



۱۳۸۰ / ۸ / ۳۰

وزارت اطلاعات وزارت علوم و تحقیقات
تعمیرات



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی برق

تشخیص فعالیت‌های ذهنی از سیگنال‌های مغزی با استفاده از طبقه‌بندی کننده‌های شبکه‌های عصبی و روش‌های آماری

013780

فاطمه حمزه‌لو

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی پزشکی، گرایش بیوالکترونیک

استاد راهنما:

دکتر عباس عرفانیان امیدوار

اردیبهشت ۸۰

۳۷۱۹۱



عهد کردیم که بی دوست به صحرا نرویم بی تماشاگه رویش به تماشا نرویم

تقدیم به:

فرزند عزیز محمد^(ص)، که تمام کوهها، دشتها، دریاها، سرزمینها و مردمان را به امید دیدارش عاجزانه نظاره می‌کنیم. تقدیم به او که فرزند گرانقدر علی^(ع) و فاطمه^(س) است. زنده است و عزلت و غربت ما را نیک می‌داند. تقدیم به او به لحظه‌ای که زاده شده، به تمامی لحظات زندگی عزیزش و تقدیم به لحظه‌ای که می‌آید.

((سلام ما بر مهدی^{عج} و بر همه خاندان پاکش باد.))



چکیده

امروزه از سیگنال‌های مغزی جهت تعیین فعالیت‌های ذهنی، تشخیص بیماری و ناهنجاری‌های مغزی، کنترل بیهوشی، تشخیص میزان هوشیاری به‌طور گسترده‌ای در محیط‌های کلینیکی و تحقیقاتی استفاده می‌شود. از دیگر کاربرهای سیگنال‌های مغزی ارتباط انسان با ماشین به‌طور مستقیم از طریق سیگنال‌های مغزی است. مهمترین سؤالی که در این راستا مطرح است قابلیت تشخیص فعالیت‌های ذهنی با استفاده از سیگنال‌های مغزی است. محققان بسیاری طی بیست دهه اخیر از روش‌های مختلفی سعی در گسترش دستگامی جهت ارتباط انسان با ماشین کرده‌اند. آنچه در این راستا از اهمیت شایانی برخوردار است، داشتن دقت بالا و تا حدودی بی‌درنگ در طبقه‌بندی و تفکیک فعالیت‌های ذهنی مختلف می‌باشد.

هدف از اجرای این پروژه طبقه‌بندی و تفکیک فعالیت‌های مختلف ذهنی با استفاده از سیگنال‌های مغزی است. برای این منظور آزمایش‌های مختلفی شامل ضرب در سطوح ساده (L1)، میانه (L2)، سخت (L3) و حالت استراحت بر روی انسان انجام شده است. به عبارتی همه آزمایش‌ها همگی در یک راستا است و فقط از لحاظ میزان محاسبات متفاوت است. در اینجا از سه کانال C3، C4، P3 جهت اخذ سیگنال‌های مغزی استفاده شده است. سیگنال مربوط به پلک زدن نیز از کانال FP1 ثبت شده است. مسأله تشخیص فعالیت‌های ذهنی از طریق سیگنال‌های مغزی، یک مسأله طبقه‌بندی است. از مهمترین مراحل یک طبقه‌بندی کننده استخراج ویژگی‌هاست. برای طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی از ویژگی‌های مختلفی استفاده شده که شامل قدر مطلق دامنه سیگنال (MAV)، پراش (VAR)، توان در باند P_{β} / P_{α} و P_{θ} / P_{α} ، P_{β} (12-35 Hz)، P_{α} (8-12 Hz)، P_{θ} (3-8 Hz) تغییرات ویژگی‌های اتخاذ شده طی فعالیت‌های مختلف ذهنی است. نشان داده شد هر چه فعالیت ضرب ریاضی در سطح بالاتری باشد، قدر مطلق دامنه سیگنال کمتر، پراکندگی کمتر، توان در باند پایین (P_{θ}) کاهش و در باندهای بالاتر (α و β) افزایش می‌یابد. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد فعالیت‌های ریاضی در مقایسه با حالت آرامش دارای دامنه بزرگتر و پراکندگی کمتری است. توان سیگنال در هنگام فعالیت‌های ریاضی در باند فرکانس پایین (θ) در مقایسه با حالت آرامش بیشتر و در باندهای بالاتر کمتر است.

با توجه به نتایج یاد شده می‌توان از این ویژگی‌ها جهت طبقه‌بندی و تفکیک فعالیت‌های ذهنی استفاده کرد. در این پروژه از هفت روش طبقه‌بندی شامل طبقه‌بندی کننده‌های آماری نرم اقلیدسی و بی‌زین، طبقه‌بندی عصبی پس انتشار خطا (BP)، شبکه‌های عصبی بر مبنای توابع شعاعی (RBF)، شبکه‌های عصبی واحدی پس انتشار خطا (MBP) و شبکه‌های عصبی واحدی بر مبنای توابع شعاعی (MRBF) و همچنین طبقه‌بندی به روش فازی استفاده شده است.

نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که می‌توان چهار فعالیت (L1, L2, L3, B) را به کمک طبقه‌بندی کننده شبکه‌های عصبی واحدی پس انتشار خطا با دقت ۹۷/۵۱٪، حساسیت ۹۵/۲۲٪ و نرخ FA کمتر از ۲٪ از هم جدا کرد.



پیش از هر چیز با سپاس بی‌پایان از معبود ازلّی، خداوند بزرگ و مهربان که توفیق انجام این رساله را بر این حقیر میسر ساخت. و بعد با تشکر از همه عزیزانی که در سایه لطف و مهرشان سالهاست چگونه زیستن و چگونه آموختن را به من یاد داده‌اند که اولینشان پدر و مادر ارجمندم و سپس معلمان، دبیران، اساتید و دوستان گرانقدرم می‌باشند.

از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر عباس عرفانیان امیدوار که با راهنمایی‌های خود مرا در انجام این پروژه یاری فرمودند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین از اساتید هیات داوری آقای دکتر سیدصالحی و آقای دکتر شکوهی کمال تشکر را دارم.



فصل ۱: مقدمه

- ۱-۱ تشخیص بلوغ فکری با استفاده از سیگنال‌های مغزی..... ۲
- ۱-۲ تخمین هوشیاری با استفاده از توان سیگنال‌های مغزی..... ۳
- ۱-۳ طبقه‌بندی ۵ فعالیت ذهنی مختلف به کمک طبقه‌بندی کننده بیزین..... ۴
- ۱-۴ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از مدل‌های خود بازگشتی چند متغیره..... ۶
- ۱-۵ طبقه‌بندی فرآیندهای شناخت..... ۷
- ۱-۶ ارتباط دهنده تطبیقی^۱ برای افراد معلول..... ۸
- ۱-۷ هدف از اجرای پروژه..... ۹

فصل دوم: پتانسیل‌های شناختی مغز

- ۲-۱ مقدمه..... ۱۲
- ۲-۲ پتانسیل‌های برانگیخته مغزی و ارتباط آن با فرایندهای شناخت..... ۱۳
- ۲-۳ بررسی پتانسیل‌های مغزی در حوزه فرکانس..... ۱۶
- ۲-۴ بررسی سیگنال EEG در حوزه زمان در حالت انجام فعالیت‌های ریاضی..... ۱۸
- ۲-۵ تغییرات پارامترهای فرکانسی سیگنال EEG هنگام انجام فعالیت‌های ریاضی..... ۲۳
- ۲-۶ نتیجه‌گیری..... ۲۷

فصل سوم: روال آزمایش و نحوه ثبت سیگنال‌های مغزی

- ۳-۱ نحوه آزمایش و روند اخذ سیگنال..... ۳۰
- ۳-۱-۱ آزمایش‌های در نظر گرفته شده..... ۳۰
- ۳-۱-۲ شرایط آزمایش..... ۳۱
- ۳-۱-۳ انتخاب کانال‌های مغزی جهت اخذ سیگنال..... ۳۴
- ۳-۱-۴ روال آزمایش..... ۳۴

^۱Adaptive Brain Interfaces

فصل چهارم: بررسی تغییرات پویایی سیگنال‌های مغزی هنگام فعالیت‌های ذهنی

- ۴-۱ مرحله فیلترکردن و حذف پلک‌زدن ۴۰
- ۴-۱-۱ فیلترکردن جهت حذف برق شهر و نویز فرکانس بالا ۴۰
- ۴-۱-۲ حذف پنجره‌های حاوی آرتیفکت‌های چشم ۴۲
- ۴-۲ استخراج ویژگی‌ها ۴۴
- ۴-۲-۱ ویژگی‌های حوزه زمان ۴۴
- ۴-۲-۲ ویژگی‌های حوزه فرکانس ۴۴
- ۴-۳ تغییرات ویژگی‌های زمانی سیگنال‌های مغزی هنگام انجام ضرب‌های ذهنی مختلف ۴۵
- ۴-۳-۱ تغییرات قدرمطلق دامنه ۴۵
- ۴-۳-۲ تغییرات پراش ۴۶
- ۴-۴ تغییرات ویژگی‌های فرکانسی سیگنال‌های مغزی هنگام انجام ضرب‌های ذهنی مختلف ۴۷
- ۴-۴-۱ توان باند θ ۴۸
- ۴-۴-۲ توان باند α ۵۰
- ۴-۴-۳ توان باند β ۵۱
- ۴-۴-۴ نسبت توان θ/α ۵۳
- ۴-۴-۵ نسبت توان β/α ۵۴
- ۴-۵ مقایسه تغییرات ویژگی‌های زمانی در حالت ضرب ذهنی نسبت به حالت استراحت ۵۶
- ۴-۵-۱ تغییرات متوسط قدرمطلق دامنه ۵۶
- ۴-۵-۲ تغییرات پراش ۵۸
- ۴-۶ مقایسه تغییرات ویژگی‌های فرکانسی در حالت ضرب ریاضی نسبت به حالت استراحت ۵۹
- ۴-۶-۱ تغییرات توان باند θ ۵۹
- ۴-۶-۲ تغییرات توان باند α ۶۱
- ۴-۶-۳ تغییرات توان باند β ۶۲
- ۴-۶-۴ تغییرات نسبت توان θ/α ۶۴
- ۴-۶-۵ نسبت توان β/α ۶۵
- ۴-۵ نتیجه‌گیری ۶۷

فصل پنجم: طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه عصبی پس انتشار خطا

- ۵-۱ شبکه عصبی پس انتشار خطای چند لایه
- ۵-۱-۱ مرحله گذر مستقیم ۷۱
- ۵-۱-۲ مرحله گذر معکوس ۷۲

- ۳-۱-۵ تعیین تعداد نرون‌های لایه خروجی در مسایل طبقه‌بندی.....۷۳
- ۲-۵ ملاک‌های ارزیابی طبقه‌بندی.....۷۳
- ۳-۵ بررسی عملکرد شبکه‌های عصبی پس انتشار خطا با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی.....۷۵
- ۴-۵ انتخاب بردار ویژگی‌ها و پارامترهای شبکه عصبی جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی.....۸۱
- ۱-۴-۵ ویژگی‌ها.....۸۱
- ۲-۴-۵ ترکیب‌های مختلف فعالیت‌های ذهنی.....۸۱
- ۳-۴-۵ تعداد الگوهای آموزشی و آزمایشی.....۸۲
- ۴-۴-۵ نحوه انتخاب داده‌های آموزشی و آزمایشی.....۸۲
- ۵-۴-۵ چیدن جدول داده‌ها و بردار هدف (خروجی دلخواه شبکه).....۸۳
- ۶-۴-۵ نحوه نرمالیزه کردن داده‌ها.....۸۳
- ۷-۴-۵ ساختار شبکه عصبی و نحوه تعلیم شبکه.....۸۴
- ۵-۵ بررسی تأثیر نرمالیزه کردن داده‌ها در طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه عصبی پس انتشار خطا.....۸۴
- ۶-۵ تأثیر تعداد نرون‌های خروجی شبکه در طبقه‌بندی سیگنال‌های مغزی.....۸۷
- ۷-۵ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه پس انتشار خطا.....۸۹
- ۸-۵ بحث و نتیجه‌گیری.....۹۱

فصل ششم: طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع پایه شعاعی

- ۱-۶ ساختار شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی.....۹۵
- ۲-۶ بررسی کارایی شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی.....۹۷
- ۳-۶ انتخاب داده‌های آموزشی و آزمایشی جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی.....۱۰۰
- ۱-۳-۶ انتخاب داده‌های آموزشی و آزمایشی جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی.....۱۰۱
- ۲-۳-۶ بررسی تأثیر نرمالیزه کردن داده‌ها در طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی.....۱۰۱
- ۳-۳-۶ تعیین تعداد نرون‌ها در لایه مخفی.....۱۰۴
- ۴-۶ نتایج طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی.....۱۰۵
- ۵-۶ بحث و نتیجه‌گیری.....۱۰۷

فصل هفتم: طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه‌های عصبی واحدی

- ۱-۷ ساختار شبکه عصبی واحدی در مسایل طبقه‌بندی.....۱۱۱
- ۲-۷ انتخاب داده‌های آموزشی و آزمایشی جهت تعلیم شبکه عصبی واحدی.....۱۱۲

- ۳-۷ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با درجه پیچیدگی مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی پس انتشار خطای واحدی ۱۱۳
- ۴-۷ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با درجه پیچیدگی مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی-واحدی بر مبنای توابع پایه شعاعی ۱۱۵
- ۵-۷ بررسی تأثیر تعداد دفعات تکرار تعلیم شبکه در طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه‌های عصبی پس انتشار خطای واحدی ۱۱۶
- ۶-۷ بررسی تأثیر تعداد دفعات تکرار تعلیم شبکه در طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه‌های عصبی واحدی بر مبنای توابع شعاعی ۱۱۷
- ۷-۷ بررسی تأثیر تعداد دفعات تکرار تعلیم و ساختار شبکه در طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه‌های عصبی واحدی پس انتشار خطا ۱۱۸
- ۸-۷ بحث و نتیجه‌گیری ۱۲۰

فصل هشتم: طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از روش‌های آماری

- ۱-۸ فاصله اقلیدسی ۱۲۶
- ۲-۸ طبقه‌بندی کننده Bayesian ۱۲۸
- ۳-۸ نحوه محاسبه پارامترهای آماری و عوامل مؤثر بر آن‌ها ۱۳۱
- ۱-۳-۸ بردار میانگین ۱۳۱
- ۲-۳-۸ ماتریس کوواریانس ۱۳۱
- ۳-۳-۸ محاسبه احتمال وقوع هر کلاس ۱۳۲
- ۴-۳-۸ انتخاب مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی ۱۳۲
- ۴-۸ بررسی عملکرد طبقه‌بندی کننده‌های آماری با داده‌های شبیه‌سازی ۱۳۳
- ۵-۸ انتخاب داده‌های آموزشی و آزمایشی به روش Holdout ۱۳۴
- ۶-۸ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی به روش نرم اقلیدسی و انتخاب داده‌ها به روش Holdout ۱۳۵
- ۱-۶-۸ تأثیر نرمالیزه کردن داده‌ها در طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی به روش نرم اقلیدسی ۱۳۵
- ۲-۶-۸ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی به روش نرم اقلیدسی با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده ۱۳۶
- ۷-۸ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی به روش بیزین و انتخاب داده‌ها به روش Holdout ۱۳۸
- ۱-۷-۸ تأثیر نرمالیزه کردن داده‌ها در طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی به روش بیزین ۱۳۹
- ۲-۷-۸ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی به روش بیزین با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده ۱۴۰
- ۸-۸ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از طبقه‌بندی کننده‌های آماری و انتخاب داده‌ها به روش Leave one out ۱۴۲

۸-۹ بحث و نتیجه‌گیری..... ۱۴۳

فصل نهم: طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی از درجه پیچیدگی مختلف با استفاده از منطق فازی

- ۹-۱ طراحی سیستم فازی به عنوان تقریب‌زن عمومی با استفاده از روش تعلیم‌گرایان نزولی ۱۵۰
- ۹-۱-۱ تابع عضویت گوسی..... ۱۵۱
- ۹-۱-۲ فازی‌گر تکین..... ۱۵۱
- ۹-۱-۳ موتور استنتاج حاصلضرب..... ۱۵۱
- ۹-۱-۴ فازی‌زدای میانگین مرکز..... ۱۵۱
- ۹-۲ شبیه‌سازی سیستم فازی به عنوان یک تقریب‌زن عمومی ۱۵۳
- ۹-۳ استخراج ویژگی‌ها از سیگنال‌های مغزی جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی..... ۱۵۴
- ۹-۴ ساختار سیستم فازی جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی..... ۱۵۴
- ۹-۴-۱ تعیین تعداد قواعد فازی..... ۱۵۵
- ۹-۵ طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از طبقه‌بندی کننده فازی..... ۱۵۶
- ۹-۶ بحث و نتیجه‌گیری ۱۵۷

فصل دهم: نتیجه و پیشنهادات

- ۱۰-۱ روال آزمایش و استخراج ویژگی‌ها ۱۶۰
- ۱۰-۲ نتایج حاصل از بررسی تغییرات پویایی سیگنال‌های مغزی..... ۱۶۱
- ۱۰-۳ نتایج طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی به روش‌های آماری، عصبی و فازی..... ۱۶۱

ضمائم

- لغت‌نامه..... ۱۶۷
- فهرست واژه‌های خلاصه شده..... ۱۷۱
- مراجع..... ۱۷۲
- مقاله ارایه شده در نهمین کنفرانس بین‌المللی برق ۸۰.....

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۱): نتایج طبقه‌بندی بلوغ فکری ۱۳۱ کودک با استفاده از شبکه‌های عصبی..... ۳
- جدول (۱-۲): تخمین میزان هوشیاری با استفاده از شبکه عصبی و Linear regression ۴
- جدول (۱-۳): نتایج طبقه‌بندی سیگنال‌های مغزی به روش‌های مختلف..... ۶
- جدول (۱-۴): نتایج طبقه‌بندی فرایند شناخت با استفاده از سیگنال‌های مغزی..... ۸
- جدول (۲-۱): مقادیر D2 برای کانال‌های مختلف طی فعالیت‌های ذهنی برای دو مجموعه از داده‌ها..... ۲۱
- جدول (۳-۱): اعداد در نظر گرفته شده برای آزمایش ضرب ریاضی در سطوح مختلف..... ۳۱
- جدول (۳-۲): نتایج محاسبه ضرب در سطوح مختلف در حالت چشم باز و با شنیدن اعداد..... ۳۲
- جدول (۳-۳): نتایج محاسبه ضرب در سطوح مختلف در حالت چشم باز و با نشان دادن اعداد..... ۳۲
- جدول (۳-۴): نتایج محاسبه ضرب در سطوح مختلف در حالت چشم بسته و با شنیدن اعداد..... ۳۳
- جدول (۳-۵): نتایج نظرسنجی در حالت‌های مختلف و محاسبه ضرب در سطوح مختلف..... ۳۳
- جدول (۳-۶): زمان انجام محاسبات در هر آزمایش ضرب..... ۳۳
- جدول (۳-۷): خلاصه روند آزمایش برای فعالیت‌های ذهنی مختلف..... ۳۵
- جدول (۴-۱): مقادیر متوسط و انحراف معیار قدرمطلق دامنه در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C3..... ۴۵
- جدول (۴-۲): مقادیر متوسط و انحراف معیار قدرمطلق دامنه در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C4..... ۴۶
- جدول (۴-۳): مقادیر متوسط و انحراف معیار قدرمطلق دامنه در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال P3..... ۴۶
- جدول (۴-۴): مقادیر متوسط و انحراف معیار پراش در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C3..... ۴۶
- جدول (۴-۵): مقادیر متوسط و انحراف معیار پراش در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C4..... ۴۷
- جدول (۴-۶): مقادیر متوسط و انحراف معیار پراش در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال P3..... ۴۷
- جدول (۴-۷): توان باند α شخص اول در کانال C3 برای فعالیت‌های مختلف ضرب ذهنی ریاضی..... ۴۸
- جدول (۴-۸): مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C3..... ۴۸
- جدول (۴-۹): مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C4..... ۴۹
- جدول (۴-۱۰): مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال P3..... ۴۹
- جدول (۴-۱۱): نتایج تغییرات P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی برای کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری..... ۴۹
- جدول (۴-۱۲): مقایسه ویژگی P_0 در جفت کانال‌های مختلف مغزی..... ۵۰
- جدول (۴-۱۳): مقادیر متوسط و انحراف معیار P_{α} در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C3..... ۵۰
- جدول (۴-۱۴): مقادیر متوسط و انحراف معیار P_{α} در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C4..... ۵۰
- جدول (۴-۱۵): مقادیر متوسط و انحراف معیار P_{α} در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال P3..... ۵۱
- جدول (۴-۱۶): نتایج تغییرات P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی برای کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری..... ۵۱
- جدول (۴-۱۷): مقایسه ویژگی P_{α} در جفت کانال‌های مختلف مغزی..... ۵۱

- جدول (۴-۱۸) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C3 ۵۲
- جدول (۴-۱۹) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C4 ۵۲
- جدول (۴-۲۰) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال P3 ۵۲
- جدول (۴-۲۱) : نتایج تغییرات P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی برای کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری ۵۲
- جدول (۴-۲۲) : مقایسه ویژگی P_β در جفت کانال‌های مختلف مغزی ۵۲
- جدول (۴-۲۳) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C3 ۵۳
- جدول (۴-۲۴) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C4 ۵۳
- جدول (۴-۲۵) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال P3 ۵۳
- جدول (۴-۲۶) : نتایج تغییرات P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی برای کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری ۵۳
- جدول (۴-۲۷) : مقایسه ویژگی P_β در جفت کانال‌های مختلف مغزی ۵۴
- جدول (۴-۲۸) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C3 ۵۴
- جدول (۴-۲۹) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال C4 ۵۵
- جدول (۴-۳۰) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی، کانال P3 ۵۵
- جدول (۴-۳۱) : نتایج تغییرات P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی برای کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری ۵۵
- جدول (۴-۳۲) : مقایسه ویژگی P_β/P_α در جفت کانال‌های مختلف مغزی ۵۵
- جدول (۴-۳۳) : مقادیر متوسط و انحراف معیار MAV در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C3 ۵۶
- جدول (۴-۳۴) : مقادیر متوسط و انحراف معیار MAV در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C4 ۵۶
- جدول (۴-۳۵) : مقادیر متوسط و انحراف معیار MAV در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال P3 ۵۷
- جدول (۴-۳۵) : مقایسه MAV آزمایش ضرب ذهنی در سطوح L1 و L2 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری ۵۷
- جدول (۴-۳۶) : مقایسه MAV آزمایش ضرب ذهنی L3 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری ۵۷
- جدول (۴-۳۷) : مقادیر متوسط و انحراف معیار پراش در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C3 ۵۸
- جدول (۴-۳۸) : مقادیر متوسط و انحراف معیار پراش در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C4 ۵۸
- جدول (۴-۳۹) : مقادیر متوسط و انحراف معیار پراش در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال P3 ۵۸
- جدول (۴-۴۰) : مقایسه تغییرات پراش آزمایش ضرب ذهنی در سطوح L1 و L2 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری ۵۹
- جدول (۴-۴۱) : نتایج تغییرات پراش در سطح L3 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری ۵۹

جدول (۴-۴۲) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C3	۵۹.
جدول (۴-۴۳) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C4	۶۰.
جدول (۴-۴۴) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0 در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال P3	۶۰.
جدول (۴-۴۵) : مقایسه تغییرات P_0 آزمایش ضرب ذهنی در سطوح L1 و L2 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۰.
جدول (۴-۴۶) : مقایسه تغییرات P_0 آزمایش ضرب ذهنی در سطح L3 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۰.
جدول (۴-۴۷) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C3	۶۱.
جدول (۴-۴۸) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C4	۶۱.
جدول (۴-۴۹) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال P3	۶۱.
جدول (۴-۵۰) : نتایج تغییرات P_α آزمایش ضرب ذهنی سطوح L1 و L2 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۲.
جدول (۴-۵۱) : مقایسه تغییرات P_α آزمایش ضرب ذهنی در سطح L3 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۲.
جدول (۴-۵۲) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C3	۶۲.
جدول (۴-۵۳) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C4	۶۳.
جدول (۴-۵۴) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال P3	۶۳.
جدول (۴-۵۵) : مقایسه تغییرات P_β آزمایش ضرب ذهنی در سطوح L1 و L2 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۳.
جدول (۴-۵۶) : مقایسه تغییرات P_β آزمایش ضرب ذهنی در سطح L3 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۳.
جدول (۴-۵۷) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C3	۶۴.
جدول (۴-۵۸) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C4	۶۴.
جدول (۴-۵۹) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_0/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال P3	۶۴.
جدول (۴-۶۰) : مقایسه تغییرات P_0/P_α آزمایش ضرب ذهنی در سطوح L1 و L2 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۵.
جدول (۴-۶۱) : مقایسه تغییرات P_0/P_α آزمایش ضرب ذهنی در سطح L3 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری	۶۵.
جدول (۴-۶۲) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C3	۶۵.
جدول (۴-۶۳) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال C4	۶۶.
جدول (۴-۶۴) : مقادیر متوسط و انحراف معیار P_β/P_α در سطوح مختلف ضرب ذهنی و آزمایش استراحت، کانال P3	۶۶.

جدول (۴-۶۵) : مقایسه تغییرات P_{β} / P_{α} آزمایش ضرب ذهنی در سطوح L_1 و L_2 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری.....	۶۶
جدول (۴-۶۶) : مقایسه تغییرات P_{β} / P_{α} آزمایش ضرب ذهنی در سطح L_3 نسبت به حالت استراحت در کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری.....	۶۶
جدول (۴-۶۷) : تغییرات ویژگی‌های حوزه زمان و فرکانس سیگنال‌های مغزی از درجه پیچیدگی مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری.....	۶۷
جدول (۴-۶۸) : مقایسه تغییرات ویژگی‌های حوزه زمان و فرکانس سیگنال‌های مغزی از درجه پیچیدگی مختلف نسبت به حالت آرامش روی کانال‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری.....	۶۷
جدول (۵-۱) : نتایج طبقه‌بندی دو تابع گوسی برای شبکه‌ای با ساختار $\Pi_{2,N1,N2}$	۷۷
جدول (۵-۲) : نتایج طبقه‌بندی دو تابع گوسی برای شبکه‌ای با ساختار $\Pi_{2,N1,N2,2}$	۷۷
جدول (۵-۳) : نتایج طبقه‌بندی ۵ تابع گوسی با همپوشانی مختلف با شبکه عصبی تغذیه مستقیم.....	۷۹
جدول (۵-۴) : ترکیب‌های مختلف بردارهای ویژگی جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های مختلف ذهنی.....	۸۱
جدول (۵-۵) : ترکیب‌های مختلف فعالیت‌های ذهنی و نماد جایگزین شده همراه با تعداد نرون‌های خروجی.....	۸۲
جدول (۵-۶) : تعداد کل پنجره‌های معتبر برای هر یک از فعالیت‌های ذهنی.....	۸۲
جدول (۵-۷) : بردار خروجی دلخواه جهت طبقه‌بندی ۴ فعالیت ذهنی مختلف.....	۸۳
جدول (۵-۸) : نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از معیار $CC\%$ با استفاده از داده‌های شخص اول.....	۸۶
جدول (۵-۹) : نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از معیار $CC\%$ با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص اول.....	۸۶
جدول (۵-۱۰) : تأثیر تعداد نرون‌های خروجی بر نرخ طبقه‌بندی صحیح بر اساس ملاک $CC\%$ برای دسته ویژگی IV نرمالیزه شده شخص اول.....	۸۸
جدول (۵-۱۱) : درصد طبقه‌بندی صحیح فعالیت‌های ذهنی بر اساس معیار CC با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص اول.....	۸۹
جدول (۵-۱۲) : درصد طبقه‌بندی صحیح فعالیت‌های ذهنی بر اساس معیار CC با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص دوم.....	۸۹
جدول (۵-۱۳) : درصد طبقه‌بندی صحیح فعالیت‌های ذهنی بر اساس معیار CC با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص سوم.....	۹۰
جدول (۵-۱۴) : درصد طبقه‌بندی صحیح فعالیت‌های ذهنی بر اساس معیار CC با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص چهارم.....	۹۰
جدول (۵-۱۵) : درصد طبقه‌بندی صحیح فعالیت‌های ذهنی بر اساس معیار CC با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص پنجم.....	۹۰
جدول (۵-۱۶) : متوسط و انحراف معیار نرخ طبقه‌بندی صحیح بر اساس ملاک CC روی افراد مختلف.....	۹۲
جدول (۵-۱۷) : متوسط و انحراف معیار نرخ طبقه‌بندی صحیح بر اساس SE روی افراد مختلف.....	۹۲
جدول (۵-۱۸) : متوسط و انحراف معیار نرخ $FA\%$ روی افراد مختلف.....	۹۳
جدول (۶-۱) : پارامترهای تعریف شده شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی.....	۹۶
جدول (۶-۲) : نرخ طبقه‌بندی دو تابع گوسی با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی.....	۹۸
جدول (۶-۳) : نتایج طبقه‌بندی ۵ تابع گوسی یک بعدی با همپوشانی مختلف توسط شبکه RBF.....	۹۸
جدول (۶-۴) : ترکیب‌های مختلف بردارهای ویژگی جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی.....	۱۰۲

- جدول (۵-۶): نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از معیار %CC توسط شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی با استفاده از داده‌های شخص اول..... ۱۰۲
- جدول (۶-۶): نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با معیار %CC توسط شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص اول..... ۱۰۳
- جدول (۶-۷): نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی بر حسب معیار %CC با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی و داده‌های نرمالیزه شده شخص دوم..... ۱۰۵
- جدول (۶-۸): نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی بر حسب معیار %CC با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی و داده‌های نرمالیزه شده شخص سوم..... ۱۰۵
- جدول (۶-۹): نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی بر حسب معیار %CC با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی و داده‌های نرمالیزه شده شخص چهارم..... ۱۰۶
- جدول (۶-۱۰): نتیجه طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی بر حسب معیار %CC با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی و داده‌های نرمالیزه شده شخص پنجم..... ۱۰۶
- جدول (۶-۱۱): متوسط و انحراف معیار نرخ طبقه‌بندی صحیح روی افراد مختلف بر اساس ملاک CC با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده و طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی..... ۱۰۸
- جدول (۶-۱۲): متوسط و انحراف معیار نرخ طبقه‌بندی صحیح بر اساس SE روی افراد مختلف با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده و طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی..... ۱۰۸
- جدول (۶-۱۳): متوسط و انحراف معیار نرخ FA/ روی افراد مختلف با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده و طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی..... ۱۰۹
- جدول (۷-۱): بردار خروجی دلخواه جهت طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه عصبی واحدی..... ۱۱۳
- جدول (۷-۲): ترکیب‌های مختلف بردارهای ویژگی جهت طبقه‌بندی ۴ فعالیت ذهنی (L1, L2, L3, B) با استفاده از شبکه‌های عصبی واحدی پس انتشار خطا..... ۱۱۳
- جدول (۷-۳): نتایج طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی بر حسب ملاک CC با استفاده از شبکه عصبی پس انتشار خطای واحدی..... ۱۱۳
- جدول (۷-۴): نتایج طبقه‌بندی فعالیت‌های ذهنی با استفاده از شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی واحدی بر حسب ملاک CC..... ۱۱۶
- جدول (۷-۵): نرخ طبقه‌بندی صحیح شبکه عصبی پس انتشار خطای واحدی با استفاده از دسته ویژگی چهارم بر حسب تعداد دفعات تکرار تعلیم..... ۱۱۷
- جدول (۷-۶): نرخ طبقه‌بندی صحیح شبکه عصبی بر مبنای توابع شعاعی واحدی با استفاده از دسته ویژگی چهارم و تعداد دفعات مختلف تعلیم شبکه..... ۱۱۸
- جدول (۷-۷): متوسط و انحراف معیار نرخ طبقه‌بندی صحیح بر اساس ملاک CC با استفاده از دسته ویژگی چهارم و ششم بر حسب تعداد دفعات تکرار مختلف و ساختار مختلف شبکه با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص اول..... ۱۱۸
- جدول (۷-۸): متوسط و انحراف معیار نرخ طبقه‌بندی صحیح بر اساس ملاک CC با استفاده از دسته ویژگی چهارم و ششم بر حسب تعداد دفعات تکرار مختلف و ساختار مختلف شبکه با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص دوم..... ۱۱۹
- جدول (۷-۹): متوسط و انحراف معیار نرخ طبقه‌بندی صحیح بر اساس ملاک CC با استفاده از دسته ویژگی چهارم و ششم بر حسب تعداد دفعات تکرار مختلف و ساختار مختلف شبکه با استفاده از داده‌های نرمالیزه شده شخص سوم..... ۱۱۹