیت ایستاده (۰ و ۰ و ۰) و ب- یک موقعیت ترکیبی (۱۵ و ۴۵ و ۱۵). مقادیر داخل پرانتز به ترتیب زوایای چرخش، خمش به جلو و خمش جانبی بر حسب درجه هستند.

پس از انتخاب چیدمان برتر، با روش امتیازدهی مشابهی دو طرح سازوکار با بندهای دورانی و چارچوب ثابت همراه با سازوکار کروی برای انتخاب سازوکار موقعیت‌دهی مناسب با یکدیگر مقایسه شدند. سپس مدلسازی سه بعدی دستگاه در نرم‌افزار مکانیکال دسکتاپ ۷۶ انجام پذیرفت (شکل ۴). همچنین برای اطمینان از کارکرد مناسب و نداشتن برخورد بندها و سایر اجزا دستگاه در دامنه کاری در نظر گرفته شده، آرایش و پیکربندی دستگاه در موقعیت‌های کاری مختلف با استفاده از نرم‌افزار ویزوال نسترن ۲۰۰۲ مدلسازی و ارزیابی گردید. در مرحله بعد، دستگاه‌های مختصات برای طرح برتر تعیین شده و با استفاده از روش دناویت-هارتنبرگ [۱۹] معادلات حاکم بین گشتاورهای مفاصل و گشتاورهای کمر استخراج شدند.

منظور نخست بر اساس روش طراحی پال و بایتز [۱۸] معیارهای طراحی بر اساس شباهت موضوعی در سه گروه اصلی عملکردی، ارگونومیکی و ساختی با ضریب اهمیت به ترتیب ۵۰٪، ۳۰٪ و ۲۰٪ طبقه بندی شدند. سپس معیارهای طراحی در هر گروه وزن دهی شدند. در گروه معیارهای عملکردی، با توجه به تاثیر قابل توجه فرکانس طبیعی و ممان اینرسی بر دقت اندازه گیری دستگاه، و محدوده حرکت قابل دسترس بر دامنه کارکرد دستگاه وزن ۳۰٪ (معادل ۱۵٪ وزن کل) به هر یک از آنها اختصاص یافت. همچنین به عامل حداقل تعداد بازوها و مفاصل که از تاثیر کمتری بر عملکرد دستگاه نسبت به سایر عوامل برخوردار است وزن ۱۰٪ (معادل ۵٪ وزن کل) اختصاص داده شد. در گروه معیارهای ارگونومیکی، برای عامل عدم برخورد بازوها به بدن وزن ۴۰٪ (۱۲٪ وزن کل) و برای هریک از معیارهای راحتی و ایمنی، و زیبایی ظاهری وزن ۳۰٪ (۹٪ وزن کل) منظور شد. سرانجام در گروه معیارهای ساختی به معیار راحتی و کم هزینه بودن وزن ۶۰٪ (۱۲٪ وزن کل) و به معیار ساده بودن سامانه وزن ۴۰٪ (۸٪ وزن کل) اختصاص یافت.



شکل ۳- توصیف سامانه مختصات پروکسیمال (XYZ)، سامانه مختصات دیستال (xyz) و سامانه مختصات مختصات مفصلی (JCS)

در مرحله بعد چیدمانهای مختلف برای هریک از معیارهای طراحی مورد ارزیابی قرار گرفتند و بین ۱ تا ۵ امتیاز دهی شدند (۱ بد، ۳ متوسط و ۵ خوب). برای امتیاز دهی به معیارهای فرکانس طبیعی و ممان اینرسی که تأثیر بسزایی در پایداری و دقت دستگاه دارند، مدلسازی‌هایی در نرم‌افزار انسیس برای آنالیز مودال مجموعه صورت گرفت و نتایج آن در امتیاز هر چیدمان منظور گردید.

### ۳- نتایج

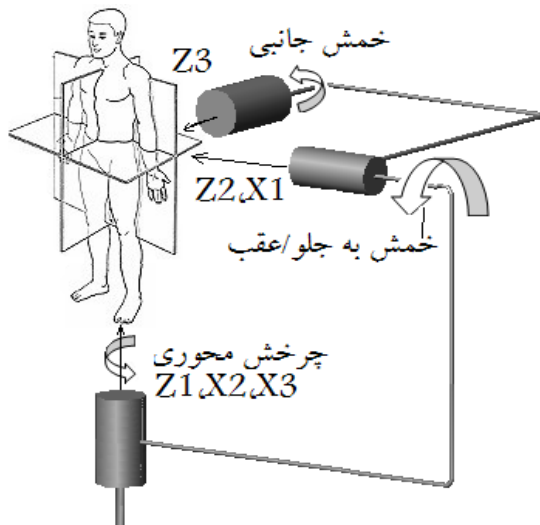
در جدول ۲ چیدمان‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند و امتیازات نهایی هر طرح با توجه به ضرایب وزنی در نظر گرفته شده و امتیازهای کسب شده طرح نشان داده شده است. چنانکه دیده می‌شود طرح (۱-الف) در بین چیدمانهای مختلف،

همچنین تحلیل‌های اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس ۸، با المانهای ۴۲ تیرک و ۲۱ جرم برای پی‌بردن به میزان کرنش سامانه در حین کار تحت شرایط گشتاور ماکزیمم اعمالی، به عمل آمد تا خطای ناشی از آن در محاسبه گشتاورهای کمر با استفاده از معادلات حاکم تعیین گردد. برای این منظور گشتاورهای ماکزیمم مندرج در جدول ۱ با اعمال ضرایب ایمنی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲- مقایسه چیدمان‌های مختلف (امتیازدهی طرح‌ها) برای سازوکار گشتاورسنجی

معیارها	اهمیت (%)	۱-الف	۱-ب	۲-الف	۲-ب	۳	۴-الف	۴-ب	۵-الف	۵-ب	۶
بالا بودن فرکانس طبیعی (صلبیت)	۱۵	۵	۱	۳	۱	۱	۳	۱	۱	۱	۱
پایین بودن ممان اینرسی	۱۵	۵	۱	۵	۱	۳	۳	۱	۱	۱	۳
داشتن حداقل بازو و مفصل	۵	۵	۱	۱	۱	۵	۱	۱	۱	۱	۳
دامنه حرکت قابل دسترس	۱۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
عدم برخورد با بدن حین کار	۱۲	۵	۵	۱	۵	۵	۱	۵	۱	۵	۵
راحتی و ایمنی شخص آزمودنی	۹	۳	۱	۱	۱	۳	۱	۱	۱	۱	۱
زیبایی ظاهری	۹	۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
راحتی و کم‌هزینه بودن ساخت	۱۲	۳	۱	۱	۱	۵	۱	۱	۱	۱	۵
ساده بودن سامانه	۸	۵	۱	۳	۱	۵	۱	۱	۱	۱	۵
جمع کل	۵*۱۰۰	۴۵۸	۲۰۸	۲۶۶	۲۰۸	۳۵۶	۲۰۸	۲۰۸	۲۰۸	۱۶۰	۳۲۸

امتیازها : خوب: ۵ و متوسط: ۳ و بد: ۱



شکل ۵- محورهای مختصات سامانه برگزیده

چگونگی تعریف دستگاه‌های مختصات در شکل ۵ دیده می‌شود. محور دوران محوری به سامانه مختصات صفر یا زمین، و محور خمش جانبی به ناحیه سینه‌ای ستون فقرات ثابت شده اند و محور خمش به جلو و عقب بصورت عمود بر دو محور پیشین قرار گرفته است (شکل ۵). مطابق تعریف یادشده، هر سه زاویه مفصلی  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  در حالت ایستاده قائم معادل ۹۰ درجه هستند. البته این اعداد در معادلات روباتیکی دستگاه به

با ارتفاع کم و در نتیجه موقعیت مرکز جرم پایین نسبت به سایر طرحها، سادگی و کمترین تعدادمفاصل و طول بندها و برخورداری از فضای قابل دسترس مناسب، ۴۵۸ امتیاز کسب نموده و طرح برتر محسوب می‌گردد. از سوی دیگر، نتایج مقایسه مکانیزم‌های موقعیت دهی (جدول ۳) نشان‌دهنده برتری سازوکار با بندهای دورانی بدلیل سادگی سامانه، تعداد کمتر مفاصل و بندها و راحتی و ایمنی آزمودنی، نسبت به چارچوب ثابت همراه با سازوکارهای سری و موازی می‌باشد.

طرح پایانی حاصل بر این اساس در شکل ۴ دیده می‌شود. در این طرح، چارچوب اندازه‌گیری، شامل محورهای متقاطع دو به دو عمود بر هم و هم‌مرس است که به فرد آزمودنی متصل شده و بازوهای آن برای اندازه‌گیری در موقعیت‌های مختلف، نسبت به هم دوران می‌کنند. بند اول دستگاه به زمین و بند سوم به بالاتنه فرد (توراکس) متصل می‌شود و بند دوم هم بین این دو قرار می‌گیرد. این ساختار، اندازه‌گیری همزمان گشتاورها در سه محور کمر و قابلیت حرکت را در هر سه محور ممکن می‌سازد.

با سه گشتاورسنج تک‌محوره و یک ساختار روباتی سه‌بندی، به درستی گشتاورهای کمر را اندازه‌گیری نمود.

جدول ۴- پارامترهای دناویت-هارتنبرگ دستگاه

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_i$	$\theta_i$	$d_i$
1	0	0	$\theta_1$	0
2	$\pi/2$	0	$\theta_2$	0
3	$-\pi/2$	0	$\theta_3$	0

با توجه به این مسأله معادلات دستگاه به شکل رابطه ۵ خلاصه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_2 \cos \theta_3 & -\sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 \\ -\sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

به این ترتیب با اندازه‌گیری گشتاور توسط سنسورهای مفاصل، گشتاورهای کمر توسط رابطه ۶ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta_3}{\sin \theta_2} & \sin \theta_3 & \frac{\cos \theta_2 \cos \theta_3}{\sin \theta_2} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{\sin \theta_3}{\sin \theta_2} & -\cos \theta_3 & \frac{\sin \theta_3 \cos \theta_2}{\sin \theta_2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

میزان این گشتاورها در دستگاه متصل به تنه فرد با استفاده از معادله ۶ قابل محاسبه است و برای یافتن گشتاورها در دستگاه متصل به زمین کافی است یک تبدیل مختصات صورت گیرد. در صورت وجود عرض از مبدأ و طول از مبدأ در محورهای مفاصل نسبت به همدیگر، سه سطر اول ماتریس ژاکوبی دستگاه غیرصفر خواهند شد. در ماتریس ژاکوبی حاصل (رابطه ۷)، A و B مقادیر خطای احتمالی ناشی از عرض از مبدأ و طول از مبدأ محورها نسبت به یکدیگرند که در اثر خطاها در ساخت، لقی مفاصل، و یا خیز دستگاه تحت بارگذاری بوجود آمده‌اند.

$$J = \begin{pmatrix} A \sin \theta_3 + B \cos \theta_2 \sin \theta_3 & 0 & 0 \\ A \cos \theta_3 + B \cos \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_2 \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 \\ \cos \theta_2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

همچنین نتایج بررسی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار

کار می‌روند اما در حیطه بیومکانیک هر سه زاویه گفته‌شده در حالت ایستاده قائم صفر در نظر گرفته می‌شوند.

پارامترهای روباتیکی بندهای دستگاه که مطابق روش دناویت-هارتنبرگ بدست آمده‌اند در جدول ۴ دیده می‌شوند. برای بدست آوردن رابطه بین گشتاورهای مفاصل و گشتاورهای کمر از دیدگاه بند سوم (یعنی تنه شخص) بدست می‌آید:

$$\tau = J^T F \quad (1)$$

که بردار گشتاور پیچشی مفاصل دستگاه، و بردار نیرو و گشتاور حول مفصل کمریخاجی فرد، به ترتیب عبارتند از:

$$\tau = \{\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3\}^T \quad (2)$$

$$F = \{F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z\}^T \quad (3)$$

همچنین ماتریس ژاکوبی دستگاه (J) به صورت رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_2 \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 \\ \cos \theta_2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

جدول ۳- مقایسه سازوکارهای موقعیت دهی

1-a چارچوب ثابت همراه با سازوکار کروی		1-a سازوکار با بندها دورانی	ضریب اهمیت	معیارها
موازی	سری			
۵	۱	۵	۱۵	بالا بودن فرکانس طبیعی
۱	۵	۵	۱۵	پایین بودن ممان اینرسی
۱	۳	۵	۵	داشتن حداقل بازو و مفصل
۱	۳	۵	۱۵	محدوده قابل دسترس
۳	۳	۵	۱۲	عدم برخورد با بدن حین کار
۱	۳	۳	۹	راحتی و ایمنی آزمودنی
۱	۱	۵	۹	زیبایی ظاهری
۱	۳	۳	۱۲	راحتی و هزینه ساخت
۱	۵	۵	۸	ساده بودن سامانه
۱۸۴	۲۹۸	۴۵۸	۵*۱۰۰	جمع کل

امتیازها: خوب: ۵، متوسط: ۳، بد: ۱

آنگونه که دیده می‌شود آرایش خاص بندها و همرسی محورهای مفاصل سبب شده است که مؤلفه‌های سه سطر بالایی ماتریس ژاکوبی صفر شوند و در نتیجه سه مؤلفه اول بردار F در دستگاه معادلات ظاهر نگردند. بدین ترتیب می‌توان

انسيس ۸ نشان داد که خيز سامانه درمحل تلاقی محورها در حين کار تحت شرایط ماگزیم گشتاور اعمالی ۴۰۰ نیوتن‌متر معادل ۳/۵ میلی‌متر می‌باشد.

#### ع- بحث

دستگاه‌های سنجش گشتاورهای کمر به عنوان یکی از ابزار مطالعات آزمایشگاهی در زمینه بیومکانیک تنه و کمر درد می‌باشند که اغلب برای حالت فعالیت ایزومتریک عضلات ارائه شده‌اند [۱۹]. هرچند در حالت ایزومتریک، تنها می‌توان قدرت را اندازه‌گیری نمود و ارتباط نتایج اندازه‌گیری با عملکرد دینامیکی بدن هنوز بطور واضح مشخص نشده است، در این حالت کاری بدلیل امکان کنترل بهتر شرایط آزمون (بدلیل نبودن حرکت) و دقت و تکرارپذیری بیشتر نسبت به سایر حالت‌های فعالیت عضلانی ترجیح داده می‌شود [۲۰]. معمولاً سنجش گشتاورهای کمر در حالت حداکثر فعالیت داوطلبانه (MVC) انجام می‌شود تا گشتاورهای بیشینه قابل اعمال توسط نمونه‌ها را برای مقایسه با گشتاورهای حاصل از فعالیت‌های روزمره بدست دهند [۲۱].

دستگاه طراحی شده از این مطالعه، با توجه به امکان اندازه‌گیری ایزومتریک گشتاورهای کمر در دامنه وسیعی از وضعیت‌های استقرار متقارن و نامتقارن و ارایه نتایج در صفحات آناتومیک بر دستگاه‌های ارایه شده پیشین برتری دارد. دستگاه ایزواستیشن B۲۰۰ که تنها نمونه دستگاه سنجش سه‌محوره گشتاورهای کمر است که بصورت تجاری عرضه شده است [۱۰ و ۹]، ولی، چنانکه پرنیانپور و همکاران نشان داده‌اند، تنها در حالت وضعیت استقرار ایستاده قائم قادر به اندازه‌گیری دقیق گشتاورهای محوری است و نتایج حاصل از آن در سایر وضعیت‌های استقرار مورد تردید جدی قرار دارد [۲۱]. بخشی از برتری دستگاه طراحی شده ناشی از بکارگیری مفاصل هم‌مرس است که خطاهای ناشی از اندازه‌گیری گشتاور در سازوکارها با مفاصل غیرهم‌مرس و نامتناظر را حذف می‌کند و رابطه ساده‌ای را برای انتقال مختصات بین دستگاه متصل به سامانه اندازه‌گیری و دستگاه متصل به تنه فرد آزمودنی فراهم می‌آورد. معادله (۶) نشان می‌دهد که می‌توان به آسانی با استفاده از گشتاورهای اندازه‌گیری شده توسط حسگرها، گشتاورهای کمری را حول سه محور آناتومیک مطابق استاندارد ISB محاسبه نمود. البته رابطه مزبور در حالتی که مقدار  $\sin\theta$  صفر باشد یعنی بند دوم ۹۰ درجه دوران کند، نامعین است. اما طبق جدول ۱، این نقطه تکین در خارج از دامنه آزمون دستگاه قرار دارد و بنابراین مشکلی در کارایی دستگاه بوجود نمی‌آورد.

در عین حال رابطه ۷ نشان می‌دهد که باید نسبت به ناهم‌مرسی محورهای مفاصل و وجود عرض از مبدأ و طول از مبدأ در آنها نسبت به همدیگر حساس بود. ناهم‌مرسی محورها بطورکلی می‌تواند در اثر خطاهای ساخت، لقی مفاصل، و یا خیز دستگاه تحت بارگذاری پدید آید. در این میان نتایج بررسی اجزای محدود برای گشتاور حداکثر گزارش شده برای کمر با اعمال ضرایب ایمنی نشان می‌دهد که خطای ناشی از خیز سامانه تحت بار ناچیز و تنها در حدود ۳/۵ میلی‌متر است. این امر حاکی از صلبیت کافی سیستم و نداشتن انحراف قابل ملاحظه نقطه هم‌مرسی محورها از موقعیت پیش بینی شده می‌باشد. از این رو به میتوان انتظار داشت که ماتریس ژاکوبی محاسبه شده برای تبدیل گشتاورها تحت شرایط بارگذاری دستگاه همچنان معتبر باشد [۲۲]. در عین حال، دقت ویژه در مرحله ساخت برای اطمینان از هم‌مرسی محورهای مفاصل دستگاه، نکته اصلی برای حفظ درستی ژاکوبی (رابطه ۶) محسوب می‌گردد.

عامل مهم دیگر در فراهم آوردن امکان بکارگیری دستگاه مطالعه حاضر در دامنه وسیعی از وضعیت‌های استقرار، آرایش مناسب بندهای دستگاه است که فضای مناسب و کافی برای قرارگیری تنه و اندام‌های تحتانی فرد آزمودنی را در حالت‌های نشسته، نیمه‌نشسته و ایستاده در اختیار قرار می‌دهد. بعلاوه مجزا بودن سامانه قفل از بخش اندازه‌گیری سبب می‌شود که از ادغام و تاثیر نتایج جلوگیری شود. ضمن اینکه جایدهی گشتاورسنج‌ها در مفاصل بگونه‌ای است که تنها گشتاورهای پیچشی به آنها وارد می‌گردد.

سرانجام، ویژگی پایداری حداکثر و ممان اینرسی حداقل دستگاه طراحی شده در بین گزینه‌های مختلف (شکل ۲)، امکان می‌دهد که از تواناییهای آن در شرایط دینامیکی نیز استفاده گردد. بویژه، می‌توان در مراحل آتی یک حالت کاری توانبخشی دینامیک برای دستگاه تعریف نمود که در طی آن بیمار فعالیت عضلات تنه خود را بگونه‌ای تغییر می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده برای گشتاورهای کمری از الگوی خاصی که در صفحه نمایشگر دیده می‌شود پیروی کند. انتظار می‌رود که چنین دستگاهی برای بازتوانی و تقویت انتخابی عضلات تنه بسیار مفید واقع شود.

#### ۵- قدردانی

از کمک‌های سرکار خانم مهندس نریمانی و آقای مهندس خمسه قدردانی می‌شود. در اجرای این طرح از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و طرح تحقیقات اساسی وزارت صنایع و معادن استفاده شد که موجب قدردانی است.





- Mitchell Jay Hiroshi Lum, Kinematic Optimization of a 2-DOF Spherical Mechanism for a Minimally Invasive Surgical Robot, thesis University of Washington, 2004 [۱۴]
- NR Crawford, GT Yamaguchi, CA Dickman, A new technique for determining 3-D joint angles: the tilt/twist method. Clin Biomech (Bristol, Avon). Mar;14(3):153-65, 1999. [۱۵]
- HJ Woltring, 3-D attitude representation of human joints: a standardization proposal., J Biomech. Dec;27(12):1399-414, 1994. [۱۶]
- Wu G, Siegler S, Allard P, Kirtley C, Leardini A, Rosenbaum D, Whittle M, D'Lima DD, Cristofolini L, Witte H, Schmid O, Stokes I "Standardization and Terminology Committee of the International Society of Biomechanics. ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion--part I: ankle, hip, and spine. International Society of Biomechanics" J Biomech. Apr;35(4):543-8, 2002 [۱۷]
- G. Pahl, W. Beitz, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Ken Wallace, Lucienne Blessing, K. Wallace, et al, Engineering Design: A Systematic Approach, third edition, Springer, 1998. [۱۸]
- Craig J.J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Addison-Wesley, 1989. [۱۹]
- Mital A., Kumar S., Human Muscle Strength Definitions, Measurement, and Usage: Part II - The Scientific Basis (Knowledge Base) for the Guide, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 22, pp. 123-144, 1998. [۲۰]
- Parnianpour M., Tan JC., Objective quantification of trunk performance, in D 'Orazio B. (Ed.) Back Pain Rehabilitation. Andover Medical Publishers, Boston, 205-237, 1993. [۲۱]
- محمودرضا آذغانی وبقیه، طراحی مفهومی دستگاه سه‌محوره توانسنجی عضلات کمر در حالت ایزومتریک، پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک ISME2007 [۲۲]
- Sheikhzadeh A., The Effect of Pure and Combined Loading on the Recruitment Pattern of Ten Selected Trunk Muscles, PhD thesis, New York University, 1997. [۱]
- Tabatabae, Emami, Pour-Samimi, et al, Study of low back pain in west of Tehran, Low Back Pain Conf. Shahid-Beheshti University Hospital, 2001. [۲]
- Lariviere Ch., Gagnon D., Gravel D., et al, A Triaxial Dynamometer to Monitor Lateral Bending and Axial Rotation Moments during Static Trunk Extension Efforts, Clinical Biomechanics, 16, 80-83, 2001. [۳]
- Parnianpour M., Nordin M., Kahanovitz N. and Frankel V., The Triaxial Coupling of Torque Generation of Trunk Muscles during Isometric Exertions and the Effect of Fatiguing Isoinertial Movements on the Motor Output and Movement Patterns, Spine, 13, 982-992, 1988. [۴]
- McNeill Th., Warwick D., Andersson G. and Schultz A., Trunk Strengths in Attempted Flexion, Extension, and Lateral Bending in Healthy Subjects and Patients with Low-Back Disorders, Spine, 5, 529-538, 1980. [۵]
- Lee Y.-H. and Kuo C.-L., Factor Structure of Trunk Performance Data for Healthy Subjects, Clinical Biomechanics, 15, 221-227, 2000. [۶]
- Davis Sh.W., Miller R.J., Mirka G.A., Marras W.S., Apparatus for monitoring the motion of the lumbar spine, Patent No. US5094249, 1992. [۷]
- Marras W.S., Davis K.G., Granata K.P., Trunk Muscle Activities during Asymmetric Twisting Motions, Journal of Electromyography and Kinesiology, Vol. 8, pp. 247-256, 1998. [۸]
- Seeds R.H., Levene J. and Goldberg H.M., Normative Data for Isostation B100, The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy, 9, 141-155, 1987. [۹]
- http://www.pemed.com [۱۰]
- فراس حکاک، دستگاه سنجش سه‌محوره گشتاورهای کمر در حالت ایزومتریک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳ [۱۱]
- Nordin C.C. and White D.J., Measurement of Joint Motion: A Guide to Goniometry, Jaypee Brothers, 2nd edition, 1998, (1st Indian edition). [۱۲]
- Stephen Pheasant, Bodyspace, Anthropometry, Ergonomics and Design of Work, Taylor&Fracis, 2001. [۱۳]

۷- واژگان فارسی

Proximal	فوقانی	System	سامانه
Distal	تحتانی	Posture	وضعیت اسقرار
Sensor	حسگر	Mechanism	سازوکار
Frame	چارچوب	Schematic	طرحواره
MVC	حداکثر فعالیت داوطلبانه	Flexion	خمش به جلو
(maximum voluntary contraction)		Extension	خمش به عقب
		Lateral bending	خمش به طرفین
		Cartesian coordinate	مختصات متعامد