

:

حمید صالحی* ، دکتر عباس بهرام* ، محمد دارینی ، علیرضا کیامنش***

* دانشجوی دوره دکتری گرایش علوم حرکتی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی دانشگاه تربیت معلم

تهران

** دانشیار دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی دانشگاه تربیت معلم

*** دانشیار دانشگاه پلی تکنیک تهران

**** دانشیار دانشکده علوم تربیتی دانشگاه تربیت معلم

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۷/۳

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۷

برای تعیین برخی ویژگی‌های حرکت‌های نشانه‌گیری ساده دست انسان و یافتن شواهدی مبنی بر نحوه برنامه‌ریزی و کنترل آنها، شاخص‌های انحنای خط سیر (زاویه شروع و انحنای بیشینه) و مسیر (زمان واکنش و زمان حرکت) حرکت‌های نشانه‌گیری ۱۱ دانشجوی راست دست (21.86 ± 2.18 ساله) مورد مطالعه قرار گرفت یافته‌ها پیرامون ویژگی‌های جوهری عبارت بود از: ۱) خط سیر مستقیم، با حفظ در تمام نقاط فضا، ۲) خط سیر مستقل از تمرین بود و ۳) نمودار سرعت خطی زنگوله‌ای و دارای تقارن بود. تغییرات زمان حرکت نیز مستقل از مکان زاویه‌ای ارائه هدف و تمرین بود. در حالی که زمان واکنش متناسب با افزایش جدایی زاویه‌ای افزایش یافت و تکرار دسته کوشش‌ها باعث کاهش آن شد. در کل یافته‌ها مشخص نمود که برنامه‌ریزی و کنترل حرکت‌های دست بر حسب مختصات دکارتی انجام می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نشانه‌گیری، خط سیر، مسیر، ویژگی جوهری، مختصات دکارتی.

مسئله مهم در کنترل حرکت، این است که بدانیم نظام ادراکی - حرکتی انسان چگونه مشکل درجات آزادی را در سطوح مختلف حل می‌نماید. برای درک این ساز و کار، باید ابتدا روش‌هایی که در دستگاه عصبی برای تولید حرکت‌های ساده استفاده می‌شود، مورد کاوش قرار گیرد. یکی از روش‌ها، مطالعه ویژگی‌های سینماتیکی حرکت است. ویژگی‌هایی که در شرایط مختلف بدون تغییر

بمانند (ویژگی‌های جوهری^۱) جزء ذات برنامه‌ریزی محسوب می‌شوند و در سطوح بالای سلسله مراتب برنامه‌ریزی (۵؛ ۳۷؛ ۲۲) کنترل می‌شوند. در صورتی که طرح‌ریزی و کنترل ویژگی‌هایی که تابع شرایط انجام عمل تغییر می‌کنند (آماره^۲)، در سطوح پایین‌تر سلسله مراتب (به احتمال زیاد سطح اندام مجری) انجام می‌پذیرد (۴۷).

در مرور ادبیات کنترل حرکت، برخی از ویژگی‌های جوهری و آماره‌های حرکت‌های نشانه‌گیری مشخص شده است: زمان بندی نسبی، نیروی نسبی، توالی فعالیت‌های عضلانی مشخص از جمله جزء ویژگی‌های جوهری، و زمان کلی حرکت، نیروی کلی و گروه عضلانی (واحد‌های حرکتی متفاوت) جزء آماره‌های حرکت محسوب معرفی شده‌اند (۳۸). در تحقیقات اغلب تکلیف مورد استفاده تنها یک حرکت نشانه‌گیری نقطه به نقطه و مجرد بوده است (۱۲؛ ۵۶). ویژگی دیگر این تحقیقات این است که حرکت‌های مورد نظر تنها در یک قسمت از فضای کاری انجام می‌شده‌اند (۱۲؛ ۵۱). در حرکت‌های چند مفصله، چندین مشکل کنترلی وجود دارد که در حرکات تک مفصله دیده نمی‌شوند (۲۱). در این حرکت‌ها، تعداد درجات آزادی بیشتر و در نتیجه پیچیدگی بیشتر است. اولین پژوهش در زمینه توصیف ویژگی‌های سینماتیکی حرکت‌های دو مفصله را موراسو^۳ (۱۹۸۱) انجام داده است. نتایج حاصل از این پژوهش و تحقیقات بعدی همین پژوهشگر و همکارانش (۱؛ ۳۲؛ ۳۳)، برخی از ویژگی‌های خط سیر حرکت‌های دست را مشخص نموده‌اند. جمله‌ی این پژوهشگران متوجه شدند که، وقتی هدف در پیش روی آزمودنی باشد، خط سیر حرکت دست، تقریباً مستقیم است. هولرباخ و فلش^۴ (۱۹۸۲) نیز نشان داده‌اند که خط سیر حرکت دست تحت تاثیر تغییراتی که در مدت زمان و سرعت حرکت بوجود می‌آید قرار نمی‌گیرد و همواره یک الگوی مشخص دارد (۲۱). اما در پژوهش‌هایی نیز گزارش شده که خط سیر این حرکت‌ها در برخی موارد دارای انحنای کمی است. میزان این انحنای به مکان اجرای حرکت (۴۷) و جهت حرکت (۳؛ ۴۹؛ ۵۰؛ ۲۴؛ ۱۷) بستگی داشته است. در همین راستا، اشنایدر و زرنیک^۵ (۱۹۸۹) نشان داده‌اند که مسیر حرکت‌های دست با انجام تمرین به تدریج یکنواخت و صاف‌تر می‌شود (۳۹). همچنین گزارش شده است که نمودار سرعت لزوماً دارای شکل یکسان و متقارن نیست و در حرکت‌های آهسته اغلب دارای چولگی به راست (۳۱؛ ۳۴) و در حرکات سریع دارای چولگی به چپ (۵۱) بوده است.

از مشاهده وجود برخی ویژگی‌های جوهری در سینماتیک خطی حرکت‌های دست به عنوان گواهی برای اثبات مدل برنامه‌ریزی در مختصات بیرونی (دکارتی) استفاده می‌شود. با این وجود مشاهده ویژگی‌های جوهری در سینماتیک زاویه‌ای حرکت‌های دست نیز از انجام برنامه‌ریزی در فضای درونی (مفصل) حکایت می‌کند (۴۴). پژوهشگران مختلف با تغییر شرایط سینماتیکی (۵۵) و دینامیکی (۴۳) شواهدی دال بر طرح‌ریزی خط سیر حرکت‌های دست در فضای دکارتی ارائه نموده‌اند. پیش بینی‌های مدل‌هایی که براساس ویژگی‌های دینامیکی تعریف شده‌اند (۴۸؛ ۱۵) کاملاً برعکس است. پیش بینی این مدل‌ها حاکی از آن است که در نتیجه تغییر زمان بندی حرکت، شکل مسیر حرکت تغییر خواهد کرد.

۱. Invariant Characteristics
 ۲. Parameter
 ۳. Morasso
 ۴. Hollerbach & Flash
 ۵. Schneider & Zernicke

با توجه به موارد ذکر شده، سوالی که مطرح می‌شود این است که آیا می‌توان در زاویه شروع^۱ و شاخص انحنا^۲ بیشینه^۳ خط سیر حرکت‌های نشانه‌گیری دو مفصله دست، که تغییراتی در شرایط انجام تکلیف و الگوی ارائه هدف آنها ایجاد شده است ویژگی‌هایی تحت عنوان ویژگی‌های جوهری را مشخص نمود یا خیر؟ اگر طرح‌ریزی خط سیر بر پایه یک معیار مشخص و بر حسب مختصات بیرونی صورت گیرد، باید انحنا^۴ خط سیر مستقل از مکان اجرای حرکت باشد (۴۳). در بخش دیگری از تحقیق، مکان ارائه ی هدف بصورت همگن در فضای کاری دوران داده شد. هدف از این تغییر مکان، بررسی احتمال برنامه‌ریزی و کنترل حرکت در فضای دکارتی بود. علاوه بر آن، با تغییر زاویه بین دو هدف پیاپی (زاویه ی جدایی^۳)، میزان انتقال ویژگی‌های خط سیر به دیگر مناطق فضا مورد مطالعه قرار گرفت. اگر یک پارامتر جزء ویژگی‌های جوهری یک حرکت باشد، نباید تحت تاثیر تمرین یا یادگیری تغییر کند. با این منطبق، محقق آزمودنی‌های تحت بررسی را واداشت تا حرکت‌های خود را به تعداد زیاد و در قالب چند دسته کوشش انجام دهند. در این شرایط می‌توان تغییراتی که در نتیجه یادگیری یا تمرین بوجود می‌آید را از اثرهای مرتبط با ساختار طرح‌ریزی حرکت جدا نمود.

تحقیق حاضر از نوع بنیادی، با روش نیمه تجربی انجام شده است. براساس مرور ادبیات و پیشینه، برای انجام تکلیف مورد نظر، ۱۱ نفر (بامیانگین و انحراف معیار $21,86 \pm 2,18$ سال) مرد انتخاب شد. همه شرکت کنندگان راست دست و از بین دانشجویان دوره کارشناسی دانشگاه اصفهان بودند، که براساس درخواست پژوهشگر و با جلب رضایت و موافقت کتبی گزینش شدند. براساس غربالگری انجام گرفته پیش از آغاز تحقیق، داوطلبانی که فاقد هرگونه نقص جسمی، حسی - حرکتی و بینایی (بجز بینایی اصلاح شده) بودند و تجربه ی قبلی با تکلیف مورد نظر و تکلیف‌های مشابه نداشتند استفاده شدند. بطور کلی سه متغیر مستقل در جریان آزمایش‌های اجرا شده در این پژوهش استفاده شد که عبارت بودند از:

- ۱) تغییر تصادفی مکان زاویه‌ای ارائه هدف؛ با ۱۲ سطح: ۳۰ درجه، ۶۰،، ۳۶۰ درجه.
- ۲) تغییر تصادفی زاویه جدایی دو هدف در کوشش‌های پیاپی؛ با ۶ سطح: از ± 30 ، ± 60 ، ± 90 ، ± 120 ، ± 150 تا ± 180 درجه.
- ۳) تکرار دسته کوشش‌ها (انجام حرکت در چهار دسته کوشش).

متغیرهای وابسته در این پژوهش، ویژگی‌های انحنا^۲ خط سیر و ویژگی‌های برنامه‌ریزی مسیر حرکت دست بودند که تعریف عملیاتی و نحوه محاسبه آنها، به ترتیب فهرست شده است:

- ۱) زاویه شروع حرکت: زاویه بین خط مستقیمی که از نقطه شروع تا هدف امتداد دارد، با خطی که نقطه شروع آن نقطه آغاز حرکت و نقطه انتهایی آن 150 ms پس از شروع حرکت، برحسب هزارم درجه. الیوت و همکارانش (۱۱) معتقدند، قسمتی از حرکت که در فاصله زمانی 150 ms اول حرکت قرار دارد، نشانگر برنامه‌ریزی قبلی نظام ادراکی - حرکتی است. پس از این بازه زمانی، به احتمال زیاد ساز و کار کنترل حرکت بصورت تصحیح حین انجام حرکت خواهد بود.

۱. Start Angel (SA)

۲. Peak Curvature Index (PCI)

۳. Angular separation

۴. Concurrent Correction

۲) خمیدگی: میزان انحنای خط سیر حرکت دست، نسبت به خط مستقیمی که از نقطه ی شروع تا هدف امتداد دارد، برحسب یک هزارم میلی متر. این شاخص با محاسبه مولفه های x, y سرعت و شتاب در هر لحظه از زمان و از طریق معادله (۱) قابل محاسبه است (۳۶):

$$C = \frac{v_x a_y - v_y a_x}{\sqrt[3]{v_x^2 + v_y^2}} \quad \text{معادله ۱}$$

آنچه از معادله فوق حاصل می شود میزان انحنای در هر لحظه از زمان حرکت است. شاخص مورد نظر پیوستاری از اعداد متفاوت است و نمی توان یک مقدار مشخص برای آن تعریف کرد. هنگامی که می خواهیم حرکت هایی با دامنه زمانی متفاوت را با هم مقایسه کنیم، امکان استفاده از این شاخص مقدور نیست. لذا برای اینکه بتوان به نوعی اختلاف خمیدگی حرکت هایی با زمان و دامنه حرکت متفاوت را با هم مقایسه کرد بیشترین میزان خمیدگی محاسبه و تحت عنوان درصد شاخص انحنای بیشینه معرفی شد. این شاخص از محاسبه بیشترین فاصله عمودی خط سیر حرکت دست از خط مستقیمی که از نقطه شروع تا هدف امتداد دارد، بخش بر فاصله بین نقطه شروع تا نقطه هدف (دامنه حرکت) ضرب در ۱۰۰، نیز قابل محاسبه است (۴۵؛ ۲۷).

نتایج تحقیق نشان داد بین میانگین زاویه شروع حرکت (SA) و شاخص انحنای بیشینه (PCI) ارتباط بسیار خوبی وجود دارد. بطوری که ضریب همبستگی بین این دو شاخص برابر $(r(11) = 0,81, p < 0,01)$ بود.

۳) زمان واکنش^۱: زمان بین ارائه هدف تا آغاز حرکت، با دقت یک میکروثانیه.

۴) مدت حرکت^۲: فاصله زمانی بین شروع حرکت تا پایان حرکت، با دقت یک میکروثانیه.

ابزار مورد استفاده برای اجرای دستکاری های تجربی و اندازه گیری متغیرهای مورد نظر، دستگاه ثبت و تحلیل حرکت های دویعدی دست انسان در محیط نمایش مجازی^۳ بود، که توسط پژوهشگر و همکارانش (قبادی و عظیمی) در هسته دینامیک، رباتیک شهرک علمی تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان طراحی و ساخته شده است. دستگاه مورد نظر طوری ساخته شده است که شرکت کننده روی یک صندلی مخصوص با قابلیت تغییر ارتفاع می نشیند. دستگاه مورد نظر طوری طراحی شد که شرکت کننده تنها قابلیت انجام حرکت با دو درجه آزادی در صفحه افقی (حرکت خم و راست کردن^۴ افقی شانه و آرنج) را داشته باشد. شرکت کننده پس از گرفتن دستگیره دستگاه وارد یک محیط مجازی می شود که در آن موقعیت مج و مساعد به همراه اهداف روی صفحه نمایشگر (در ارتفاع یک متری و تقریباً عمود بر خط دید فرد) بدون تاخیر^۵ ظاهر می شود.

۱. Reaction Time: RT

۲. Movement Time: MT

۳. Manipulandum

۴. Horizontal Flexion - Extension

۵. Online



شکل ۱. دستگاه ثبت و تحلیل حرکات دوتعدی دست انسان در محیط نمایش مجازی و نحوه ی عمل آزمودنی ها.

این پژوهش بصورت میدانی انجام شد که کلیه مراحل جمع آوری اطلاعات آن در محل آزمایشگاه دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه اصفهان انجام گرفت. به منظور در نظر گرفتن جنبه‌های اخلاقی و انسانی انجام پژوهش، پیش از شروع آزمایش‌ها، شرکت‌کننده‌ها اطلاعاتی در مورد هدف تحقیق، ابزار، نحوه اجرا و ... دریافت کردند. در جلسه آزمون دستورالعمل‌های آموزشی مربوط به نحوه انجام تکلیف آزمایشگاهی در اختیار هر آزمودنی قرار گرفت. روش کلی اجرای آزمایش‌ها برای تمام آزمایش‌ها به این ترتیب بود که، هر شرکت‌کننده برای انجام آزمایش، شرکت‌کننده باید ساعد خود را روی محل تعبیه شده برای این عضو قرار می‌داد (شکل ۲). سپس دستگیره عمودی دستگاه را به حالت مشتم در دست می‌گرفت. پس از آن، کاربر بندهای تعبیه شده برای مهار حرکت مچ را بسته، با اندازه دست تنظیم و محکم می‌نمود. در ادامه، کمربندهای صندلی نیز تنظیم و بسته می‌شد. این کمربندها بدین جهت استفاده می‌شد تا کلیه حرکات‌های احتمالی داوطلب از ناحیه مچ و تنه مهار شود. ارتفاع صندلی مورد نظر نیز به گونه‌ای تنظیم می‌شد که بازو در حالت افقی (زاویه آبداکشن ۸۵-۹۰ درجه) قرار گیرد. کلیه اقدامات فوق به این جهت انجام گرفت تا دست تنها دو درجه آزادی (دوران افقی در مفاصل شانه و ساعد) داشته باشد.

پس از اعلام آمادگی شرکت‌کننده، کاربر گزینه شروع دسته کوشش و سپس ورود به محیط مجازی را انتخاب می‌نمود. شرکت‌کننده از این به بعد در محیط مجازی مچ دست خود را بصورت یک حلقه قرمز رنگ (قطر ۱۸ mm) و ساعد را به شکل یک میله صورتی (قطر ۱۰ mm) که به آن حلقه متصل است مشاهده می‌نمود. او موظف بود ابتدا دست خود را به دایره آبی رنگی (قطر ۲۰ mm) که در وسط فضای کاری ظاهر می‌شد برساند. زمانی که مچ برای مدت زمان مختصری (۲۵۰ msec) روی این دایره باقی ماند، رنگ این دایره از آبی به سبز تغییر می‌کرد. به مجرد سبز شدن دایره مرکزی، عملاً شمارش تعداد کوشش‌ها و ثبت کلیه ویژگی‌های مورد نظر آغاز می‌شد. همزمان با سبز شدن این دایره، یکی از اهداف دوازده گانه، که آنها نیز دایره‌هایی هم اندازه و هم شکل دایره مرکزی بودند، در پیرامون فضای کاری ظاهر می‌شد. آزمودنی باید با حداقل

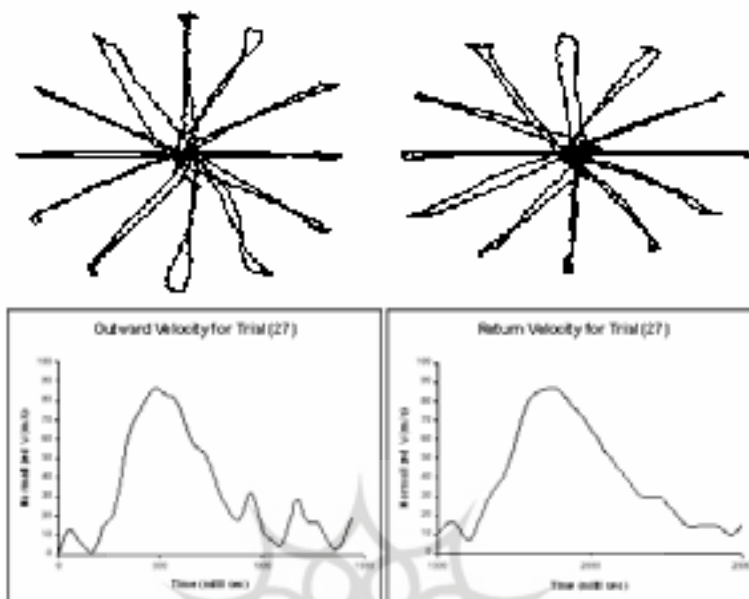
سرعت 60 m/s و دقت، مچ دست خود را به مکان هدف برساند (حرکت به سمت خارج^۱). وقتی مچ دست به دایره هدف رسید و به مدت 250 msec متوقف ماند، رنگ آن از آبی به سبز تغییر خواهد کرد. پس از سپری شدن زمان توقف، رنگ سبز دایره هدف ناپدید می‌شد که علامت این بود که آزمودنی باید با حداکثر سرعت و دقت حرکت بازگشت^۲ به مرکز را انجام دهد. آزمودنی باید پس از رسیدن به دایره مرکزی دوباره مچ دست خود را به میزان 250 msec روی این نقطه نگه دارد تا یکی دیگر از هدف‌ها روی محیط دایره (به قطر 320 mm) ظاهر شود. رسیدن به دایره مرکزی پایان یک کوشش محسوب می‌شد. زمان‌بندی و طریقه ظهور هدف‌ها در کوشش‌های بعدی نیز عیناً به همین منوال بود. در هر دسته کوشش تعداد ظهور هدف‌های پیرامونی بصورت مساوی ولی بصورت شبه تصادفی (در دو کوشش پیاپی هدف در یک نقطه ارائه نمی‌شد) بود. هر آزمودنی در کل 288 کوشش را در زمان تقریبی 30 دقیقه انجام داد. دو دسته 48 کوششی ابتدایی به عنوان کوشش‌های تمرینی در نظر گرفته شد و در تجزیه و تحلیل‌ها از اطلاعات آنها استفاده نشد. کوشش‌های اصلی، پس از کوشش‌های گرم کردن اجرا شد که شامل 4 دسته 48 کوششی بود.

داده‌های حاصل از دستگاه ثبت و تحلیل حرکات دوبعدی دست انسان در محیط نمایش مجازی با تواتر 100 Hz جمع آوری شد. برای محاسبه سرعت از روش مشتق‌گیری عددی استفاده شد. پس از محاسبه سرعت، مقادیر حاصل به وسیله روش مورد استفاده توسط اتکسون و هولرباخ (۳) نرمالیزه و در نهایت نویز زدایی شد. برای از بین بردن نویز موجود در این داده‌ها، فیلتر دیجیتالی پایین‌گذر باترورث^۴، با تواتر قطع 40 Hz ، با دوبار گذر از فیلتر^۵ و با تاخیر فاز صفر^۶ (۵۳)، طراحی و اجرا شد. برای انجام تحلیل‌های آماری، از تحلیل واریانس اندازه‌های تکراری، با عامل‌های تکرار متفاوت استفاده شد. در مواردی نیز که نتایج تحلیل واریانس معنادار شد، از مقایسه‌های پس از تجربه به روش کمترین اختلاف معنادار^۷، استفاده شد. برای تعیین ضریب همبستگی بین شاخص‌های انحنای خط سیر نیز از ضریب همبستگی گشتاوری پیرسون استفاده شد. سطح معناداری نیز در تمام آزمون‌های آماری 0.05 در نظر گرفته شد.

سینماتیک حرکت

نتایج نشان داد، در تمام حرکات‌های انجام شده، نمودار مکان-زمان حرکات‌های رفت و برگشت دارای یک الگوی عمومی مشترک است (شکل ۴، بالا). در این دو شکل، خط سیر حرکات به خط راست بسیار نزدیک و تقریباً یکنواخت است. نتایج توصیفی نشان داد، هم برای حرکات‌های رفت و هم کوشش‌های برگشت میزان انحراف از خط مستقیم در حدود 10% فاصله دو هدف بوده است ($PCI=10\%$).

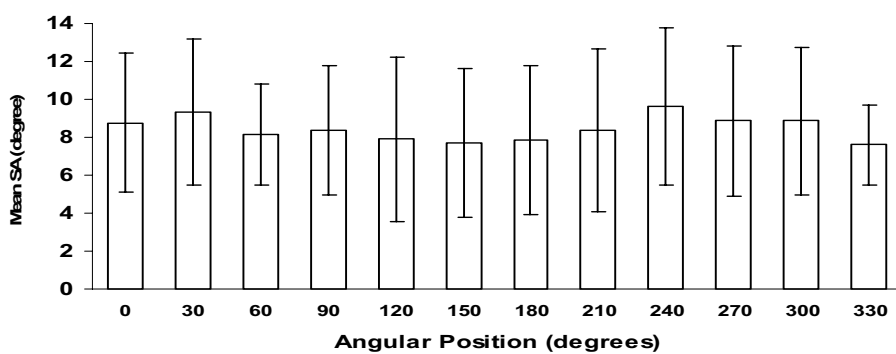
۱. Outward Movement
۲. Return Movement
۳. Low-Pass Butterworth Filter
۴. Cut of Frequency
۵. Second-Order (Dual Pass)
۶. Zero-Lag
۷. Least Significant Difference: LSD



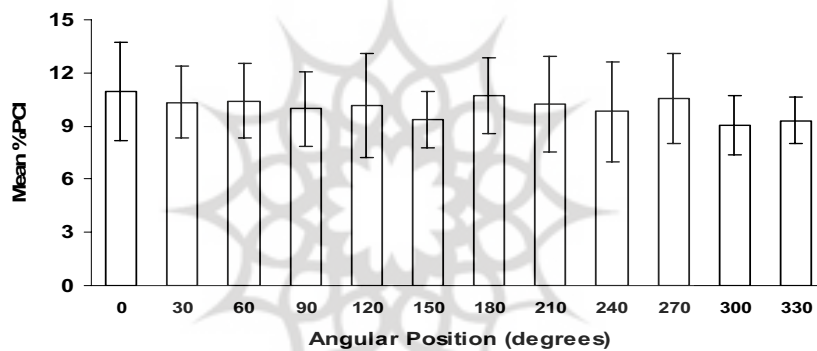
شکل ۲. بالا: نمودار عمومی خط سیر حرکت های رفت (چپ) و برگشت (راست) در ۱۲ نقطه ی فضای کاری. پایین: نمودار سرعت - زمان حرکت دست در حرکت های رفت (چپ) و برگشت (راست)

یک نمونه از نمودارهای سرعت - زمان حرکت های انجام شده در بخش تحتانی شکل (۴) ترسیم شده است. این دو نمودار نیز دارای یک ویژگی مشترک هستند. نمودار حرکت رفت (چپ) و بازگشت (راست) تنها دارای یک نقطه پیشینه، و شکل کلی هر دو نمودار زنگوله ای و تقریباً متقارن است. بنابراین خط سیر مستقیم و نمودار سرعت - زمان با یک نقطه پیشینه، زنگوله ای و متقارن را می توان جزء ویژگی های جوهری حرکت های مورد نظر برشمرد. برای پیدا کردن نظام حاکم بر این تغییرات، لازم بود نتایج توصیفی ارائه شده در این بخش بصورت استنباطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. لذا در ادامه در بخش های مجزا، اثر متغیرهای مستقل اعمال شده، بر متغیرهای وابسته تعریف شده تحلیل شده است.

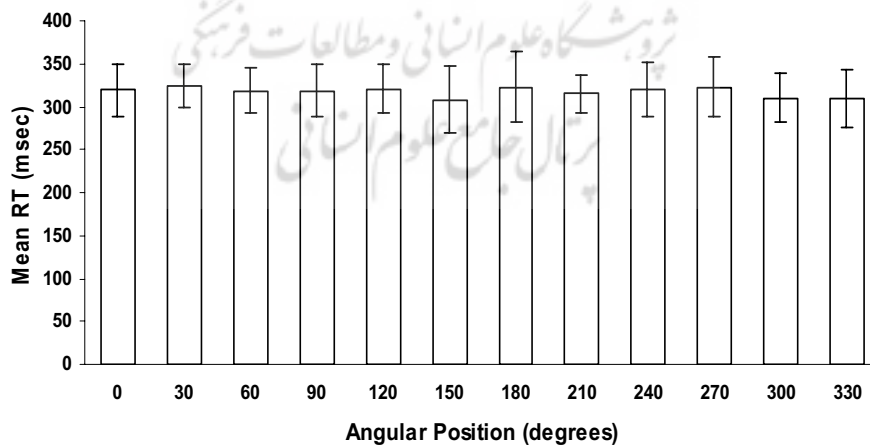
سوالی که در این قسمت پاسخ داده شده است این است که، آیا مکان ارائه هدف تاثیری بر انحناي خط سیر و شاخص های برنامه ریزی دارد یا خیر؟ به این منظور اثر زاویه ارائه هدف بر شاخص های دوگانه خط سیر و زمان واکنش و زمان حرکت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در کل ۱۲ هدف (با چیدمان ساعتی و تفاوت زاویه ای ۳۰ درجه) فضایی کاری ارائه شد. بنابراین ۱۲ سطح برای متغیر مستقل مورد نظر متصور بود. این سطوح عبارتند از زاویه ۰ (صفر مثلثاتی یا ساعت ۳)، ۳۰، ۶۰، ... و در انتها ۳۳۰ درجه (ساعت ۴). اثر مکان ارائه هدف بر SA، RT، PCI و MT به ترتیب در شکل های ۵ تا ۸ رسم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، این شاخص ها در سطوح مختلف مکان زاویه ای ارائه هدف (محور افقی نمودار)، تغییر پذیری منظمی ندارد.



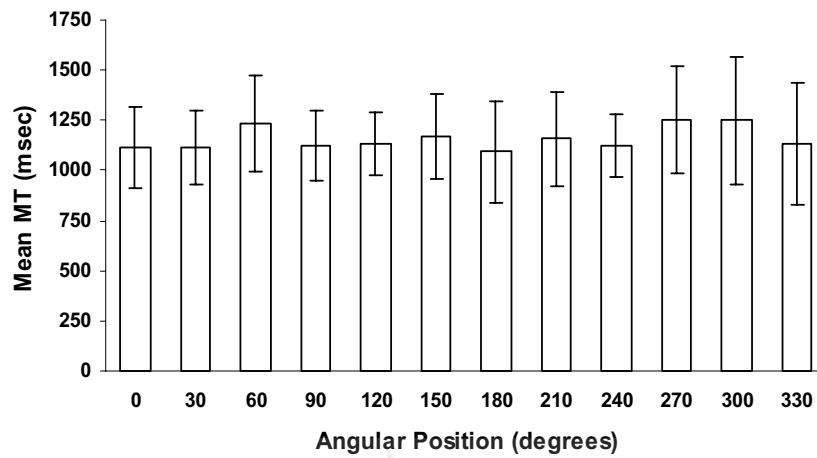
شکل ۳. اثر مکان زاویه ای ارائه ی هدف بر SA.



PCI



RT



. MT

. í

براي بررسی اثر زاویه ارائه هدف بر SA ، PCI ، RT و MT، از تحلیل واریانس اندازه‌هاي تکراري، با عامل تکرار مکان زاویه‌اي (داراي ۱۲ سطح)، استفاده شد. نتایج تحلیل‌هاي انجام شده (جدول ۱) نشان می‌دهد که، اثر مکان زاویه‌اي بر هیچ کدام از متغیرهاي وابسته مورد بررسی معنادار نشده است ($P > 0,05$).

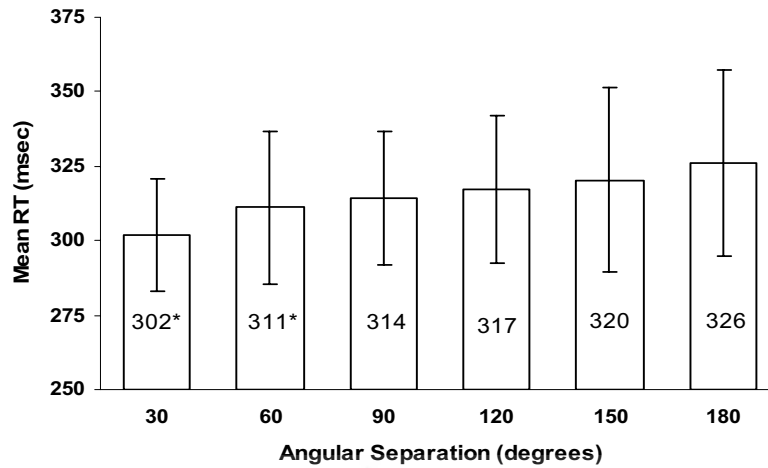
MT RT · PCI · SA

. è

Sig.	F	MS	df	SS	منابع تغییر	
0,76	0,67	۴,۶۳	۱۱	۵۰,۸۹	مکان ارائه ی هدف	SA
		۶,۸۷	۱۱۰	۷۵۶,۱۲	خطای مکان ارائه ی هدف	
0,۳۳	۱,۱۵	۳,۸۳	۱۱	۴۲,۱۴	مکان ارائه ی هدف	PCI
		۳,۳۴	۱۱۰	۳۶۷,۲۵	خطای مکان ارائه ی هدف	
0,۷۷۷	0,۶۵۶	۳۲۲,۹۰۳	۱۱	۳۵۵۱,۹۴	مکان ارائه ی هدف	RT
		۴۹۲,۳۶۷	۱۱۰	۵۴۱۶۰,۳	خطای مکان ارائه ی هدف	
0,۲۰۹	۱,۳۴۷	۳۵۱۶۲,۷۷۸	۱۱	۳۸۶۷۰,۵۵۶	مکان ارائه ی هدف	MT
		۲۶۰۹۹,۸۳۹	۱۱۰	۲۸۷۰۹۸۲,۲۷۳	خطای مکان ارائه ی هدف	

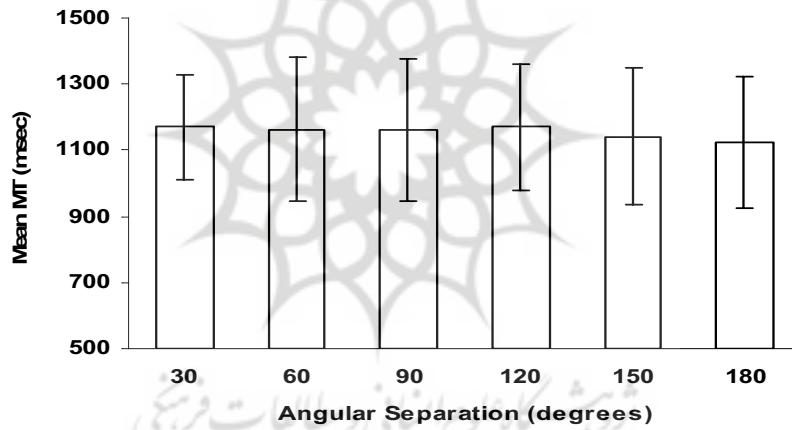
⊖ ⊖ ⊖

⊖ ⊖ ⊖ ⊖



. RT

. ð



. MT

. ç

برای بررسی اثر جدایی زاویه بر شاخص‌های مورد نظر، از تحلیل واریانس اندازه‌های تکراری، با عامل تکرار جدایی زاویه‌ای (دارای ۶ سطح)، استفاده شد. نتایج تحلیل واریانس انجام شده (جدول ۲) نشان داد، اثر جدایی زاویه بر SA ، PCI و MT معنادار نشده است ($P > 0.05$). در حالی که این اثر برای متغیر وابسته RT معنادار شده است. مقایسه‌های پس از تجربه به روش کمترین اختلاف معنادار نشان داد وقتی جدایی زاویه‌ای دو هدف متوالی ۱۸۰ درجه بوده است، بین میانگین زمان واکنش (۳۲۶،۰۱۴) به میزان معناداری بیشتر از شرایط جدایی زاویه‌ای ۳۰ (۳۰۱،۷۳۳) و ۶۰ (۳۱۱،۰۴۶) درجه بوده است ($P < 0.05$).

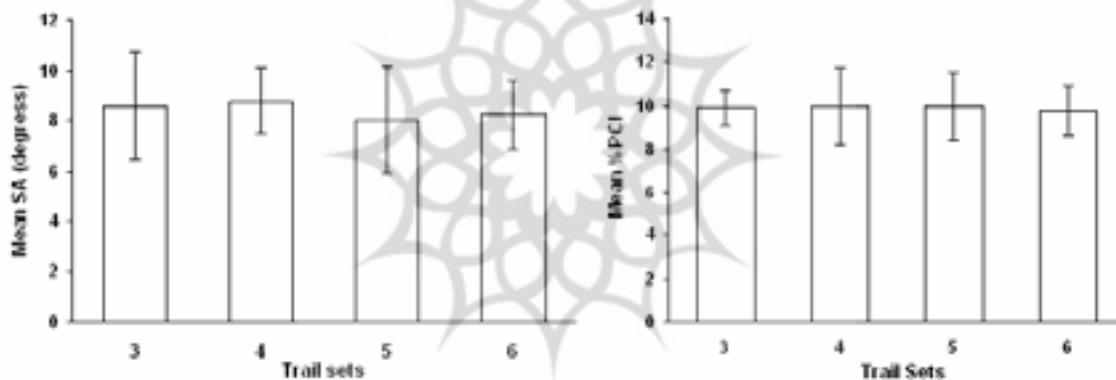
SA · PCI · RT · MT

. é

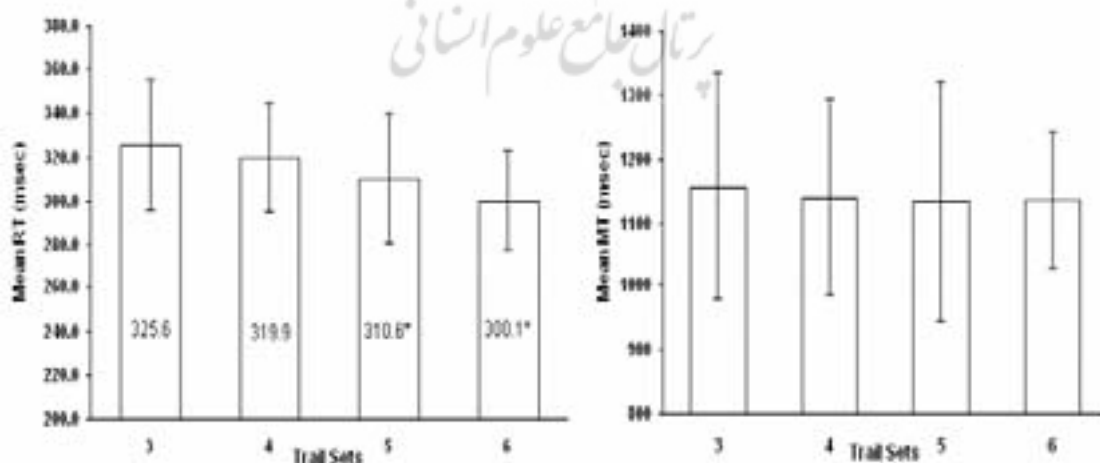
Sig.	F	MS	df	SS	منابع تغییر
۰،۶۱	۰،۷۳	۱،۶۸	۵	۸،۳۹	جدایی زاویه‌ای
		۲،۳۱	۵۰	۱۱۵،۵۰	خطای جدایی زاویه‌ای

۰,۱۹	۱,۵۵	۲,۱۳	۵	۱۰,۶۵	جدایی زاویه ای	PCI
		۱,۳۷	۵۰	۶۸,۶۹	خطای جدایی زاویه ای	
۰,۰۳۷	۲,۵۹۷	۷۶۱,۸۴۵	۵	۳۸۰۹,۲۲۴	جدایی زاویه ای	RT
		۲۹۳,۴۰۷	۵۰	۱۴۶۷۰,۳۲۹	خطای جدایی زاویه ای	
۰,۲۲۶	۱,۶۶۲	۱۳۴۵۰,۹۵۴	۱	۱۳۴۵۰,۹۵۴	جدایی زاویه ای	MT
		۸۰۹۴,۷۳۶	۱۰	۸۰۹۴۷,۳۶۳	خطای جدایی زاویه ای	

در این قسمت اثر تکرار دسته کوشش‌ها (تمرین) بر شاخص‌های انحنا (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که تفاوت زیادی بین میانگین شاخص‌های SA و PCI بین دسته کوشش‌های سوم تا ششم دیده نمی‌شود. همین‌الگوی نتایج در شکل ۱۴ الف (شاخص MT) نیز دیده می‌شود. در حالی که به نظر می‌رسد با ادامه تمرین، میانگین زمان واکنش آزمودنی‌ها در حین انجام حرکت‌های نشانه‌گیری کوتاه‌تر شده است (در شکل ۱۴ ب).



شکل ۱۴ الف. میانگین شاخص SA (مطالعات فرگنی)



شکل ۱۴ ب. میانگین شاخص RT (مطالعات فرگنی)

برای بررسی اثر تمرین بر شاخص‌های مورد نظر، از تحلیل واریانس اندازه‌های تکراری، با عامل تعداد دسته کوشش‌ها (۴ سطح) استفاده شد. نتایج تحلیل واریانس انجام شده (جدول ۳) نشان داد، اثر دسته کوشش‌ها بر SA، PCI و MT معنادار نشده است ($P > 0,05$). در حالی که این اثر برای متغیر وابسته RT معنادار شده است. نتایج آزمون تعقیبی کمترین تفاوت معنادار نشان داد که میانگین زمان واکنش دسته کوشش‌های پنجم (۳۱۰,۵۹۳) و ششم (۳۰۰,۰۷۰) کوتاه‌تر از میانگین زمان واکنش دسته کوشش سوم (۳۲۵,۵۵۰) بوده است ($P < 0,05$).

· PCI · SA

.ë

MT RT

Sig.	F	MS	df	SS	منابع تغییر	
۰,۴۹۵	۰,۸۱۷	۱,۲۸۶	۳	۳,۸۵۸	دسته کوشش	SA
		۱,۵۷۴	۳۰	۴۷,۲۲۰	خطای دسته کوشش	
۰,۹۷۱	۰,۰۷۸	۰,۰۷۷	۳	۲۳۲.	دسته کوشش	PCI
		۰,۹۹۵	۳۰	۲۹,۸۴۱	خطای دسته کوشش	
۰,۰۰۳	۵,۹۶۰	۱۳۷۱,۴۸۴	۳	۴۱۱۴,۴۵۲	دسته کوشش	RT
		۲۳۰,۱۱۱	۳۰	۶۹۰۳,۳۲۹	خطای دسته کوشش	
۰,۹۷۲	۰,۰۷۶	۱۲۷۳,۹۱۴	۳	۳۸۲۱,۷۴۱	دسته کوشش	MT
		۱۶۷۰۱,۹۶۹	۳۰	۵۰۱۰۵۹,۰۶۷	خطای دسته کوشش	

نتایج حاصل از سینماتیک حرکت نشان داد که نمودار سرعت حرکت‌های نقطه به نقطه، زنگوله‌ای (دارای تنها یک بیشینه) و تقریباً متقارن است. مسیرهایی که آزمودنی‌ها برای رسیدن به هدف انتخاب می‌کردند نیز دارای الگوی خاصی بود. این الگوی خاص در SA و PCI تمام نقاط فضا یکسان بود و تغییرپذیری منظمی در آن دیده نشد. تحقیقات قبلی نیز نشان داده‌اند که، منحنی خط سیر حرکت‌های نشانه‌گیری ساده به خط راست بسیار نزدیک است (۱؛ ۲؛ ۴؛ ۱۴؛ ۳۰) و نمودار سرعت سهمی^۱ و یکنواخت است (۳؛ ۴۱؛ ۶؛ ۷). ویژگی آنچه در این آزمایش بدست آمد این بود که با استفاده از ساز و کار دوران نقطه هدف، امکان انجام حرکت‌های مورد نظر در تمام بخش‌های فضایی کاری میسر شد. علاوه بر آن با انتخاب شبه تصادفی مکان ارائه هدف احتمال پیش بینی از آزمودنی‌ها گرفته شد. علاوه بر آن نشان دادیم که شاخص‌های خط سیر (SA؛ PCI) تابع تمرین نیست. بنابراین می‌توان اینگونه استنباط نمود که نحوه تغییر این شاخص‌ها در حین انجام حرکت‌های نشانه‌گیری ساده در سطح افق جزء ذات برنامه ریزی این گونه از حرکت‌ها بوده است. برخی از تحقیقات نشان داده‌اند، الگوی مشاهده شده در حرکت‌های مورد نظر، در بخش‌هایی از فضا که مستلزم استفاده از کرانه‌های زاویه‌ای مفاصل است، نقض می‌شود (۱۷؛ ۲۴؛ ۵۰). دامنه حرکت استفاده شده در پژوهش‌های مورد نظر زیاد و در اغلب آنها

ابزار ثبت حرکت باعث ایجاد محدودیت‌هایی در عمل شرکت‌کننده‌ها شده است. قاعدتاً اگر دامنه حرکت زیاد باشد (در حدود طول دست حالت کشیده)، برای رسیدن به نقطه‌هایی که در دورترین یا نزدیکترین نقطه نسبت به بدن قرار دارند، فرد مجبور است حرکت‌هایی با حداکثر گشتاور زاویه‌ای تولید نماید. این شکل از حرکت به هیچ وجه اقتصادی نیست و اصل کمترین انرژی مصرفی را نقض می‌کند (۲). در تحقیق حاضر، ابزار ساخته شده برای اجرا و ثبت عملکرد آزمودنی‌ها، دارای این ویژگی بود که مقاومتی در برابر حرکت دست آزمودنی‌ها ایجاد نمی‌کند. مهم‌تر از آن، امکان تغییر دامنه حرکت در آن لحاظ شده بود. در پژوهش مقدماتی نیز دامنه حرکت (۱۰۰ میلی‌متر) به گونه‌ای انتخاب شد تا آزمودنی‌ها در انجام حرکت، به ویژه در کرانه‌ها، با هیچ مشکل و مزاحمتی روبرو نشوند و مجبور نباشند از کرانه‌های بالا یا پایین زاویه‌های مفصل‌های آرنج و بازوی خود استفاده نمایند. همچنین، ارائه اهداف و نیز فراهم نمودن بازخورد افزوده، بصورت مجازی و بدون تاخیر صورت گرفت. لذا، این امکان فراهم شد تا آزمودنی‌ها بیشترین سود را از تلفیق بازخوردهای درونی و بازخورد افزوده ببرند. دسمورجت و همکاران (۹) در مروری که بر نقش اطلاعات حس حرکت و بینایی در حرکت‌های نشانه‌گیری انجام داده‌اند، نتیجه‌گیری کرده‌اند که، اگر تاخیری در ارائه بازخوردهای حسی (بویژه از نوع بینایی) وجود داشته باشد، فرد نمی‌تواند درک دقیقی از اطلاعات بدست آمده از منابع بازخورد درونی (گیرنده‌های عمقی مفصلی، دوک‌های عضلانی و) داشته باشد. تحقیقات دامنه‌دار دیگری نیز موجود است که این نتیجه‌گیری را تایید می‌کنند (۱۰؛ ۴۰؛ ۲۶؛ ۱۶). انسان در هنگام انجام حرکت دسترسی، همزمان از اطلاعات درونی و بازخورد افزوده برای انتخاب مسیر مناسب استفاده می‌نماید. اگر اطلاعاتی که به سامانه ادراکی - حرکتی می‌رسد همخوانی لازم را نداشته باشد، به احتمال زیاد در ساز و کار انتخاب مسیر تغییراتی حاصل می‌شود که منجر به گزینش مسیرهایی می‌شود که از الگوی حرکت‌های مستقیم الخط تخطی می‌نماید.

در بخش دیگری از تحقیق، شاخص‌های برنامه‌ریزی (RT و MT) بررسی شد. حرکت‌های انجام شده در نقاط مختلف فضا یکسان بود. علاوه بر این با ادامه تمرین نیز تغییر محسوس در آنها مشاهده نشد. طبق قانون فیتز، تعیین‌کننده‌های زمان حرکت، دامنه حرکت و عرض هدف هستند (۱۳). در این تحقیق چیدمان اهداف دوازده‌گانه بر روی دایره‌ای با قطر (دامنه حرکت) ثابت انجام شد. اندازه هدف نیز در حین انجام تکلیف آزمایشگاهی ثابت نگه داشته شد. همچنین معیار سرعت سهل الوصول و در دامنه‌ای مناسب انتخاب شد و در طول انجام همه حرکت‌ها ثابت در نظر گرفته شد. بنابراین، به استناد قانون مبادله سرعت - دقت (۱۳)، نتیجه حاصل دور از انتظار نبوده است. زمان واکنش معرف پردازش‌های مرکزی انجام شده در سطوح سلسله مراتب برنامه‌ریزی و انتخاب مسیر است. نتایج نشان داد، RT حرکت به تمام نقاط فضا یکسان بوده است. محرك (ارائه هدف) و پاسخ مورد نظر (انجام حرکت نشانه‌گیری) در تمام نقاط فضا یکسان بود. بنابراین نباید تفاوتی بین زمان واکنش حرکت‌هایی با مکان زاویه‌ای متفاوت مشاهده می‌شد، که چنین نیز شد. با این وجود با ادامه تمرین، زمان واکنش آزمودنی‌ها بطور کلی کاهش یافته است. آنچه حاصل شد با قانون تمرین همخوانی کامل دارد. بر اساس این اصل (۳؛ ۴؛ ۸) رابطه بین لگاریتم تعداد کوشش‌های تمرینی و لگاریتم امتیاز داده شده به فرد در تکلیف انجام شده خطی است. می‌توان مهارت را بر اساس کاهش خطا، افزایش سرعت یا کاهش زمان پردازش اطلاعات (RT) تعریف عملیاتی نمود. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که با ادامه تمرین، مهارت افزایش یافته است و به احتمال زیاد برخی از فرآیندهای برنامه‌ریزی مسیر با ادامه تمرین

و آشنایی بیشتر فرد با تکلیف سریع‌تر انجام شده است. یک احتمال دیگر این است که با ادامه تمرین، برخی از مراحل پردازش اطلاعات پیش از ارائه محرک انجام شده است. می‌توان این طور نتیجه‌گیری کرد که آزمودنی‌ها، در شرایطی که هیچ دستورالعملی در مورد انتخاب مسیر دریافت نکرده‌اند، برای رسیدن به مکان هدف‌های مورد نظر، هر بار تنها از یک معیار (قید) برای انتخاب مسیر مناسب استفاده کرده‌اند. در اکثر مدل‌هایی که در زمینه برنامه‌ریزی حرکت دست پیشنهاد شده است (۱۴؛ ۴۹؛ ۱۸) اینطور فرض شده است که نظام حرکتی انسان برای انتخاب مسیر مناسب از بین تقریباً بی‌نهایت مسیر ممکن، از یک شاخص هزینه‌ای استفاده می‌کند. نتایج تحقیق انجام شده، از این نظر، پیش‌بینی‌های مدل کمترین جرک (۱۴) را مورد تایید قرار می‌دهد. مدل کمترین جرک پیش‌بینی می‌کند، مسیرهای حاصل از مدل کمترین جرک دارای سه ویژگی باشد: (۱) خط سیر مستقیم، (۲) بدون تغییر در مدت زمان حرکت و (۳) نمودار سرعت متقارن (۱۲؛ ۲۳). این پیش‌بینی‌ها با نتایج حاصل از تحقیق حاضر همخوانی کامل دارد.

یافته‌های تحقیق برخلاف مطالعه‌های قبلی (۱۹)، شواهد جدیدی ارائه داد مبنی بر اینکه اثرهای مشاهده شده بطور کلی به دیگر مناطق فضای کاری تعمیم (انتقال) پیدا کرده است. این نتیجه‌گیری مهم نشان دهنده این است که شاخص هزینه‌ای مورد نظر برای انتخاب خط سیر حرکت در سطوح بالایی سلسله مراتب کنترل حرکت اعمال شده است. در نوشته‌های آنو و همکاران (۴۸)، گومی و گوتلیب (۱۵) می‌توان شواهدی مبنی بر طرح‌ریزی در فضای دینامیکی (درونی) را مشاهده نمود. دلیل این تفاوت‌ها را می‌توان در شکل‌گیری مدل درونی جستجو نمود. اگر مدل درونی به خوبی شکل گرفته باشد و یا انتقال این مدل به دیگر نقاط فضای کاری از قدرت کافی برخوردار باشد، نظام ادراکی - حرکتی قادر است با تغییرهایی که در خواص دینامیکی و سینماتیکی ایجاد می‌شود خود را سازگار نماید و در نتیجه‌ی این تغییرات، مسیر بهینه، تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد کرد. در غیر این صورت پیامد تغییر این شرایط، مشاهده تغییر در شکل مسیر خواهد بود. به احتمال زیاد ریشه مشکل عدم همخوانی بین نتایج پژوهش حاضر با برخی از تحقیقات گذشته در یک یا ترکیبی از این موارد نهفته است: (۱) تفاوت در درجه پیچیدگی و تنظیم‌های تکلیف‌های آزمایشگاهی، (۲) تعداد کوشش‌های یادگیری و در نهایت (۳) دستورالعمل‌های آموزشی ارائه شده پیش و/یا در هنگام اعمال شرایط آزمایشگاهی (متغیر مستقل): تغییر ویژگی‌های سینماتیکی یا دینامیکی).

بر اساس تعریف ویژگی جوهری و ویژگی ظاهری، نمودار خط سیر مستقیم الخط، نمودار سرعت زنگوله‌ای و متقارن، ثابت بودن SA، PCI و MT در نقاط مختلف فضا، با خاصیت تعمیم‌پذیری سطح بالا، را می‌توان از جمله ویژگی‌های جوهری حرکت‌های نشانه‌گیری ساده در سطح افق (با دو درجه آزادی) نام برد. لازمه انجام حرکت دسترسی در نقاط مختلف فضا، تغییر پیکربندی زاویه‌های دست است. انتقال زاویه‌های مفصل نیز غیر خطی است (۱۹؛ ۴). از این رو انتقال خطوط سیری که در مختصات دکارتی تعریف شده است به دیگر مناطق فضای کاری از نظر محاسباتی بسیار پیچیده و مشکل است (۲۸). پیچیدگی محاسباتی با میزان انتقال رابطه معکوس دارد (۲۹). به بیان دیگر، هر چه زاویه دو هدف پیاپی بیشتر باشد، تغییراتی که در زاویه‌های مفاصل آرنج و شانه باید اعمال شود بیشتر و در نتیجه بار محاسباتی برنامه‌ریزی مسیر بالا خواهد رفت. بنابراین پیش‌بینی شد تغییرپذیری زمان واکنش در سطوح جدایی زاویه‌ای متوسط ناچیز و در سطوح جدایی زاویه‌ای بالاتر زیاد باشد. در حالی که زمان واکنش حرکت‌هایی که به

سمت نقاط مختلف فضا انجام می‌شد یکسان بود، با این وجود، مطابق پیش بینی بعمل آمده، با افزایش زاویه ی جدایی بین دو هدف متوالی، زمان واکنش نیز تقریباً به همان نسبت افزایش یافت. این پدیده نشانگر تغییر پردازش های انجام شده در وضعیتی هایی با جدایی زاویه ای متفاوت است. مهم تر از همه، زمان واکنش با ادامه تمرین کاهش یافت. بنابراین زمان واکنش تابع شرایط اجرایی تکلیف بوده است. بنابراین به احتمال زیاد می‌توان زمان واکنش را جزء ویژگی های ظاهری حرکت های مورد نظر معرفی نمود که تغییرات آن تا سطوح پایین تر سلسله مراتب برنامه ریزی و کنترل حرکت (سطح اندام مجری) نیز ادامه می‌یابد. آنچه ارائه شد تنها نمونه کوچکی از میان مجموعه ای پیچیده از ساز و کارهای مورد استفاده در نظام ادراکی - حرکتی ما، برای مواجه شدن با دامنه ی وسیعی از قیود سینماتیکی حاکم بر فعالیت ها و حرکت های روزمره است. علاوه بر این، نتایج نشان دهنده قدرت و در عین حال، انعطاف پذیری دستگاه ادراکی حرکتی انسان در هنگام روبرو شدن با شرایط مختلف حرکتی است.

:

۱. Abend, W., Bizzi, E., & Morasso, P. (۱۹۸۲). Human Arm Trajectory Formation. *Brain*, ۱۰۵: ۳۳۱-۳۴۸.
۲. Alexander, R. Mc N. (۱۹۹۷). A Minimum Energy Cost Hypothesis for Human Arm Trajectories. *Biological Cybernetics*, ۷۶, ۹۷-۱۰۵.
۳. Atkeson, C. G. & Hollerbach, J. M. (۱۹۸۵). Kinematic Features of Unrestrained Arm Movements. *Journal of Neuroscience*, ۵, ۲۳۱۸-۲۳۳۰.
۴. Barreca, D. M. & Guenther, F. H. (۲۰۰۱). A Modeling Study of Potential Sources of Curvature in Human Reaching Movements. *Journal of Motor Behavior*, ۳۳, ۳۸۷-۴۰۰.
۵. Bernstein, N. (۱۹۶۷). The Coordination and Regulation of Movements. London: Pergamon.
۶. Biegstraaten, M. (۲۰۰۵). The Role of Object Contact in Pointing and Grasping. Unpublished Doctoral Dissertation, University of Rotterdam, Netherland.
۷. Biegstraaten, M., Smeets, J.B.J. & Brenner, E. (۲۰۰۳). The Influence of Obstacles on the Speed of Grasping. *Experimental Brain Research*, ۱۴۹, ۵۳۰-۵۳۴.
۸. Crossman, E. R. F. W. (۱۹۵۹). A Theory of the Acquisition of Speed Skill. *Ergonomics*, ۲, ۱۵۳-۱۶۶. In Grossberg, S., & Kuperstein, M. (۱۹۸۹). *Neural Dynamics of Adaptive Sensory-Motor Control: Expanded Edition*, Pergamon Press. USA.
۹. Desmurget, M., Pélisson, D., Rossetti, Y. & Prablanc, C. (۱۹۹۸). From Eye to Hand: Planning Goal-Directed Movements. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, ۲۲, ۷۶۱-۷۸۸.
۱۰. Domkin, D. (۲۰۰۵). Perception and control of upper limb movement: Insights gained by analysis of sensory and motor variability. Unpublished Doctoral Dissertation. Department of Surgical and Perioperative Sciences, Sports Medicine Unit, Umeå University and Centre for Musculoskeletal Research, University of Gävle, Umeå, Sweden.
۱۱. Elliot, D., Helsen, W. F., & Chua, R. (۲۰۰۱). A Century Later: Woodworth's (۱۸۹۹). Two Component Model of Goal-Directed Aiming. *Psychological Bulletin*, ۱۲۷, ۳۴۲-۳۵۷.
۱۲. Engelbrecht, S., E. (۲۰۰۱). Minimum Principles in Motor Control. *Journal of Mathematical Psychology*, ۴۵, ۴۹۷-۵۴۲.
۱۳. Fitts, P. M. (۱۹۵۴). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, ۴۷, ۳۸۱-۳۹۱.
۱۴. Flash, T. & Hogan, N. (۱۹۸۵). The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model. *The Journal of Neuroscience*, ۵, ۱۶۸۸-۱۷۰۳.
۱۵. Gomi, H. & Gottlieb, G. L. (۱۹۹۷). Joint Torque and EMG Pattern during Multijoint Arm Movements in Different Inertial-Viscosity Force Fields. In: ۲۷th Annual Meeting of the Society for Neuroscience. New Orleans, La: Soc. *Neurosciences*, Vol. ۲۳, Part ۲, P. ۲۰۹۵.

۱۶. Haggard, P. & Wolpert, D. M. (۲۰۰۵). Disorders of Body Scheme. To appear in: Higher-Order Motor Disorders, Ed. Freund, Jeannerod, Hallett & Leiguarda, Oxford University Press.
۱۷. Haggard, P. & Richardson, J. (۱۹۹۶). Spatial Patterns in the Control of Human Arm Movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, ۲۲(۱), ۴۲-۶۲.
۱۸. Harris, C. M. & Wolpert, D. M. (۱۹۹۸). Signal-Dependent Noise Determines Motor Planning. *Nature*, ۳۹۴, ۷۸۰-۷۸۴.
۱۹. Hogan, N., Bizzi, E., Mussa-Ivaldi, F.A. & Flash, T. (۱۹۸۷) Controlling MultiJoint Motor Behavior. In Pandolf, K., B. (Ed.), *Exercise and Sport Sciences Reviews*, (pp۱۵۳-۱۹۰). Macmillan Publication Co.: New York. USA.
۲۰. Hollerbach, J. M. & Atkeson, C. G. (۱۹۸۲). Characteristics of Joint-Interpolated Arm Movements. In Heuer, H. & Fromm, C. (Eds.), *Generation and modulation of action patterns*, (pp۴۱-۵۴). Berlin: Springer-Verlag. Germany.
۲۱. Hollerbach, J. M. & Flash, T. (۱۹۸۲). Dynamic Interactions between Limb Segments during Planar Arm Movement. *Biological Cybernetics*, ۴۴, ۶۷-۷۷.
۲۲. Hollerbach, J. M. (۱۹۸۲). Computers, Brains, and the Control of Movement. *Trends Neurosciences*, ۵, ۱۸۹-۱۹۲.
۲۳. Jordan, M. I. & Wolpert, D. M. (۱۹۹۹). Computational Motor Control. In Gazzaniga, M. (Ed.), *The Cognitive Neurosciences*, second edition, Cambridge: MIT Press.
۲۴. Kaminski, T. & Gentile A.M. (۱۹۸۶). Joint Control Strategies and Hand Trajectories in Multijoint Pointing Movements. *Journal of Motor Behavior*, ۱۸, ۲۶۱-۲۷۸.
۲۵. Kawato M. (۱۹۹۹). Internal Models for Motor Control and Trajectory Planning. *Current Opinion in Neurobiology*, ۹, ۷۱۸-۷۲۱.
۲۶. Kelso, J. A. S. (۱۹۷۹). Motor-sensory feedback formulations: Are we asking the right questions? *The Behavioral and Brain Sciences*, ۲, ۷۲-۷۳.
۲۷. Klein Breteler, M. D., Meulenbroek., R. G. J., & Gielen, S. C. A. M. (۲۰۰۲). An Evaluation of the Minimum-Jerk and Minimum Torque-Change Principles at the Path, Trajectory and Movement-Cost Levels. *Motor Control*, ۶, ۶۹-۸۳.
۲۸. Latash, M. L. (۱۹۹۳). *Control of Human Movements*. Champaign, IL: Human Kinetics. USA.
۲۹. Matsuoka, Y. (۱۹۹۸). *Models of Generalization in Motor Control*. Unpublished Doctoral Dissertation. University of Massachusetts, Amherst. USA.
۳۰. Mason, A.H., Walji, M.A., Lee, E.J. and MacKenzie, C.L. (۲۰۰۱). Reaching Movements to Augmented and Graphic Objects in Virtual Environments. *Human Factors in Computing Systems*. Proceedings CHI ۲۰۰۱, ۴۲۶-۴۳۳.
۳۱. Moore, S. P., & Marteniuk, R. G. (۱۹۸۶). Kinematic and Electromyographic Changes that Occur as a Function of Learning a Time-Constrained Aiming Task. *Journal of Motor Behavior*, ۱۸, ۳۹۷-۴۲۶.
۳۲. Morasso, P. (۱۹۸۱). Spatial Control of Arm Movements. *Experimental Brain Research*, ۴۲, ۲۲۳-۲۲۷.
۳۳. Morasso, P. (۱۹۸۳). Coordination Aspects of Arm Trajectory Formation. *Human Movements Science* (Amsterdam), ۲, ۱۹۷-۲۱۰.
۳۴. Nagasaki, H. (۱۹۸۹). Asymmetric Velocity Profiles And Acceleration Profiles Of Human Arm Movements. *Experimental Brain Research*, ۷۴, ۳۱۹-۳۲۶.
۳۵. Rosenbaum, D. A. (۱۹۹۱). *Human Motor Control*. San Diego: Academic Press. USA.
۳۶. Sabes, P. N. & Jordan M.I. (۱۹۹۷). Obstacle Avoidance and a Sensitivity Model of Motor Planning. *The Journal of Neuroscience* ۱۷, ۷۱۱۹-۷۱۲۸.
۳۷. Saltzman, E. (۱۹۷۹). Levels of Sensorimotor Representation. *Journal of Mathematical Psychology*, ۲۰, ۹۱-۱۶۳.
۳۸. Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (۲۰۰۵). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis* (fourth Ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
۳۹. Schneider, K. & Zernicke, R. F. (۱۹۸۹). Jerk-Cost Modulations During the Practice of Rapid Arm Movements. *Biological Cybernetics*, ۶۰, ۲۲۱-۲۳۰.
۴۰. Schönner, G. (۲۰۰۲). Dynamical Systems Approaches to Neural Systems and Behavior. In Smelser, N. J., and Baltes, P. B., editors, *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, pages ۱۰۵۷۱-۱۰۵۷۵, Oxford, Pergamon

٤١. Scott, S. (٢٠٠٤). Optimal Feedback Control and the Neural Basis of Volitional Motor Control. *Nature Review Neuroscience*, ٥, ٢٣٤_٢٤٦.
٤٢. Sergio, L.H. & Scott, S.H. (١٩٩٨). Hand and Joint Paths during Reaching Movements with and Without Vision. *Experimental Brain Research* ١٢٢, ١٥٧_١٦٤.
٤٣. Shadmehr, R & Mussa-Ivaldi F. A. (١٩٩٤). Adaptive Representation of Dynamics during Learning of a Motor Task, *Journal of Neuroscience*, ١٤, ٣٢٠٨_٣٢٢٤.
٤٤. Shadmehr, R. & Wise, S. P. (٢٠٠٥). Computational Neurobiology of Reaching and Pointing: A Foundation for Motor Learning. MIT Press, Cambridge, MA. USA.
٤٥. Smit, A. & van Gisbergen, J. (١٩٩٠). An Analysis of Curvature in Fast and Slow Human Saccades. *Experimental Brain Research*, ٨١, ٣٣٥_٣٤٥.
٤٦. Snoddy, G.S. (١٩٢٦). Learning and stability: A psychophysical Analysis of a Case of Motor Learning with Clinical Applications. *Journal of Applied Psychology*, ١٠, ١_٣٦. In Grossberg, S., & Kuperstein, M. (١٩٨٩). Neural Dynamics of Adaptive Sensory-Motor Control. Expanded Edition, Pergamon Press. USA.
٤٧. Soechting, J. F., & Lacquaniti, F. (١٩٨١). Invariant Characteristics of a Pointing Movement in Man. *Journal of Neuroscience*, ٧١٠_٧٢٠.
٤٨. Uno, Y., Imamizu, H., Gomi, H., & Kawato, M. (١٩٩٥). Space where Arm Trajectory is Planned: Evidence from Experiments in Altered Dynamics. In: Fourth Annual Meeting of Ibro World Congress of Neuroscience. Sapporo,
٤٩. Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (١٩٨٩). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement: Minimum torque change model. *Biological Cybernetics*, ٦١, ٨٩_١٠١.
٥٠. van Thiel, E., Meulenbroek, R. G. J., & Hulstijn, W. (١٩٩٨). Path Curvature in Workspace and in Joint Space: Evidence for Coexisting Coordinative Rules in Aiming. *Motor Control*, ٢, ٣٣٤_٣٥١.
٥١. Wiegner, A. W., & Wierzbicka, M. M. (١٩٩٢). Kinematic Models and Elbow Flexion Movements: Quantitative Analysis. *Experimental Brain Research*, ٨٨, ٦٦٥_٦٧٣.
٥٢. Wiesendanger, M. (١٩٩٨). Bernstein's Principle of Equal Simplicity and related Concepts. Bernstein, N. (١٩٣٥). The Problem of the Interrelation of Co-ordination and Localization. *Archiv Biologischeshik Nauk*. In. Latash. M L (Editor), Progress in Motor Control Volume ١. Bernstein's Traditions in Movement Studies (١٩٩٨.), Chapter ٥: Champaign, IL: Human Kinetics. pp. ١٠٥_١٢٦.
٥٣. Winter, D. A. (٢٠٠٥). Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Third Edition, Wiley, New York, USA.
٥٤. Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (١٩٩٤). Perceptual Distortion Contributes to the Curvature of Human Reaching Movements. *Experimental Brain Research*, ٩٨, ١٥٣_١٥٦.
٥٥. Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (١٩٩٥). Are Arm Trajectories Planned in Kinematics or Dynamic Coordinates? An Adaptation Study. *Experimental Brain Research*, ١٠٣, ٤٦٠_٤٧٠.
٥٦. Woodworth, R.S. (١٨٩٩). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, ٣, ١ (Monograph Supplement). In Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (٢٠٠٥). Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis (٤th Ed.). pp. ١٧٣, Champaign, IL: Human Kinetics.