

## Kinematical Modeling of the Writing Process using Model Predictive Control

M. Borjkhani<sup>1</sup>, F. Towhidkhah<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Instructor, School of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran, borjkhani@gmail.com

<sup>2</sup> Associate Professor, School of Biomedical Engineering, Cybernetic and biological modeling laboratory,  
Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

---

### Abstract

Writing is one of the high practiced and complex movement skills of human. Most of the proposed models for writing are bottom-up models, and therefore they could not reflect the biological aspects of movements in this process. Also there is not any model for illustrating the role of different parts of the brain in this task. In this paper we are going to describe some neurological and physiological aspects of the brain operation in the writing task. Then some evidence of prediction in writing and existence of internal models for limbs such as hand are presented. According to these, modeling of writing using model predictive control (MPC) is possible. Based on the presented simulations and experimental results it seems that the modeling of writing by MPC is very similar to the real skill, The proposed model has some advantages such as being consistent with the biological evidence, modeling prediction in writing and high correlation of the statical and dynamical features of the generated letters with those written by human.

**Keywords:** Writing process, Internal model, Cerebellum, Model Predictive Control, Prediction.

---

\* Corresponding author

Address: Farzad Towhidkhah, School of Biomedical Engineering, Cybernetic and biological modeling laboratory, Amir Kabir University of Technology, Hafez St., Tehran, Iran

Tel: +98 21 64542357

Fax: +98 21 64542363

E-mail: Towhidkhah@aut.ac.ir

## مدلسازی کینماتیکی فرایند نوشتن با استفاده از کنترل پیش‌بین

مهدی برج‌خانی<sup>۱</sup>، فرزاد توحیدخواه<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> مربی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه [borjkhani@gmail.com](mailto:borjkhani@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشیار، آزمایشگاه سایبرنتیک و مدلسازی سیستم‌های بیولوژیکی، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

### چکیده

نوشتن از مهارت‌های حرکتی پیچیده در انسان به‌شمار می‌رود. مدل‌هایی که تاکنون در این زمینه ارائه شده‌اند؛ مدل‌هایی پائین به بالا هستند و در آنها توجه کمتری به جنبه‌های بیولوژیکی حرکات صورت گرفته است. همچنین مدلی کیفی از فرایند نوشتن که عملکرد نواحی مختلف مغزی را حین انجام این فرایند توجیه کند، وجود ندارد. در این مقاله با استناد به یافته‌های نورولوژیکی و فیزیولوژیکی، عملکرد نواحی مختلف مغزی در فرایند نوشتن شرح داده شده است. سپس شواهدی مبنی بر وجود پیش‌بینی در نوشتن و وجود مدلی درونی از دینامیک اندام‌های بدن نظیر دست ارائه شده است. با توجه به شواهد موجود، مدلسازی فرایند نوشتن با استفاده از روش کنترل پیش‌بین امکان‌پذیر است. نتایج نشان دادند مدلسازی این فرایند با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل، شباهت زیادی با واقعیت و ماهیت این مهارت انسانی دارد. از مزایای این مدل، می‌توان به این موارد اشاره کرد: انطباق بالای آن با اصول بیولوژیکی شناخته شده، مدلسازی پیش‌بینی در نوشتن، همبستگی بسیار زیاد مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی حروف تولیدی با نمونه‌های انسانی.

کلیدواژه‌گان: فرایند نوشتن، مدل درونی، مخچه، کنترل پیش‌بین، پیش‌بینی.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پزشکی، آزمایشگاه سایبرنتیک و مدلسازی سیستم‌های بیولوژیکی

تلفن: ۶۴۵۴۲۳۵۷، دورنگار: ۶۴۵۴۲۳۶۳، پیام‌نگار: [Towhidkhah@aut.ac.ir](mailto:Towhidkhah@aut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

نوشتن یکی از مهارت‌های حرکتیست که کنترل و هماهنگی آن توسط نواحی مختلفی از مغز صورت می‌گیرد. بررسی نوشتن، راهگشای تحقیقات در زمینه‌های گوناگونی مانند رفتارهای حرکتی، کنترل حرکات در انسان و طراحی ربات‌هایی با ویژگی‌های مشابه با انسان است. اولین مرحله در نوشتن، اراده کردن برای انجام آن است که به آن مرحله معنایی<sup>۱</sup> گفته می‌شود، سپس مفاهیم در قالب کلمات شکل می‌گیرند که به آن مرحله لغوی و تحلیل ترکیبی<sup>۲</sup> گفته می‌شود. حروف<sup>۳</sup> خاصی انتخاب شده و کنار هم قرار داده می‌شوند. پس از این مرحله، حروف انتخاب شده به الگوهای حرکتی تبدیل شده و اجرا می‌شوند [۱].

مدل‌های مختلفی در قالب مدل‌های پائین به بالا<sup>۴</sup> و بالا به پائین<sup>۵</sup> برای مدلسازی نوشتن انسان ارائه شده‌اند. مدل‌های پائین به بالا، مدل‌هایی هستند که به مدلسازی نوشتن انسان بدون در نظر گرفتن شواهد بیولوژیکی می‌پردازند و فقط درصددند نوشته‌هایی شبیه نوشته‌های انسان تولید کنند. به عنوان مثال می‌توان به مدل هولرباخ<sup>۶</sup> ارائه شده در سال ۱۹۸۱ اشاره کرد. وی فرایند نوشتن را به صورت سیستمی مرکب از نوسان‌ساز<sup>۷</sup>هایی در دوبعد افقی و عمودی در نظر گرفت. این نوسان‌سازها توانایی تولید حروف با سرعت ثابت را داشتند. او در مدل خود سیستم دست-قلم را یک سیستم درجه دو در نظر گرفت [۲]. این مدل، کاملاً محاسباتی بوده و هیچ‌گونه توجه بیولوژیکی از فرایند نوشتن در آن به چشم نمی‌خورد. مدل ادلمن و فلش<sup>۸</sup> (سال ۱۹۸۷) نمونه دیگری از مدل‌های پائین به بالا به‌شمار می‌رود. آنها تولید نوشتار را بر مبنای کمینه کردن مشتقات سوم و چهارم حرکت دست (جرک<sup>۹</sup> و اسنپ<sup>۱۰</sup>) در نظر گرفتند. خروجی مدل آنها با نمونه‌های انسانی مقایسه شد و شباهت زیادی بین مشخصه‌های موقعیت، سرعت و شتاب نمونه‌های انسانی و خروجی مدل مشاهده شد. آنها در مدل خود توضیحی درباره چگونگی کمینه شدن مشتقات سوم و چهارم حرکت حین شکل‌دهی یک منحنی ارائه نکردند [۳]. مدل پلاموندون<sup>۱۱</sup> که

در سال ۱۹۹۸ ارائه شد، مثالی دیگر از مدل‌های پائین به بالا است. او سرعت سینرجی عضلانی<sup>۱۲</sup> (یعنی مجموعه عضلاتی که به‌طور هماهنگ برای هدف معینی فعالیت می‌کنند) را به صورت توابعی گوسی<sup>۱۳</sup> با تغییر لگاریتمی در نظر گرفت [۴]. پروفایل سرعت خروجی این مدل، زنگوله‌ای شکل بوده و شباهت زیادی به نمونه‌های انسانی دارد. به‌رغم توانایی‌های فراوانی که این مدل در تولید حروف دارد، در آن به جنبه‌های نورولوژیکی کمتر پرداخته شده است.

مدل‌های بالا به پائین، مدل‌هایی هستند که بر مبنای اصول فیزیولوژیکی ارائه می‌شوند. مدل اویت رایت<sup>۱۴</sup> که توسط گراسبرگ<sup>۱۵</sup> در سال ۲۰۰۰ ارائه شد، از جمله مدل‌های بالا به پائینست که برای نوشتن ارائه شده‌اند. وی از یک شبکه عصبی برای یادگیری استفاده کرده و تولید نوشتار در این سیستم توسط ترکیب مدل‌های ویت<sup>۱۶</sup> و مدل تولید منحنی ویترایت<sup>۱۷</sup> صورت می‌گیرد. این مدل توانایی تولید حرکات مبتنی بر حافظه و تولید حرکات تقلیدی با چشم را دارد. همچنین این مدل بر مبنای شواهد نورولوژیکی و فیزیولوژیکی ارائه شده است و توانایی تولید حرکاتی شبیه حرکات انسانی را دارد [۵]. مدل گراسبرگ تا حدودی در توجیه اصول نورولوژیکی و فیزیولوژیکی نوشتن موفق بوده است، ولی جنبه‌های مهم نوشتاری نظیر وجود پیش‌بینی به صورت مناسبی در آن در نظر گرفته نشده است. اخیراً نقیب الحسینی مدلی جدید به منظور مدلسازی فرایند نوشتن در انسان مطرح کرده است [۶]. این مدل ویژگی‌های مهمی نظیر یادگیری، توجه و حافظه در نوشتن را از دیدگاه رفتاری مورد توجه قرار می‌دهد و نحوه یادگیری حروف به وسیله تقلید از یک الگوی نوشته شده را توصیف می‌کند. البته این مدل توانایی تولید مشخصه‌های کینماتیکی نوشتار را ندارد و پیش‌بینی در نوشتار نیز در آن مورد توجه قرار نگرفته است.

هدف در مقاله حاضر بیان فعالیت نواحی مختلف مغزی در هنگام نوشتن و ارائه مدلی بر مبنای شواهد نورولوژیکی برای فرایند نوشتن در انسان، در مرحله اجرای الگوهای حرکتی است. مدل ارائه شده، مبتنی بر نظریه ایجاد مدل‌های

<sup>1</sup> Semantic level

<sup>5</sup> Top down

<sup>9</sup> Jerk

<sup>13</sup> Gaussian functions

<sup>17</sup> VITEWRITE

<sup>2</sup> Lexical and syntactical level

<sup>6</sup> Hollerbach

<sup>10</sup> Snap

<sup>14</sup> AVITEWRITE

<sup>3</sup> Allographs

<sup>7</sup> Oscillator

<sup>11</sup> Plamondon

<sup>15</sup> Grossberg

<sup>4</sup> Bottom up

<sup>8</sup> Edelman & Flash

<sup>12</sup> Muscle synergy

<sup>16</sup> VITE

به ناحیه بروکا<sup>۲۸</sup> ارسال می‌شود. ناحیه بروکا مسئول چیدمان کلمات است. این ناحیه کلمه مناسب را با توجه به مفهومی که از ناحیه ورنیکه اعمال می‌شود، از حافظه بارگذاری کرده و کلمات را پشت سرهم می‌چیند. به عنوان مثال می‌توان به نحوه بارگذاری کلمه "کتاب" اشاره کرد که مفهوم "کتاب" از ناحیه ورنیکه به بروکا ارسال می‌شود، سپس بروکا حروف نشان دهنده این مفهوم را از حافظه روندی<sup>۲۹</sup> گرفته و در قالب نوشتاری در کنار هم می‌چیند. در صورتی که به رعایت قوانین دستور زبان در کلمه نیاز باشد، بروکا با تعامل با لوب گیجگاهی این قواعد را به کلمه اضافه می‌کند. پس از ساخته شدن کلمه منطبق با منطق دستور زبان، بروکا رشته نوشتاری مطلوب را به ناحیه حرکتی اولیه<sup>۳۰</sup> از قشر مغز ارسال می‌کند. این ناحیه، اطلاعات مختلف را از بروکا، ناحیه حسی، عقده‌های قاعده‌ای و همچنین از مخچه دریافت می‌کند و بر اساس تمامی این اطلاعات دستورات حرکتی را به عضلات و اندام‌های حرکتی تولید نوشتار ارسال می‌کند [۷، ۸].

### ۳- مدل پیشنهادی برای سیستم تولید نوشتار بر

#### اساس کنترل‌کننده پیش‌بین

##### ۳-۱- معرفی کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، یک مفهوم کلی در کنترل است که از دهه ۱۹۶۰ میلادی در صنعت استفاده شده است [۹]. در روش کنترل مبتنی بر مدل، کنترل‌کننده با استفاده از آینده مسیر کنترلی مطلوب و نیز تخمین خروجی سیستم در محدوده‌ای از زمان آینده، به نام افق پیش‌بینی، ورودی کنترلی به سیستم را در محدوده زمانی به نام افق کنترل، پیش‌بینی می‌کند. به عبارت دیگر هدف این کنترل‌کننده، همانند سایر کنترل‌کننده‌ها تعقیب مسیر مطلوب است، اما برتری اصلی این روش، پیش‌بینی خروجی‌های آینده سیستم با استفاده از مدل موجود و همچنین امکان در نظر گرفتن قيود ناشی از سیستم، ورودی و یا خروجی در بهینه‌سازی و محاسبه سیگنال کنترلی مورد نیاز است. این کار با استفاده از مدل‌های سیستم و اغتشاش ممکن می‌شود.

درونی<sup>۱۸</sup> در اجرای مهارت‌های حرکتی و وجود پیش‌بینی در آن و با استفاده از کنترل پیش‌بین<sup>۱۹</sup> است. از مزایای مدل، تطابق بالا با اصول نورولوژیکی، حساسیت بسیار کم در مقابل تغییر پارامترها و توانایی تولید حروف با مشخصه‌های کینماتیکی شبیه نمونه‌های انسانی است.

در بخش دوم مقاله، مراکز مغزی مرتبط با فرایند نوشتن معرفی خواهند شد. در بخش سوم، شواهدی مبنی بر وجود پیش‌بینی در نوشتن و استفاده از مدل درونی در تولید نوشتار بیان می‌شود. سپس مدل پیش‌بین را معرفی می‌کنیم و تناظرهای عملکرد مخچه و کنترل پیش‌بین ارائه می‌شود. نحوه تخمین مدل پلنت<sup>۲۰</sup> و انتخاب سیگنال مرجع در این بخش توضیح داده می‌شوند. سپس مدل توسعه یافته را ارائه می‌کنیم. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی به وسیله مدل نمایش داده می‌شود و در پایان جمع‌بندی مطالب ارائه شده صورت می‌گیرد.

### ۲- مراکز مغزی مرتبط با فرایند نوشتن

مراکز مغزی مختلفی در تولید و درک نوشتار مشارکت دارند که در این بخش به نحوه عملکرد مراکز مختلف از زمان دیده شدن کلمه تا نوشته شدن آن می‌پردازیم. هنگامی که کلمه‌ای دیده می‌شود، اطلاعات دیداری پس از دریافت به وسیله چشم به ناحیه دیداری<sup>۲۱</sup> در مغز ارسال می‌شوند. این اطلاعات به صورت الگوهای گرافیکی به وسیله قشر بینایی اولیه<sup>۲۲</sup> درک می‌شوند و سپس وارد شکنج زاویه‌ای<sup>۲۳</sup> می‌شوند. شکنج زاویه‌ای در ارتباط تنگاتنگی که با ناحیه آهیانه‌ای<sup>۲۴</sup>، ناحیه آهیانه-پس‌سری<sup>۲۵</sup> و ناحیه گیجگاهی<sup>۲۶</sup> دارد، هجی کلمه را نشان می‌دهد و در واقع اطلاعات گرافیکی، رمزگشایی می‌شوند. اطلاعات از شکنج زاویه‌ای وارد ناحیه ورنیکه<sup>۲۷</sup> می‌شوند. در این ناحیه، اطلاعات رمزگشایی شده به عنوان کلمه‌ای منطبق بر شکل شنیداری، شناسایی می‌شود. ناحیه ورنیکه در ارتباط با حافظه معنایی، که فرهنگ لغت انسان است، مفهوم کلمه را استخراج می‌کند. در هنگام نوشتن کلمه، اطلاعاتی از مفاهیم کلمات از ورنیکه

<sup>18</sup> Internal models

<sup>22</sup> Primary visual cortex

<sup>26</sup> Temporal lobe

<sup>30</sup> Primary motor cortex

<sup>19</sup> Model predictive control

<sup>23</sup> Angular gyrus

<sup>27</sup> Wernicke

<sup>20</sup> Plant

<sup>24</sup> Parietal lobe

<sup>28</sup> Broca

<sup>21</sup> Visual cortex

<sup>25</sup> Occipital

<sup>29</sup> Procedural

## ۳-۱-۱- شواهد وجود پیش‌بینی در سیستم کنترلی تولید

## نوشتار

پیش‌بینی در سیستم حرکتی انسان و در انجام حرکاتی که با دست و پا صورت می‌گیرند، امری کاملاً شناخته شده است و محققان بسیاری این موضوع را بررسی کرده‌اند. در هر یک از مدل‌های حرکتی مختلفی که برای سیستم حرکتی انسان ارائه شده‌اند، به نحوی پیش‌بینی در نظر گرفته شده است [۹]. در همین راستا گانگادهار<sup>۳۱</sup> نشان داد که پیش‌بینی در فرایند نوشتن در مراکز مختلفی از مغز مثل ناحیه حرکتی تکمیلی<sup>۳۲</sup>، مخچه و نواحی متعددی از قشر حرکتی مغز<sup>۳۳</sup> وجود دارد [۱۰]. مial<sup>۳۴</sup> نشان داد که مخچه مدل جلوسویی<sup>۳۵</sup> از سیستم حرکتی را در خود دارد و در هماهنگی حرکات مختلف از این مدل بهره می‌برد. همچنین او با مطالعه تصاویر fMRI<sup>۳۶</sup> نشان داده است که مخچه در هماهنگی حرکات دست و چشم در هنگام اجرای حرکات تعقیبی<sup>۳۷</sup>، با توجه به مدل جلوسویی که در اختیار دارد نقش بنیادین را در پیش‌بینی حرکات ایفا می‌کند [۱۱].

## ۳-۱-۲- شواهد وجود مدل درونی در سیستم کنترلی تولید

## نوشتار

طبق نظریه ایتو<sup>۳۸</sup> که در سال ۱۹۷۰ ارائه و بعدها توسط محققان مختلف نشان داده شد، مخچه مدل درونی از اعضای بدن و دیگر نواحی مغز را داراست [۱۲-۱۵]. مدل‌های درونی، سازوکارهای عصبی هستند که می‌توانند مشخصه‌های ورودی - خروجی و یا معکوس آنها را دریافت کرده و مدل کنند. مدل‌های درونی جلوسو می‌توانند اطلاعات حسی متوالی را با استفاده از کپی‌های وایران<sup>۳۹</sup> حاصل از دستورات حرکتی<sup>۴۰</sup> پیش‌بینی کنند. مدل‌های درونی معکوس، توانایی این را دارند که دستورات حرکتی جلوسو را برای ترسیم یک منحنی مطلوب محاسبه کنند. هماهنگی حرکات سریع دست و بازو نمی‌تواند تحت یک کنترل بازخورددار با تأخیر صورت گیرد، بنابراین نظریه مدل‌های درونی و کنترل حلقه باز<sup>۴۱</sup> می‌تواند توجیه مناسبی برای این گونه حرکات باشد [۱۶]. شادمهر پیشنهاد کرد که فعالیت سلول‌های قشر حرکتی و

مخچه به شکلیست که دینامیک اعضای بدن را دارد و می‌توان از آن به عنوان مدلی درونی یاد کرد که مغز با استفاده از آن برای انجام هر حرکتی، پیش‌بینی از مقدار نیروی مورد نیاز برای انجام کار را انجام می‌دهد [۱۷]. شادمهر معتقد است مدل درونی، یعنی سیستمی که نیرو را بر حسب تابعی از حالت مطلوب (سرعت مطلوب) پیش‌بینی می‌کند، در ابتدای یادگیری خالی است و نیروی صفر را پیش‌بینی می‌کند؛ ولی در طول یادگیری کامل شده و پس از مدتی توانایی پیش‌بینی نیروی مورد نیاز برای حرکت را دارد. گراسبرگ در سال ۲۰۰۰ نشان داد که فرایند نوشتن، پس از یادگیری آن، توسط مغز به صورت کنترل حلقه باز صورت می‌گیرد [۵]. با توجه به اینکه نوشتن از جمله مهارت‌های حرکتی پیچیده به‌شمار می‌رود و پس از یادگیری، کنترل آن به صورت حلقه باز صورت می‌گیرد بنابراین وجود مدلی درونی از آن در مخچه محتمل به نظر می‌رسد.

## ۳-۲- تناظرات کنترل پیش‌بین با مخچه

مدل پلنت، از اجزای اصلی کنترل پیش‌بین است. شواهد حاکی از این است که مخچه نقش یک مدل را دارد [۱۳-۱۵]. این امر در یادگیری و اجرای مهارت‌های حرکتی نشان داده شده است. مخچه، یک کپی از دستورات حرکتی را که از ناحیه حرکتی اولیه به اندام‌های اجرایی مثل دست و پا ارسال می‌شوند، دریافت می‌کند. همچنین مخچه، از اطلاعات ارسال شده به‌وسیله بروکا به ناحیه حرکتی اولیه نیز یک کپی دریافت می‌کند، که اصطلاحاً به این سیگنال‌ها کپی وایرانی گفته می‌شود.

همچنین مخچه اطلاعات حسگرهای حسی عضلات مختلف و چشم‌ها را نیز دریافت می‌کند بنابراین مخچه نسخه‌ای از اطلاعات خروجی سیستم را نیز در اختیار دارد [۷، ۸]. مخچه علاوه بر داشتن خروجی‌هایی به ناحیه حرکتی اولیه، خروجی‌هایی را نیز به نواحی سطح بالای مغز نظیر بروکا و ورنیکه دارد بنابراین به نظر می‌رسد که در مراحل شناختی تولید نوشتار نیز دخالت دارد [۱۸]. همچنین مخچه در زمان‌بندی فرامین حرکتی نیز مؤثر است [۵، ۱۰]. با توجه

<sup>31</sup> Gangadhar

<sup>35</sup> Feed forward

<sup>38</sup> Ito

<sup>32</sup> Supplementary motor area

<sup>36</sup> Functional Magnetic Resonance Imaging

<sup>39</sup> Efferent Copy

<sup>33</sup> Motor cortex

<sup>40</sup> Motor command

<sup>34</sup> Mial

<sup>37</sup> Tracking

<sup>41</sup> Open loop control

به عنوان مثال می توان به مدل اکبرگ<sup>۴۲</sup> اشاره کرد [۱۹]. وی مدلی را پیشنهاد کرد که اجزای دست مانند یک میله صلب متصل به یک نقطه ثابت (مچ)، در نظر گرفته می شوند. اکبرگ معادله ای را متناسب با مشخصات دست انسان به صورت یک سیستم درجه دو و مطابق با معادله (۱) در نظر گرفته است:

$$L(h(t)) = H(s) = \frac{280}{s^2 + 22s + 280} \quad (1)$$

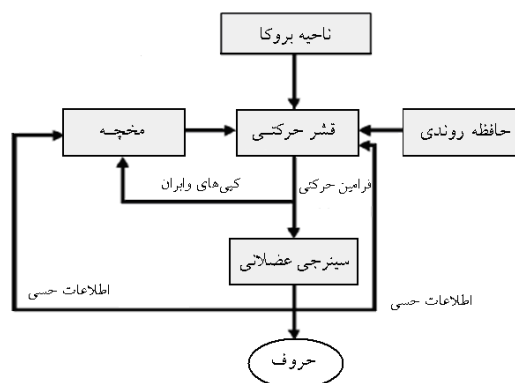
با استفاده از این ایده و برای سادگی محاسبات و با توجه به اینکه تولید نوشتار در سطح عضلانی به وسیله سینرجی عضلانی در راستای x (افقی) و y (عمودی) صورت می گیرد و در واقع تعامل این عضلات به تولید نوشتار منجر می شود، اقدام به تخمین مدل سینرجی عضلانی در راستای x و y خواهیم کرد. به همین منظور طی چندین آزمایش، از افراد شرکت کننده در آزمایش خواسته می شود تا خطوطی در راستای محور x و y تولید کنند. موقعیت حرکت دست در راستای محور افقی و عمودی ثبت شده است. با توجه به اینکه موقعیت خروجی ثبت شده شبیه پاسخ پله است، ورودی سیستم دست-قلم، تابع پله در نظر گرفته می شود که البته در تخمین و ساده سازی فرض دور از انتظاری به شمار نمی رود. شایان ذکر است در جابه جایی دست از یک نقطه به نقطه دیگر در محور افقی یا عمودی فرض بر این است که سیگنال کنترلی اعمالی به دست مانند تابع پله عمل می کند. سپس با استفاده از روش های خطی، مدل سینرجی عضلانی در راستای x و y به صورت خطی و با استفاده از یک تبدیل درجه دو تخمین زده می شود. مشاهده می شود که مدل سینرجی عضلانی تخمین زده شده برای افراد مختلف در بازه ای مشخص است. پس میانگین پارامترهای محاسبه شده برای افراد مختلف به عنوان توابع تبدیلی که مدل سینرجی عضلانی در راستای x و y هستند، محاسبه می شود. شایان ذکر است که شادمهر نیز برای مدل کردن عضلات در آزمایش های خود از یک سیستم فز-دمپر ساده استفاده کرده است [۲۰].

به این مطالب می توان نتیجه گرفت که مخچه علاوه بر مدلسازی سیستم تولید نوشتار، نتایج پیش بینی بر اساس مدل را به ناحیه حرکتی اولیه ارسال می کند. شایان ذکر است افق پیش بینی در نظر گرفته شده توسط انسان به صورت دقیق مشخص نیست ولی در شبیه سازی های صورت گرفته افق پیش بینی برابر ۳۲ms در نظر گرفته می شود.

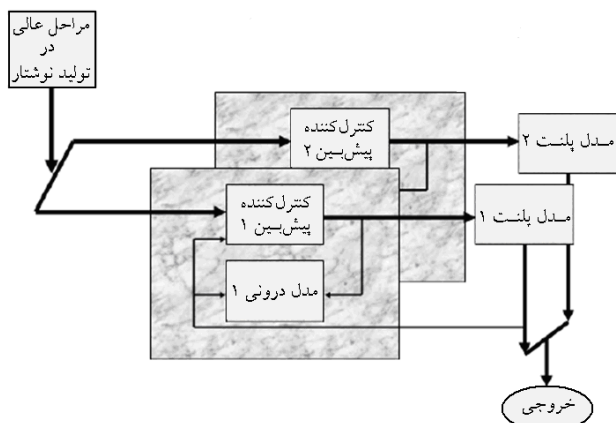
با توجه به اینکه مخچه اطلاعات ارسال شده از بروکا به ناحیه حرکتی، اطلاعات ارسال شده نواحی حرکتی به عضلات و اطلاعات حسی عضلات را دریافت می کند و سپس خروجی هایی را به ناحیه هایی مانند بروکا و ناحیه حرکتی اولیه ارسال می کند و همچنین زمان بندی حرکات را انجام می دهد؛ به نظر می رسد که بهینه سازی به عنوان یکی از اصول اساسی کنترل کننده پیش بین، در این ناحیه صورت می گیرد. بنابراین مدل فرایند نوشتن در انسان در سطح پائین تر می تواند به صورت شکل ۱ ارائه شود.

### ۳-۳- مدل پلنت برای سیستم تولید نوشتار

انسان برای در دست گرفتن یک جسم از همکاری ۱۵ عضله مختلف بهره می برد. در سال های آغازین یادگیری نوشتن، این عضلات به صورت سینرجی عضلانی ظاهر می شوند. به دلیل دینامیک پیچیده دست و دشواری هایی که مدل کردن ۱۵ عضله دارد و نیز بسته به اهداف گوناگونی که محققان دارند، معمولاً از مدلی خطی به جای مدل واقعی دست استفاده می شود. مدل های خطی متنوعی برای دست پیشنهاد شده اند که چون برای کاربردهای خاصی طراحی می شوند، شباهت چندانی به هم ندارند.



شکل ۱- مدل فرایند نوشتن در انسان



شکل ۲- مدل فرایند نوشتن با کنترل‌کننده پیش‌بین

### ۳-۴- انتخاب سیگنال مرجع برای سیستم تولید

#### نوشتار

این امر که چگونه نیت انجام یک حرکت، به انجام حرکت منجر می‌شود سؤالی مهم در ذهن بشر بوده و هست. شوارتز<sup>۴۳</sup> آزمایش‌هایی را بر روی گروهی از میمون‌ها حین انجام حرکات تعقیبی انجام داد و فعالیت نورون‌های قشر حرکتی میمون‌ها حین ترسیم خطوط را ثبت کرد. وی مشاهده کرد که قشر حرکتی اطلاعات موقعیت حرکت را در خود دارد و قانون دو- سوم توان که در مهارت‌های حرکتی دیده می‌شود، در فعالیت برداری نورون‌های قشر حرکتی نیز ظاهر شده است [۲۱-۲۳]. وانگ<sup>۴۴</sup> در آزمایش روی میمون‌ها مشاهده کرد که قشر حرکتی علاوه بر اطلاعات موقعیت، اطلاعات سرعت را نیز در خود دارد؛ همچنین نورون‌ها پیش از انجام حرکت، بیشتر اطلاعاتی را که شامل موقعیت حرکت هستند کد می‌کنند و حین انجام حرکت، بیشتر درصدد کد کردن سرعت حرکت هستند و کمتر موقعیت حرکت را کد می‌کنند [۲۴].

### ۳-۵- مدل پیشنهادی

در مدلسازی سیستم تولید نوشتار با توجه به شواهد بیولوژیکی موجود، پروفایل سرعت دست نوشته‌ها به عنوان سیگنال وارد شده به قشر حرکتی، در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود بروکا که وظیفه چیدمان حروف را بر عهده دارد، شکل حروف را به قشر حرکتی ارسال می‌کند. قشر حرکتی پس از دریافت شکل حروف، پروفایل سرعت یادگیری شده برای شکل‌دهی آن حرف را از حافظه روندی بارگذاری می‌کند و بنابراین پروفایل سرعت، وارد ناحیه حرکتی اولیه می‌شود. مخچه به عنوان مدل درونی سیستم دست- قلم در نظر گرفته شده و در تعامل با ناحیه حرکتی اولیه، سیگنال کنترلی مطلوب را به پلنت ارسال می‌کند. در هنگام نوشتن، سینرژی عضلانی در راستای محور X مستقل از عضلات سینرژی در راستای Y عمل می‌کند؛ بنابراین به صورت همزمان، دو سیستم موازی برای شکل‌دهی حروف در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. شکل ۲ مدل سیستم نوشتار با کنترل پیش‌بین را نشان می‌دهد.

### ۴-۱- آزمون‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی

#### مدل پیشنهادی

#### ۴-۱- استخراج داده‌های کینماتیکی از سیگنال

##### نوشتار

جمع‌آوری سیگنال نوشتار، به وسیله قلم و یکوم مدل اینتوس<sup>۴۵</sup> انجام شده است. از افراد شرکت‌کننده در آزمایش درخواست شد تا با استفاده از قلم، حروف پیوسته انگلیسی بنویسند. سپس پروفایل سرعت نوشتار با استفاده از نرم‌افزار اسمارت رایت<sup>۴۶</sup> استخراج شده و به عنوان سیگنال مرجع مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴-۲- شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

پس از ثبت داده‌های نوشتاری افراد مختلف به صورت یاد شده، اطلاعات حرکتی مورد نیاز از سیگنال نوشتار استخراج شده و ذخیره شدند. در این بخش با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل پیشنهادی را مورد آزمایش قرار می‌دهیم.

#### ۴-۲-۱- تخمین مدل سینرجی عضلانی

برای تخمین مدل سینرجی در راستای محور افقی و عمودی، از افراد شرکت‌کننده در آزمایش خواسته شد تا بین دو نقطه در نظر گرفته شده در راستای محور افقی و عمودی خطوطی را با حداکثر سرعت رسم کنند. موقعیت خطوط ترسیم شده به وسیله افراد، ثبت و به عنوان پاسخ پله در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های خطی، ضرایب معادله

<sup>43</sup> Schwartz

<sup>44</sup> Wang

<sup>45</sup> Wacom-Intus3

<sup>46</sup> SmartWrite

در طول زمان و با تمرین، شخص می‌تواند راحت‌تر و سریع‌تر بنویسد، زیرا به دلیل تمرین زیاد مدل درونی فرایند که در مخچه شکل گرفته است، کامل‌تر می‌شود و در نهایت حرکت به صورت حلقه باز کنترل می‌شود که دارای سرعت زیادی است. برای بررسی این موضوع، پاسخ سیستم را برای مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهیم.

برای تولید نوشتار، مدل سینرجی عضلانی در راستای محور افقی و عمودی؛ در قالب معادلات (۳) و (۴) تخمین زده شده و به صورت مستقل از هم در اختیار کنترل کننده پیش‌بین قرار می‌گیرد. تأخیر سیگنال‌های ارسالی از جانب قشر حرکتی به دست (پلنت)  $20\text{ms}$  و تأخیر حاصل از اطلاعات حسی نیز برابر  $20\text{ms}$  در نظر گرفته می‌شود.

علاوه بر مشخصه‌های کینماتیکی نظیر سرعت، شتاب و مشتق سوم موقعیت، قانون دو-سوم توان نیز یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل‌های ارائه شده برای نوشتار به‌شمار می‌رود. بنابراین توضیح مختصری در مورد این قانون آورده می‌شود و سپس به مقایسه همبستگی بین نتایج حاصل از مدل ارائه شده و انسان می‌پردازیم. قانون دو-سوم توان بیان می‌کند که سرعت زاویه‌ای با انحنای متناسب است [۵]. محاسبه قانون دو-سوم توان به صورت معادله (۵) انجام می‌شود:

$$C = \frac{(V_x \cdot A_y) - (V_y \cdot A_x)}{(V_x^2 + V_y^2)^{1.5}} \quad (5)$$

که در آن  $C$ ، مقدار انحنای حروف تولیدی را نشان می‌دهد.  $V$  و  $A$  به ترتیب بیانگر سرعت در راستای  $x$  و  $y$  هستند. با استفاده از روابط (۶) و (۷) هم می‌توان سرعت زاویه‌ای و سرعت مماسی را محاسبه کرد:

$$A = kC^{2/3} \quad (6)$$

$$V_{\tan} = kC^{1/3} \quad (7)$$

که در آن  $A$  نشانگر سرعت زاویه‌ای و  $k$  متناسب با حرف تولیدی ضریب ثابتی است.  $V_{\tan}$  سرعت مماسی و  $r$  شعاع منحنی است که برابر عکس انحنای است ( $1/C$ ).

برای شروع شبیه‌سازی و تولید حروف، میانگین توابع

درجه دوم خطی استخراج می‌شوند. شکل ۳ پروفایل موقعیت خطوط ترسیم شده به وسیله یکی از افراد شرکت کننده در آزمایش و تابع تبدیل تخمین زده شده برای آن را نشان می‌دهد. تخمین با دقت  $95/3\%$  صورت گرفته است. شکل تابع تبدیل تخمین زده شده، به صورت معادله (۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{K * e^{-T_d s}}{s^2 + As + B} \quad (2)$$

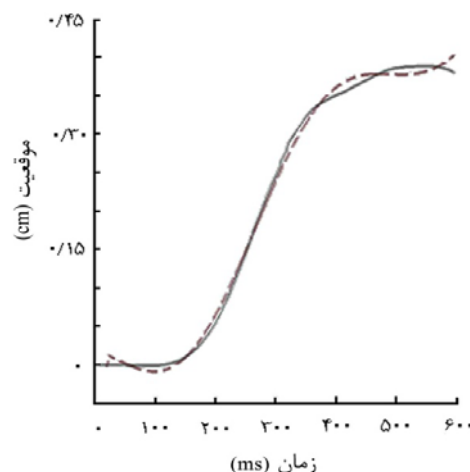
در نهایت مدل سینرجی عضلانی محور افقی به صورت معادله (۳) و مدل عضلات سینرجی محور عمودی، به صورت معادله (۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{0.53 * e^{-18s}}{s^2 + 3.7 * 10^{-5} s + 3.6 * 10^{-4}} \quad (3)$$

$$\frac{0.50 * e^{-19s}}{s^2 + 4.3 * 10^{-5} s + 5 * 10^{-4}} \quad (4)$$

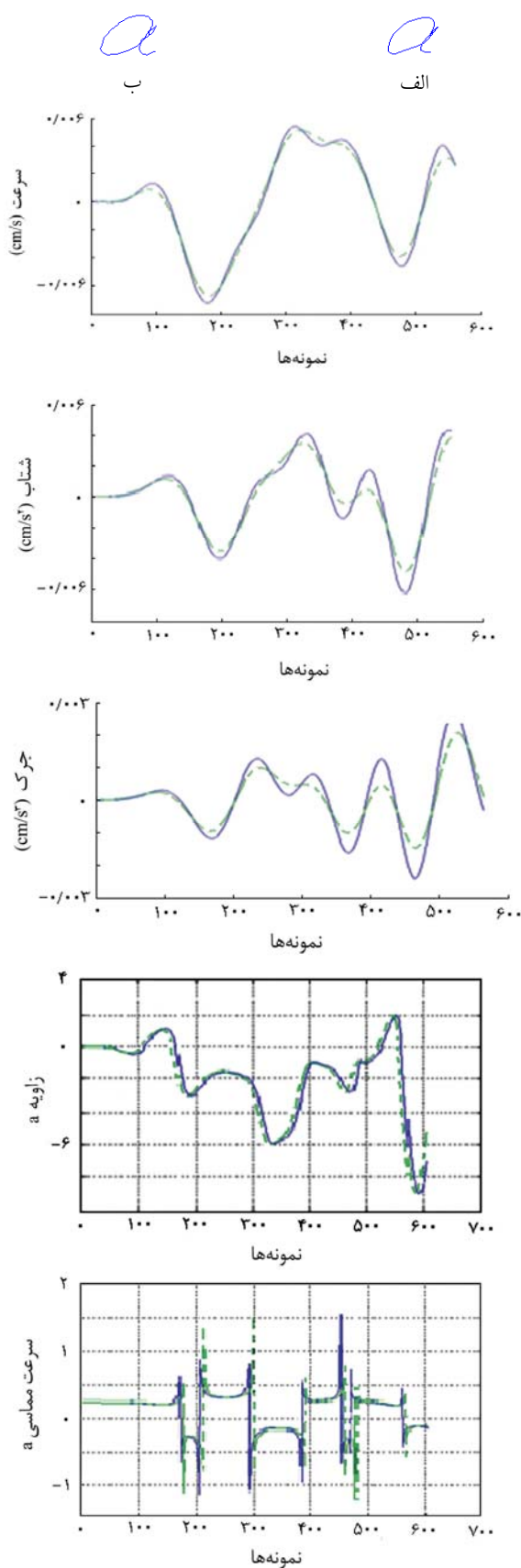
#### ۲-۲-۴- پیاده‌سازی مدل کنترلی تولید نوشتار

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، مدل کنترلی ارائه شده برای سیستم تولید نوشتار بر اساس کنترل پیش‌بین است. در این سیستم، به مدلی از فرایند تحت کنترل نیاز است. این مدل بر اساس اطلاعات حسی و کپی دستورات ارسال شده به اندام‌های حرکتی، در مخچه شکل می‌گیرد. به منظور پیاده‌سازی سیستم تولید نوشتار، مدل پلنت تخمین زده شده به عنوان مدل درونی کنترل کننده پیش‌بین در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳- منحنی پیوسته پروفایل موقعیت ترسیم شده به وسیله فرد هشتم و منحنی خط چین پروفایل موقعیت تخمین زده شده به وسیله سیستم را نشان می‌دهد.





شکل ۴- حرف *a* تولید شده به وسیله مدل (الف) و نوشته شده به وسیله انسان (ب). پروفایل سرعت، شتاب و جرمک تولید شده به وسیله مدل (منحنی خط چین) و انسان (منحنی پیوسته) نیز با هم مقایسه شده‌اند.

تبدیل تخمین زده شده برای سینرجی عضلانی در راستای محور افقی و عمودی که برابر با معادلات (۳) و (۴) هستند، به عنوان مدل پلنت و مدل داخلی قرار می‌گیرند. کنترل کننده به صورتی تنظیم می‌شود که افق پیش‌بینی ۲۰ واحد و افق کنترل ۲ واحد را داشته باشد. سیگنال‌های ارسالی از کنترل کننده پس از تأخیر ۲۰ms به پلنت می‌رسند. بازخورد خروجی به کنترل کننده نیز دارای تأخیری معادل ۲۰ms است (اطلاعات حسی نیز با همین تأخیر به مغز می‌رسند). پس از تنظیم پارامترهای مدل، شبیه‌سازی انجام می‌شود. در شکل ۴، حرف *a* تولید شده به وسیله انسان و توسط مدل را نشان می‌دهد. همبستگی پروفایل سرعت حرف تولیدی به وسیله مدل و انسان برای حرف *a*، ۰/۹۹ به دست آمده است. به همین ترتیب همبستگی بین پروفایل شتاب ۰/۹۸، مشتق شتاب ۰/۹۶، سرعت زاویه‌ای ۰/۹۷ و سرعت مماسی ۰/۷۹ به دست آمدند.

حال به بیان نتایج حاصل از مقایسه حروف تولیدی به وسیله مدل با حروف تولید شده به وسیله انسان (جدول ۱)، می‌پردازیم. برای این منظور همبستگی متقابل<sup>۴۷</sup> سیگنال‌های تولید شده به وسیله انسان و مدل محاسبه شدند. میانگین همبستگی متقابل بین سیگنال تولیدی توسط انسان و مدل برای پروفایل سرعت، شتاب و جرمک به ترتیب برابر با ۰/۹۹، ۰/۹۷ و ۰/۹۴ است. همبستگی متقابل برای پروفایل سرعت زاویه‌ای و مماسی (که در روابط (۵) تا (۷) تعریف شد) نیز برای حروف مختلف برابر با ۰/۹۷ و ۰/۸۴ است. گراسبرگ در مدلی که در سال ۲۰۰۴ ارائه کرد [۵]، همبستگی متقابل بین پروفایل سرعت و شتاب را به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۷۷ به دست آورد و فلش در مدلی که در سال ۱۹۸۷ مطرح کرد [۳]، با این تفاوت که مدل وی مدلی پائین به بالا به‌شمار می‌رود همبستگی متقابل در سرعت و شتاب را ۰/۹۹ و ۰/۹۷ گزارش کرد. با توجه به این نتایج، مدل ارائه شده در مقایسه با مدل گراسبرگ و فلش عملکرد بهتری دارد.

<sup>47</sup> Cross correlation

جدول ۱- همبستگی حروف تولید شده به وسیله مدل و انسان از دیدگاه مشخصه‌های کینماتیکی (سرعت، شتاب و جرک) و

سرعت زاویه‌ای و سرعت مماسی

الف. ج.	همبستگی در سرعت	همبستگی در شتاب	همبستگی در سرعت زاویه‌ای	همبستگی در سرعت مماسی	همبستگی در جرک (مشق شتاب)
a	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۷۹	۰/۹۶
b	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۸۳	۰/۸۹
c	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۲
d	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۳	۰/۹۸
e	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۹۳
f	۰/۹۹	۰/۹۱	۱	۰/۹۸	۰/۹۳
g	۰/۹۹	۰/۹۵	۱	۰/۷۸	۰/۹۱
h	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۳
i	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸	۰/۸۲	۰/۹۹
j	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۹۳
k	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۹۸
l	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۹۴
m	۰/۹۹	۰/۹۸	۱	۰/۹۶	۰/۹۶
n	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶
o	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۶۸	۰/۹۴
p	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۸۷	۰/۹۴
q	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۸۷	۰/۹۶
r	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۳	۱	۰/۹۵
s	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۳
u	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹	۰/۹۵
v	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۹۴
x	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۶
y	۰/۹۹	۰/۹۷	۱	۰/۹۴	۰/۹۶
z	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۴	۰/۹۹
میانگین	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۹۴

پیش‌بینی کرده و بر این تغییر فائق می‌آید. به منظور بررسی پیش‌بینی در نوشتن و چگونگی حذف اثر اغتشاش ناخواسته اعمالی آزمایش‌هایی طراحی و اجرا شده‌اند که در ادامه به توضیح آنها پرداخته می‌شود.

#### ۱-۳-۲-۴- آزمایش اول

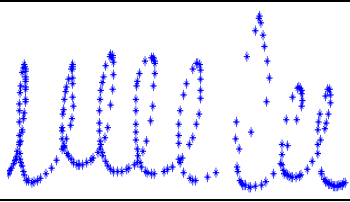
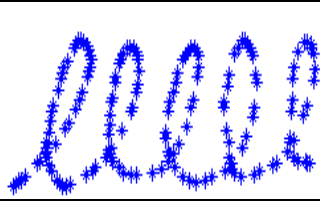
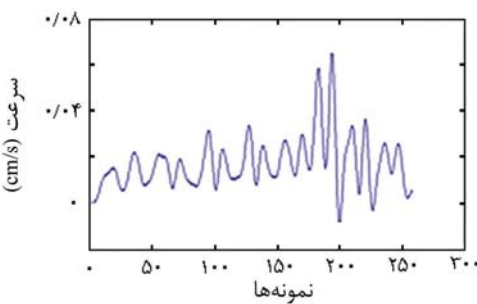
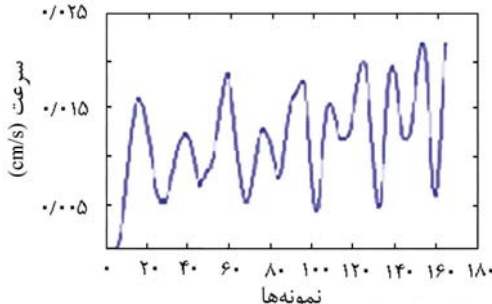
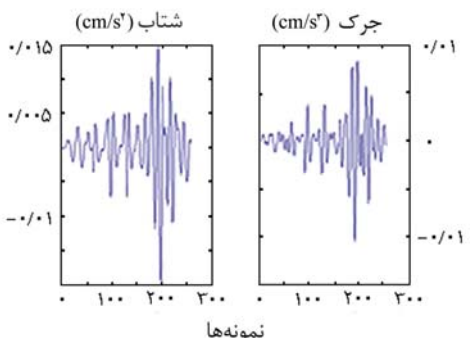
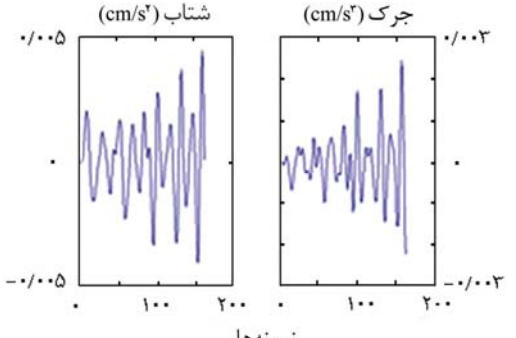
به منظور بررسی اثر اغتشاش اعمالی خارجی بر روی مشخصه‌های کینماتیکی نوشتار در انسان و سپس مقایسه آن با مدل پیشنهادی، آزمایش مشابه آزمایش‌های صورت گرفته به وسیله شادمهر [۱۷] انجام شد. در این آزمایش‌ها، از افراد شرکت‌کننده در آزمایش خواسته شد تا حروف IIIII را پشت سرهم و به صورت پیوسته بنویسند. در مرحله اول پس از چند بار تکرار نوشتن، بدون این که به شخص اطلاع داده شود، یک اغتشاش پله‌ای به مچ دست وی اعمال شد. مشاهده شد که در لحظه اعمال اغتشاش، نوشتار دچار تغییراتی می‌شود که این تغییر در شکل ظاهری حروف و مشخصه‌های کینماتیکی مانند سرعت، شتاب و جرک قابل مشاهده است (شکل ۵).

همان‌طور که مشاهده می‌شود در لحظه اعمال اغتشاش، پروفایل سرعت، شتاب و جرک تغییراتی را به صورت افزایش قله پروفایل نمایش می‌دهند که به تدریج به حالت طبیعی برمی‌گردد. با توجه به اینکه افراد مورد آزمایش اطلاعی از اعمال اغتشاش ندارند، بنابراین پیش‌بینی در کار نبوده است و جبران‌سازی اثر اغتشاش ناشی از تأثیر حلقه بازخوردی حسگرهای حرکتی بوده است.

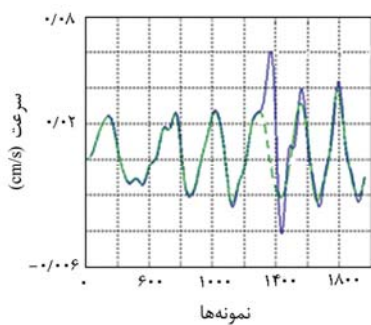
برای نشان دادن این که مدل پیشنهادی نیز شباهت زیادی با رفتار انسانی دارد، سیگنال اغتشاش پله‌ای را به محل پلنت اعمال می‌کنیم. شکل ۶ نشان‌دهنده حروف تولید شده به وسیله مدل در این حالت است. در این شبیه‌سازی دامنه اغتشاش برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. نتایج، حاکی از این است که مدل رفتاری مشابه انسان در هنگام اعمال اغتشاش دارد.

#### ۳-۲-۴- بررسی پیش‌بینی در نوشتن

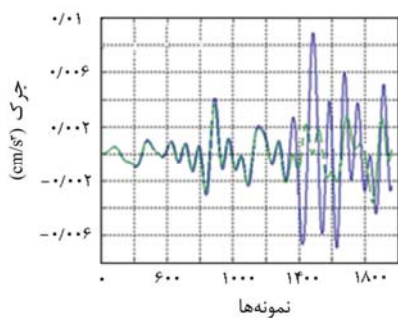
در یک حرکت رسنده، اگر تغییری ناگهانی و غیرمنتظره به دست وارد شود، دست از مسیر خود منحرف شده و خطای قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌شود. نیروی اعمال شده به صورت ناگهانی، دینامیک‌های حرکت را تغییر می‌دهد. سیستم عصبی انسان، نیروی مورد نیاز برای غلبه بر تغییر اعمال شده را

<p>اعمال اغتشاش (پاسخ یکی از افراد مورد آزمایش)</p>	<p>بدون اعمال اغتشاش</p>	
		<p>حروف</p>
		<p>پروفایل سرعت</p>
		<p>پروفایل شتاب و چرک</p>

شکل ۵- اثر اغتشاش در یکی از آزمودنی‌ها و مشخصه‌های کینماتیکی



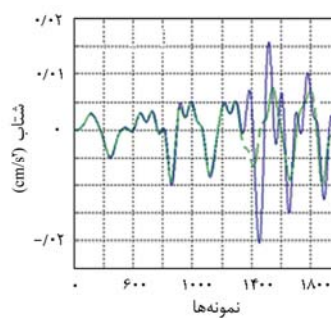
ب



د



الف





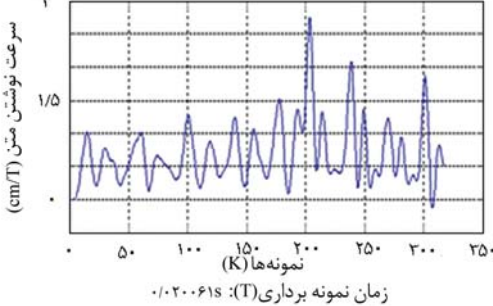
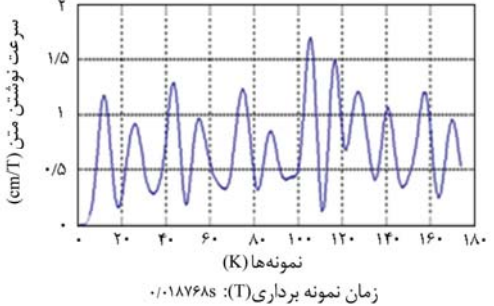
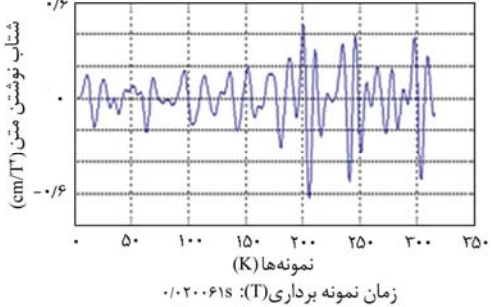
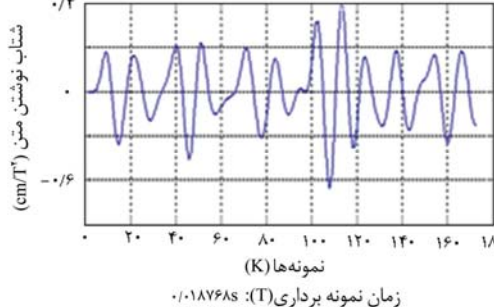
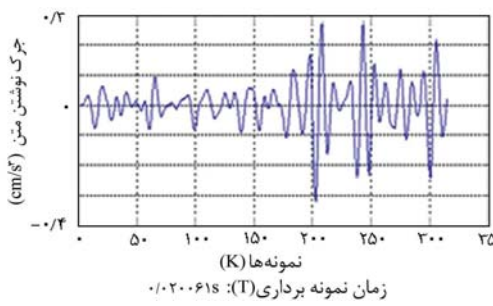
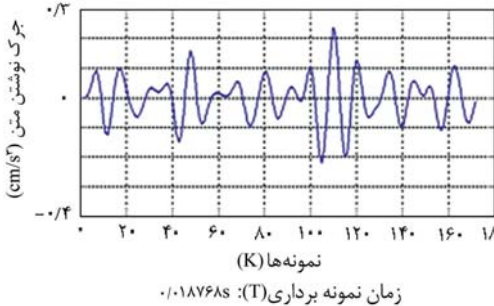
ج

شکل ۶- حروف تولیدی به همراه مشخصه‌های کینماتیکی آنها در مدل، هنگام اعمال اغتشاش ناشناخته (خروجی مدل با منحنی پیوسته و سیگنال مرجع با خط چین نشان داده شده است).

۲-۳-۴- آزمایش دوم

در این آزمایش به منظور بررسی اثر پیش‌بینی در نوشتن، زمان رخ دادن اغتشاش به افراد شرکت کننده اعلام شده است. این حالت، معادل این است که مدل اغتشاش در اختیار کنترل‌کننده قرار گرفته است و سیستم، زمان اعمال اغتشاش و شدت آن را می‌داند. نتایج شبیه‌سازی‌ها، حاکی از این است که داشتن مدل اغتشاش، کمک شایانی به بهبود نوشتار تولیدشده و کاهش اثرات حاصل از اغتشاش عملی دارد. در

واقع کنترل‌کننده پیش‌بین، با مدل اغتشاشی که در اختیار دارد، یک پیش‌بینی از آینده خود دارد و سیگنال کنترلی خود را پیشاپیش تنظیم می‌کند. شکل ۷، آزمون‌های انجام شده بر روی ۳ نفر را نشان می‌دهد. وقتی افراد شرکت‌کننده پیشاپیش از زمان اعمال اغتشاش آگاه‌اند، به کمک مدل درونی که از اغتشاش دارند، اقدام به اصلاح سیگنال کنترلی خود می‌کنند. سیگنال اغتشاش اعمال شده، پله واحد و با دامنه ۰/۱ است.

اعمال اغتشاش (فرد ۱)	اعمال اغتشاش (فرد ۲)	
		حروف
		پروفایل سرعت
		پروفایل شتاب
		پروفایل حرکت

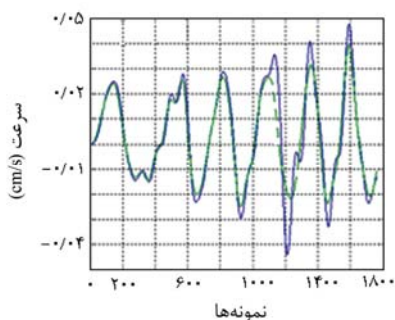
شکل ۷- حروف تولید شده توسط انسان و مشخصه‌های کینماتیکی آنها هنگامی که افراد از زمان اعمال اغتشاش آگاه هستند.

تولید کرده است که در تولید برخی مشخصه‌های نوشتاری انسانی گاهی دچار مشکل می‌شود. مدل ارائه شده در این مقاله توانسته است با حفظ اصول بیولوژیکی و شباهت بیشتر با عملکرد مغز، نوشتاری را تولید کند که نه تنها از نظر ظاهری مشابه نوشتار انسانی است؛ بلکه از نظر مشخصات کینماتیکی نیز عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های پائین به بالا دارد. مهم‌ترین معیارها برای ارزیابی مدل‌های تولید نوشتار، استفاده از همبستگی ظاهری حروف، پروفایل سرعت، شتاب، جرک، سرعت زاویه‌ای و سرعت مماسی تولید شده به وسیله مدل با انسان است. در این مقاله، از تمام این معیارها برای ارزیابی مدل استفاده شد. شایان ذکر است مدل گانگادها تنها از پروفایل سرعت و مدل نقیب الحسینی تنها از شکل ظاهری حروف برای ارزیابی بهره جسته‌اند. مدل حاضر از نظر تولید شکل ظاهری حروف و مشخصه‌های کینماتیکی نوشتاری با مدل گراسبرگ قابل مقایسه است و در مواردی حتی عملکرد بهتری دارد. از دیگر نقاط قوت این مدل می‌توان به بررسی پیش‌بینی در نوشتن اشاره کرد که در دیگر مدل‌های ارائه شده در نظر گرفته نشده است.

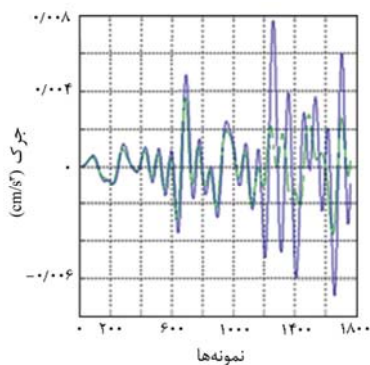
شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی مدل با اعمال اغتشاش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود زمانی که مدل اغتشاش در اختیار کنترل‌کننده پیش‌بین قرار گرفته است؛ شکل حروف تولید شده و مشخصه‌های کینماتیکی آنها از نظر کیفی شباهت زیادی به انسان دارد. مدل توانسته است قبل از وقوع اغتشاش آن را پیش‌بینی کرده و در نتیجه از اثرات نامطلوب اغتشاش بکاهد و شکل ظاهری حروف در لحظه اعمال اغتشاش تغییر چندانی نداشته باشد.

### ۳-۴- مقایسه مدل ارائه شده با مدل‌های مشابه

مدل‌های پائین به بالای زیادی برای نوشتن با هدف تولید مشخصه‌های کینماتیکی نوشتار مشابه با انسان ارائه شده‌اند. این مدل‌ها صرفاً به تولید نوشتار پرداخته‌اند و به دنبال تطابق با اصول بیولوژیکی نبوده‌اند. بنابراین باید از این مدل‌ها انتظار داشت که در حوزه تولید نوشتاری مشابه انسان، چه از نظر ظاهری و چه از نظر مشخصه‌های کینماتیکی؛ بیشترین تطابق را با نوشته‌های انسانی داشته باشند. در مدل‌هایی که تقریباً بالا به پائین بوده‌اند، یا به تولید نوشتار پرداخته نشده است و یا مدل ارائه شده با در نظر گرفتن اصول بیولوژیکی؛ مشخصه‌های کینماتیکی را در خود ندارد و یا حروفی را



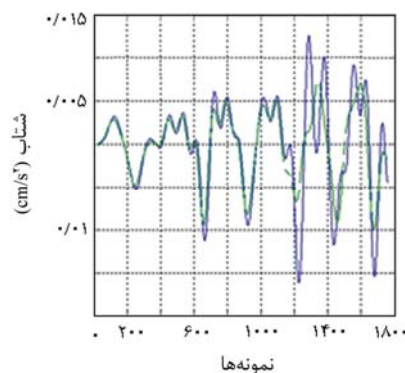
ب



د



الف



ج

شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی مدل تولید نوشتار با داشتن مدل اغتشاش

(منحنی پیوسته نشان دهنده خروجی مدل و منحنی خط چین نشان دهنده سیگنال مرجع است).

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استناد به شواهد نورولوژیکی، مدلی بیولوژیکی از فرایند نوشتن ارائه شد. مدل پیشنهادی در این مقاله توانایی تولید حروف با همبستگی بالا با نوشتار انسان را دارد.

عملکرد مدل پیشنهادی بر اساس این نظریه است که مدلی درونی از سیستم قلم-دست در مخچه شکل می‌گیرد که در هنگام تولید نوشتار، مقدار نیروی مورد نیاز برای تولید نوشتار را پیش‌بینی کرده و در اختیار قشر حرکتی مغز قرار می‌دهد. وقتی شخص اراده به نوشتن می‌کند، بروکا حروف تولیدی را مشخص کرده و پروفایل سرعت حروف، از حافظه حرکتی بارگذاری می‌شود. بنابراین سیگنال مرجع در اختیار کنترل پیش‌بین که همان قشر حرکتی و مخچه است، قرار داده می‌شود.

از ویژگی‌های بارز مدل ارائه شده، در نظر گرفتن پیش‌بینی در نوشتن، هم در سطح برنامه‌ریزی حرکتی و هم در مرحله اجراست. همچنین در نظر گرفتن پروفایل سرعت به عنوان سیگنال مرجع که در قشر حرکتی اولیه کد می‌شود از نقاط قوت مدل به‌شمار می‌رود. از دیگر مزایای این مدل می‌توان به تطابق بالای آن با فرایند نوشتن در انسان، توجه وجود پیش‌بینی در نوشتن، تولید حروف با مشخصه‌های کینماتیکی انسانی و نیز مقاومت بالای کنترل‌کننده اشاره کرد.

مدل‌های پیشین ارائه شده، کاستی‌هایی داشتند. به عنوان مثال مدل هولرباخ، مدلی کاملاً ریاضی است و فرض‌های ساده‌کننده زیاد در آن، مانع از توجه مناسب فرایند نوشتن می‌شود. مدل ادلمن توضیحی درباره چگونگی کمینه شدن مشتقات سوم و چهارم حرکتی ارائه نمی‌کند. مدل گانگادهار که به نوعی تکمیل شده مدل هولرباخ به‌شمار می‌رود، در تولید نوشتار مشابه انسان و در یک خط افقی فرض‌هایی را انجام داده است که توجه بیولوژیکی ندارد. مدل اویت رایت مدلی بیولوژیکی و کامل به‌شمار می‌رود، ولی توانایی توجه پدیده‌ای مانند تفاوت‌های نوشتن با دست غیرغالب، پا و یا دهان را ندارد.

به‌طور خلاصه از جمله توانایی‌های مدل حاضر می‌توان تطابق بالای آن با نظریات محققان درباره نحوه تولید مهارت‌های حرکتی در انسان، استفاده از پروفایل سرعت و در نتیجه نگاهی دینامیکی به فرایند نوشتن، در نظر گرفتن مدل جلوسو و در نتیجه توجه پیش‌بینی در نوشتن، همبستگی بالای مشخصه‌های نوشتاری انسان با مدل و داشتن توانایی‌های بالقوه مدل برای توجه کردن پدیده تغییرات در نوشتن، نوشتن با دست غیرغالب، توجه به وجود آمدن برخی بیماری‌ها نظیر نانویسی، توجه پدیده‌هایی نظیر ایجاد علائم حرکتی غیرمحسوس در شکل ظاهری نوشتار ولی قابل مشاهده در پروفایل سرعت، شتاب و جرک بیماران شیزوفرنیایی و پارکینسونی را نام برد. در تحقیقات آتی درصد آئیم که مدل ارائه شده را کامل‌تر کرده و توانایی‌های گسترده مدل را در حوزه‌های گوناگون نشان دهیم.

## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از زحمات جناب آقای مهندس رضایی در جمع‌آوری دادگان سپاسگزاری کنند.

## مراجع

- [1] Schomaker L.R.B., Simulation and recognition of hand writing movements: a vertical approach to modeling human motor behavior, Ph.D. thesis Nejmigen University Netherlands; 1991.
- [2] Hollerbach J. M., An oscillation theory of handwriting, Biological Cybernetics, 1981; 39: 139-156.
- [3] Edelman S., Flash T., A model of handwriting, Biological Cybernetics, 1987; 57: 25-36.
- [4] Plamondon R., Guerfali, W., The generation of handwriting with delta-lognormal synergies, Biological Cybernetics, 1998; 78: 119-132.
- [5] Grossberg S., Paine R. W., A neural model of corticocerebellar interactions during attentive imitation and predictive learning of sequential handwriting movements, Neural Networks, 2000; 13: 999-1046.
- [۶] نقیب الحسینی مریم، بهرامی فریبا، مدلی رفتار پایه جهت توصیف یادگیری نوشتن حروف فارسی، فصلنامه مهندسی پزشکی زیستی، ۱۳۸۷، دوره ۲؛ شماره ۲: ۷۵-۸۴.
- [7] Guyton C., Hall J. E., Textbook of Medical Physiology, 10th edition, Saunders 2000.

- [18] Ackermann H., Wildgruber D., Daum I., Grodd W., Does the cerebellum contribute to cognitive aspects of speech production? a functional magnetic resonance imaging (fMRI) study in humans, *Neuroscience Letters*, 1998; 247: 187-190.
- [19] Ekeberg F. A., Forssberg H., Control strategies correcting inaccurately programmed fingertip forces: Model predictions derived from human behavior, *Journal of Neurophysiology*, 2003; 89: 2904-2916.
- [20] Shadmehr R., Ivaldi M., Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task, *Journal of Neuroscience*, 1994; 14: 3208-3224.
- [21] Schwartz A. B., Motor cortical activity during drawing movements: single unit activity during sinusoid tracing, *Journal of Neurophysiology*, 1992; 68: 528-541.
- [22] Schwartz A. B., Useful signals from motor cortex, *Journal of Physiology*, 2007; 579.3: 581-601.
- [23] Moran D. W., Schwartz. A. B., Motor cortical representation of speed and direction during reaching, *Journal of Neurophysiology*, 1999; 82: 2676-2692.
- [24] Wang W., Sherwin S. Chan, Dustin A. Heldman, Moran D. W., Motor cortical representation of position and velocity during reaching, *Journal of Neurophysiology*, 2007; 97: 4258-4270.
- [25] Burton A. W., Pick H. L., Holmes C., The independence of horizontal and vertical dimensions in handwriting with and without vision, *Acta Psychologica*, 1990; 75: 201-212.
- [8] Kandel E. R., Schwartz J. H., Jessell T. M., *Principles of Neural Science*, McGraw-Hill New York, 4th Edition 2000.
- [9] Towhidkhal F., Gander R., Wood H., Model predictive impedance control: a Model for Joint Movement, *Journal of Motor Behavior*, 1997; 29: 209-222.
- [10] Gangadhar G., Joseph. D., Chakravarthy V. S., An oscillatory neuromotor model of handwriting generation, *Springer, IJDAR*, 2007; 10: 69-84.
- [11] Miall R. C., Reckess. G. Z., The cerebellum and the timing of coordinated eye and hand tracking, *Brain and Cognition*, 2002; 48: 212-226.
- [12] Ito M., Neurophysiological aspects of the cerebellar motor control system. *International Journal of Neurol*, 1970; 7: 162-176.
- [13] Houk J.C, Buckingham J.T, Barto A.G, Models of the cerebellum and motor learning, *Journal of Behavioral and Brain Sciences*, 1996; 19: 368-383.
- [14] Kawato M., Internal models for motor control and trajectory planning, *Journal of Current Opinion in Neurobiology*, 1999; 9: 718-727.
- [15] Wolpert D. M., Doya K., Kawato M., A unifying computational framework for motor control and social interaction, *J. R. Soc*, 2000; 358: 593-602.
- [16] Kawato M., Internal models for motor control and trajectory planning, *Journal of Current Opinion in Neurobiology*, 1999; 9: 718-727.
- [17] Shadmehr R., Generalization as a behavioral window to the neural mechanisms of learning internal models, *Human Movement Science*, 2004; 23: 543-568.