

محمدرضا غفرانی  
۴۰۰۱۳۱۰۷۶  
۵ خرداد ۱۴۰۱

## شبکه‌های عصبی

### تمرین پنجم

### پیش‌پردازش اولیه

داده‌های این تمرین در فایل‌های مختلفی قرار داشت، بنابراین اطلاعات موجود در همه این داده‌ها را خوانده و با هم ادغام می‌کنیم. خوشبختانه ساختار داده‌های موجود در فایل‌های مختلف با هم یکسان بوده و از این جهت نیاز به انجام کار خاصی نیست منتها برچسبی که برای هر داده در نظر گرفته شده است در فایل‌های مختلف متفاوت است. با توجه به صورت تمرین، برچسب‌ها را باید به دو دسته اتمام موفقیت‌آمیز حرکت و یا شکست در حرکت تقسیم کنیم. در جدول ۱ این تقسیم‌بندی مشاهده می‌شود.

جدول ۱: جدول تبدیل برچسب داده‌های آموزشی به حالت صفرویکی

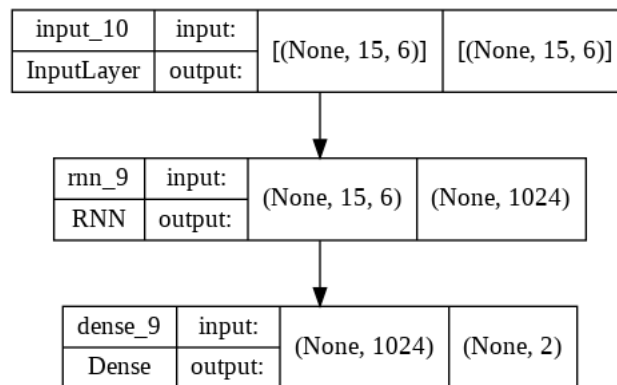
برچسب	موفقیت‌آمیز بودن حرکت
back_col	•
bottom_collision	•
bottom_obstruction	•
collision	•
collision_in_part	•
collision_in_tool	•
fr_collision	•
front_col	•
left_col	•
lost	•
moved	۱
normal	۱
obstruction	•
ok	۱
right_col	•
slightly_moved	۱

پس از خواندن داده‌ها و انجام پیش‌پردازش بالا، داده‌ها را به نسبت ۷، ۱ و ۲ به ترتیب به داده‌های آموزشی، ارزیابی و آزمون تقسیم می‌کنیم.

## سوال یک

پیش از بررسی تاثیر تعداد نورون‌های لایه مخفی در عملکرد شبکه Elman ذکر نکاتی در رابطه با داده‌ها و پیاده‌سازی انجام شده ضروری به نظر می‌رسد. نکته اولی آن که برچسب حدود ۷۰ درصد داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و ارزیابی یکسان است. بنابراین رسیدن به صحت عملکرد ۷۰ درصد در داده‌ها چندان جای تعجب ندارد، چرا که اگر برچسب تمامی داده‌ها را یک برچسب تشخیص دهد می‌تواند به صحت ۷۰ درصد برسد.

نکته دوم در رابطه با پیاده‌سازی شبکه Elman است. ما برای پیاده‌سازی شبکه Elman یک سلول بازگشتی را با ارث‌بری از کلاس Layer توسعه داده‌ایم. خروجی این لایه در قدم بعدی برای تعیین دسته داده به یک لایه Dense با تابع فعال‌سازی softmax داده می‌شود. تصویر معماری مدل در شکل ۱ آورده شده است. برای آموزش تمامی شبکه‌ها ۵۰ گام یادگیری طی شده است. مقدار نرخ یادگیری نیز برابر  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: معماری شبکه Elman در پیاده‌سازی ما

در ادامه به تحلیل نتایج حاصل شده می‌پردازیم. نمودار عملکرد مدل در هر گام یادگیری در شکل ۲ و نتایج عددی نهایی در جدول ۲ آورده شده است.

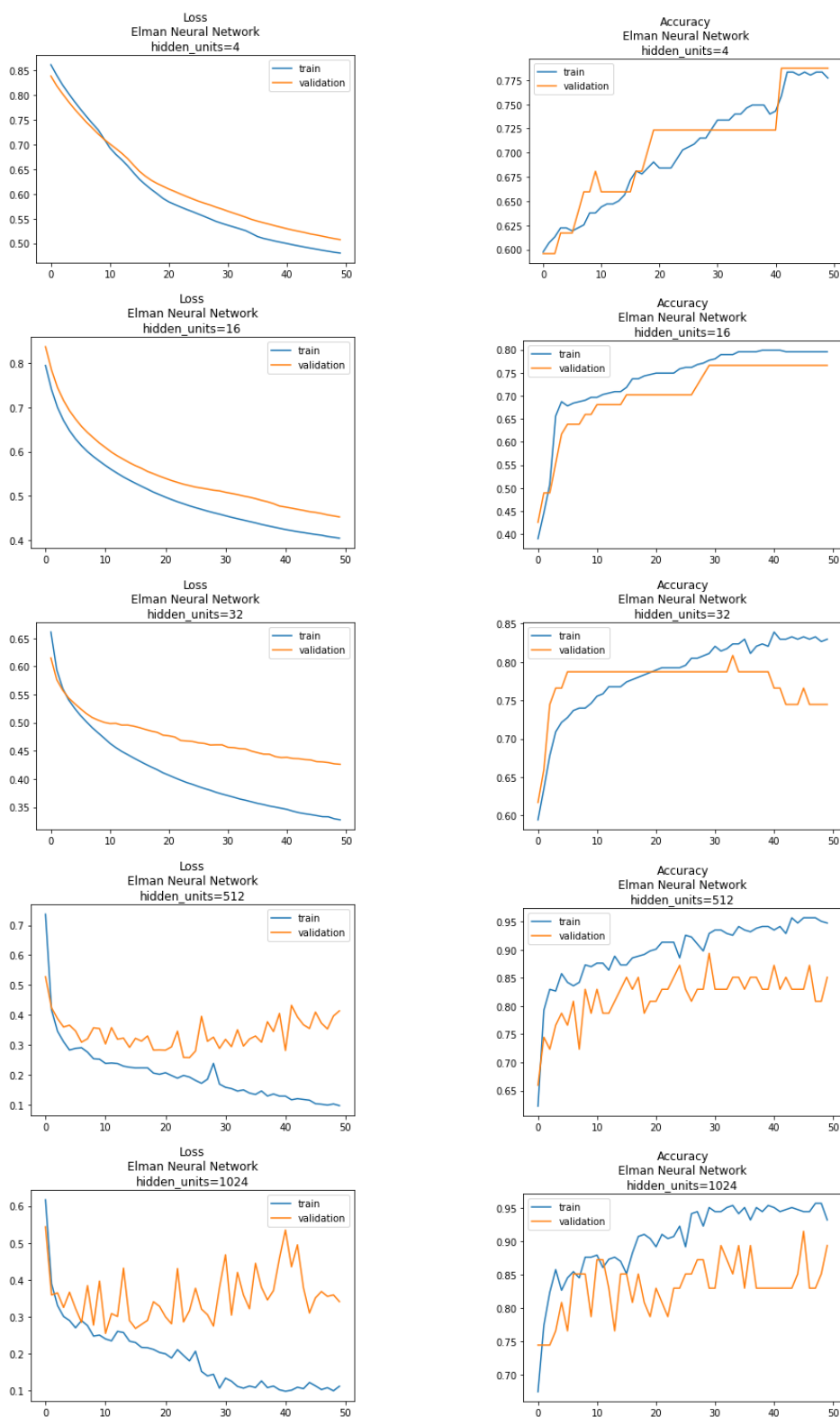
Table 2: عملکرد شبکه عصبی Elman به ازای تعداد نورون‌های مختلف

index	neurons	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	4	0.48	0.78	0.51	0.79	0.59	0.71
2	16	0.41	0.80	0.45	0.77	0.49	0.74
3	32	0.33	0.83	0.43	0.74	0.37	0.81
4	512	0.10	0.95	0.41	0.85	0.48	0.86
5	1024	0.11	0.93	0.34	0.89	0.51	0.81

بر طبق انتظار با افزایش نورون‌های لایه مخفی عملکرد مدل رفته‌رفته بهبود می‌یابد، هم از بابت صحت و هم از بابت نرخ loss. با افزایش تعداد نورون‌های لایه مخفی انتظار داشتیم که مدل بر روی داده‌ها دچار بیش‌برازش شود، همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده

می‌شود این اتفاق در عمل رخ داده است، اما همچنان مدل‌های با تعداد پارامتر بالاتر نسبت به مدل‌های ساده‌تر عملکرد بهتری دارند. به نظر می‌رسد الگوهای موجود در داده‌ها جزئیات مشترک فراوانی دارند که با افزایش تعداد نورون‌های لایه مخفی به ۱۰۲۴ مدل همچنان نتایج خوبی را ارائه می‌دهد. با افزایش تعداد نورون‌های موجود در لایه مخفی جهش‌های فراوانی در عملکرد مدل اتفاق می‌افتد که به نظر می‌رسد با کاهش نرخ یادگیری بتوان از این اتفاق جلوگیری کرد.

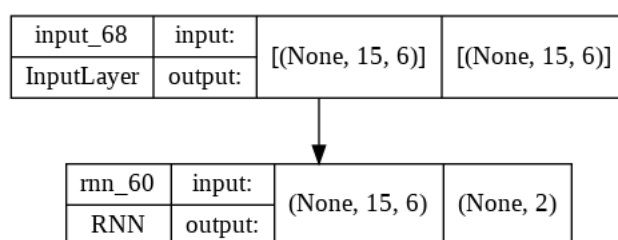
تا این جا به نظر می‌رسد که مدل‌های با تعداد لایه‌های مخفی بیشتر از تمامی جهات بهتر هستند. باید گفت گرچه صحت عملکرد این مدل‌ها بهتر است اما این مدل‌ها به علت زیاد بودن تعداد نورون‌های لایه مخفی نسبت به دیگر مدل‌ها در هنگام استنتاج کندتر بوده و زمان بیشتر برای سپری کردن هر گام یادگیری نیاز دارند.



شکل ۲: بررسی تاثیر تعداد نورون‌های لایه مخفی بر عملکرد شبکه Elman

پیش از تحلیل شبکه عصبی Jordan ابتدا لازم است توضیحاتی در خصوص جزئیات پیاده‌سازی آن داده شود. در این شبکه عصبی نیز ما ابتدا یک سلول بازگشتی را با آرث‌بری از کلاس Layer توسعه دادیم. با توجه به آن که در شبکه عصبی Jordan خروجی نهایی مدل مجدداً به لایه پنهان داده می‌شود، بنابراین در پیاده‌سازی ما لایه Dense در همان سلول انجام شده است. سلول خود دسته خروجی را با استفاده از تابع softmax تعیین کرده و مجدداً برای تعیین خروجی بعدی استفاده می‌شود. شکل ۳ ساختار پیاده‌سازی انجام شده ما را نشان می‌دهد.

در هنگام آموزش این مدل نیز نرخ یادگیری برابر  $10^{-4}$ ، گام یادگیری برابر ۵۰ و اندازه دسته برابر ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: معماری شبکه Jordan در پیاده‌سازی ما

حال به بررسی نتایج حاصل شده از این شبکه می‌پردازیم. عملکرد مدل در هر گام یادگیری در شکل ۵ و نتایج نهایی حاصل شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

Table 3: عملکرد شبکه عصبی Jordan به ازای تعداد نوروں‌های مختلف

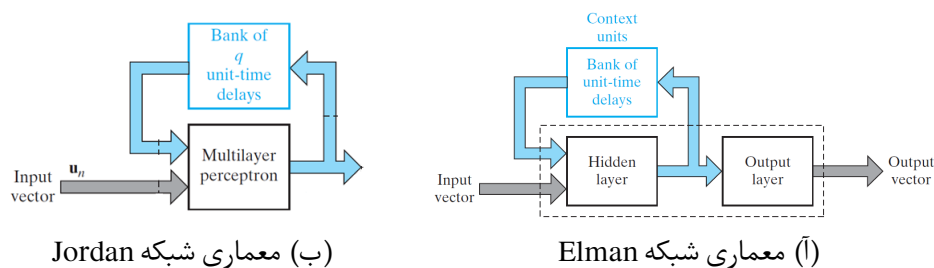
index	neurons	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	4	0.57	0.72	0.57	0.74	0.59	0.68
2	16	0.48	0.77	0.50	0.81	0.48	0.74
3	32	0.47	0.79	0.48	0.74	0.49	0.74
4	512	0.28	0.86	0.39	0.79	0.35	0.82
5	1024	0.25	0.88	0.42	0.79	0.35	0.77

بیشتر تحلیل‌های انجام شده برای نتایج مدل Elman در این نتایج نیز دیده می‌شوند. با افزایش تعداد نوروں‌های لایه مخفی نتایج رفته‌رفته بهتر شده است، با افزایش نوروں‌ها مدل بر روی نتایج دچار بیش‌پردازش شده اما همچنان نتایج نهایی نسبت به مدل‌های ساده بهتر است و این که با افزایش نوروں‌ها جهش‌های شدیدی در عملکرد مدل اتفاق می‌افتد. در این شبکه عصبی نیز با افزایش تعداد نوروں‌های لایه مخفی مدل سنگین‌تر شده و زمان بیشتری برای آموزش و استنتاج می‌طلبد.

با مقایسه نتایج حاصل شده از این شبکه عصبی با شبکه عصبی Elman مشخص می‌شود عملکرد شبکه عصبی Elman نسبت به شبکه عصبی Jordan بهتر است. دلیل این تفاوت عملکرد در ساختار این شبکه‌ها است. در شبکه عصبی Elman خروجی لایه پنهان مجدداً توسط همان لایه استفاده می‌شود در حالی که در شبکه عصبی Jordan خروجی نهایی شبکه عصبی مجدداً به لایه‌های پنهان داده می‌شود. در این مسئله لایه نهایی Jordan دو نوروں از

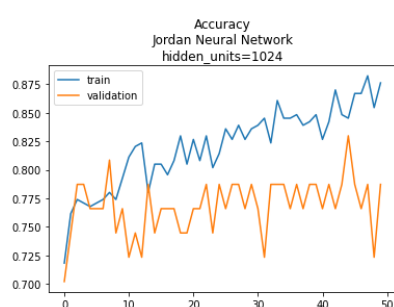
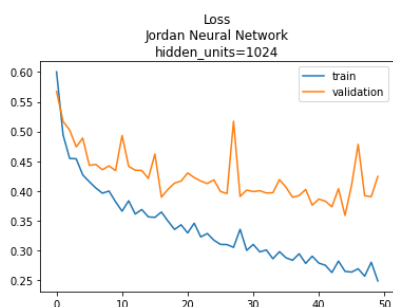
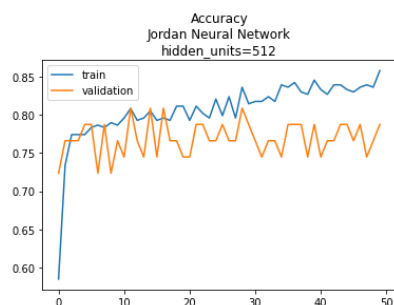
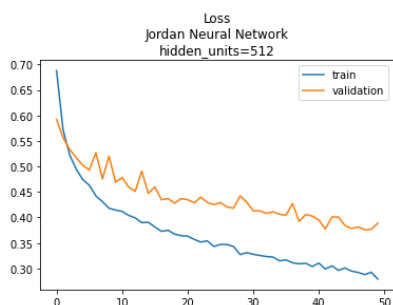
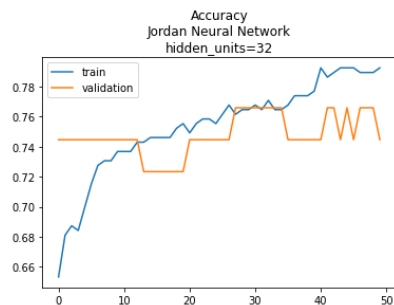
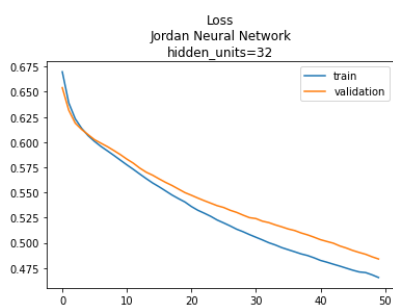
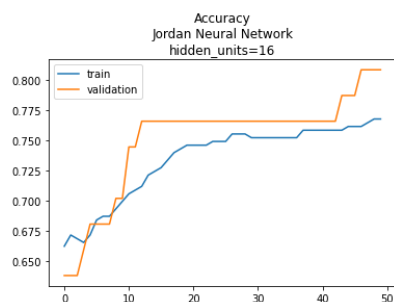
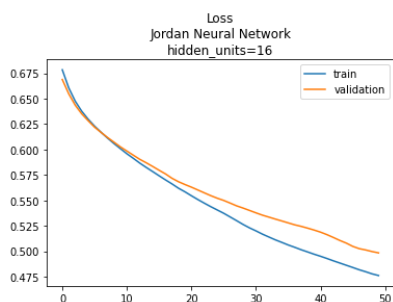
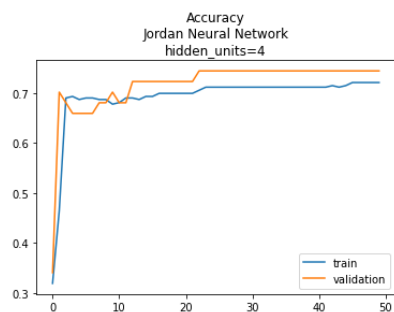
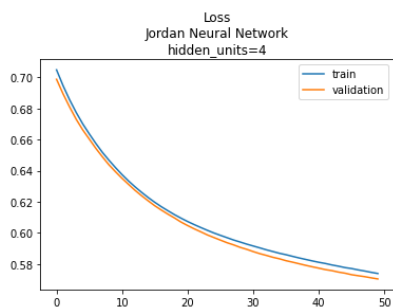
نوع softmax داشت و خروجی این دو نورون مجدداً توسط نورون‌های لایه مخفی استفاده می‌شد. در حالی که در شبکه عصبی Elman خروجی لایه مخفی که در آزمایش‌های ما حداقل ۴ بود، مجدداً به لایه مخفی داده می‌شود. طبیعی است که لایه مخفی با استفاده از خروجی ۴ نورون بهتر بتواند الگوی داده‌ها را شناسایی کند.

شمای کلی این دو شبکه در شکل ۴ دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو این شبکه‌ها از نوع بازگشتی بوده و از خروجی تولید شده در مراحل قبلی برای تولید خروجی در مرحله فعلی استفاده می‌کنند. تنها تفاوت آن‌ها در خروجی استفاده شده از مراحل قبلی است. شبکه Jordan از خروجی نهایی شبکه در مراحل قبل برای تولید خروجی در مرحله فعلی استفاده می‌کند اما شبکه Elman از خروجی تولید شده توسط لایه پنهان در مرحله قبلی برای تولید خروجی در مرحله فعلی استفاده می‌کند. همین نکته باعث عملکرد بهتر شبکه عصبی Elman نسبت به شبکه عصبی Jordan شده است.



شکل ۴: مقایسه معماری شبکه‌های Elman و Jordan

در این مسئله دو برجسب را باید پیش‌بینی کنیم. بنابراین آخرین لایه هر دو شبکه دو نورون دارد. شبکه Jordan خروجی همین دو نورون‌ها را به دوباره به شبکه بازگشت می‌دهد، در حالی که شبکه Elman خروجی لایه پنهان را به شبکه بازگشت می‌دهد. بنابراین با افزایش تعداد نورون‌های لایه پنهان شبکه Elman تعداد خروجی‌های بیشتری را به شبکه بازگشت می‌دهد، در حالی که شبکه Jordan با افزایش نورون‌ها نیز خروجی همان دو نورون را دوباره به شبکه بازگشت می‌دهد. به همین دلیل است که شبکه Elman در حالت کلی بهتر از شبکه Jordan عمل می‌کند.



شکل ۵: بررسی تاثیر تعداد نورون‌های لایه مخفی بر عملکرد شبکه Jordan

## سوال دو

ابتدا توضیحاتی در بابت نحوه پیاده سازی مدل ترکیبی می دهیم. در مدل ترکیبی ما ورودی به صورت همزمان به همه مدل ها داده شده و مدل ها خروجی مد نظر خود را تولید می کنند. تمامی خروجی های تولید شده توسط این زیرمدل ها در مرحله بعد به یک لایه میانگین گیر داده می شود. خروجی همین لایه میانگین گیر به عنوان خروجی نهایی مدل در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب خود مدل به غیر از آموزش زیرمدل ها پارامتر دیگری برای آموزش ندارد. آموزش زیر شبکه ها نیز مطابق روال طی شده در سوال قبلی آموزش داده می شود. پارامترهای در نظر گرفته شده در هنگام آموزش نیز همان پارامترها بوده و تغییری داده نشده است. در ادامه به بررسی تاثیر تجمیع این شبکه ها با هم می پردازیم.

### هنگامی که مجموعه داده بین زیرمدل ها مشترک است.

در جداول ۴، ۵ و ۶ عملکرد مدل ها در هنگامی که داده آموزشی زیرمدل ها یکسان است مشاهده می شود. با مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از عملکرد مدل ها در حالت تکی مشاهده می شود که عملکرد مدل ها در حالت ترکیب شبکه های Elman نسبت به حالت های تکی بهبود چندانی نداشته است. اما در حالت ترکیب شبکه های Jordan عملکرد مدل ترکیبی نسبت به تک شبکه های Jordan بهبود داشته است. در مدل های ترکیبی Elman و Jordan عملکرد شبکه نسبت به تک شبکه Jordan بهتر است اما تغییر چندانی نسبت به تک شبکه های Elman ندارد.

علت این که مدل ترکیبی Elman نسبت به تک شبکه های Elman بهبود آنچنانی نداشته را می توان در این دانست که مدل Elman در حالت های ساده خود به اندازه کافی پیچیده است در نتیجه با ترکیب این شبکه ها نمی توان به دقت های بالایی رسید. اما ترکیب کردن شبکه ها باعث شده است مقدار loss به صورت کلی کم شود. علت این رخداد آن است که هر یک از شبکه ها به صورت مجزا از یکدیگر روی داده آموزش دیده اند. بنابراین با ترکیب این شبکه ها مدل نهایی می تواند با تجمیع این دانش ها با دقت بهتری احتمال متعلق بودن به هر کلاس را به دست آورد.

Table 4: Elman ترکیب شبکه عصبی با ترکیب شبکه های Elman

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	5 * Elman(4)	0.47	0.74	0.51	0.77	0.56	0.68
2	5 * Elman(32)	0.20	0.92	0.30	0.81	0.36	0.77
3	5 * Elman(1024)	0.06	0.97	0.80	0.85	1.00	0.82
4	Elman(4) + Elman(1024)	0.25	0.96	0.38	0.85	0.41	0.83
5	Elman(4) + Elman(16) + Elman(32) + Elman(512) + Elman(1024)	0.27	0.96	0.38	0.89	0.40	0.82



همان طور که بیان شد مدل حاصل از ترکیب شبکه‌های Jordan نسبت به حالت عادی شبکه‌های Jordan بهتر عمل می‌کند. چرا که مدل‌های Jordan به صورت تکی نمی‌توانست همه دانش را به خوبی در خود نگه دارد، اما ترکیب این شبکه‌ها بهتر می‌تواند دانش کلی داده‌ها را در خود ذخیره کند. هر مدل به صورت جداگانه آموزش دیده و دارای دانش کوچکی از داده‌ها است. با ترکیب دانش این مدل‌های کوچک می‌توانند عملکرد بهتری را نشان دهند. در این جا نیز همان طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، شبکه‌ها هم از نظر معیار accuracy و هم از نظر معیار loss بهبود داشته‌اند.

Table 5: نتایج شبکه عصبی با ترکیب شبکه‌های Jordan

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	5 * Jordan(4)	0.48	0.81	0.49	0.81	0.55	0.74
2	5 * Jordan(32)	0.28	0.86	0.39	0.77	0.35	0.83
3	5 * Jordan(1024)	0.14	0.94	0.31	0.85	0.40	0.83
4	Jordan(4) + Jordan(1024)	0.40	0.83	0.45	0.81	0.44	0.80
5	Jordan(4) + Jordan(16) + Jordan(32) + Jordan(512) + Jordan(1024)	0.38	0.84	0.43	0.79	0.42	0.78

عملکرد مدل ترکیبی از Elman و Jordan مابین مدل‌های تکی قرار می‌گیرد. به نوعی می‌توان گفت که در این مدل، شبکه‌های Elman به بهبود نتیجه کمک می‌کنند اما مدل‌های Jordan با توجه به عملکرد بد آن‌ها در حالت عادی، باعث افت عملکرد مدل می‌شوند.

Table 6: نتایج شبکه عصبی با ترکیب شبکه‌های Elman و Jordan

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	2 * Elman(4) + 2 * Jordan(4)	0.52	0.77	0.53	0.77	0.54	0.76
2	2 * Elman(32) + 2 * Jordan(32)	0.36	0.80	0.40	0.74	0.46	0.75
3	2 * Elman(1024) + 2 * Jordan(1024)	0.15	0.95	0.30	0.89	0.35	0.84
4	Elman(4) + Elman(1024) + Jordan(4) + Jordan(1024)	0.32	0.93	0.39	0.79	0.42	0.85

### هنگامی که مجموعه داده بین زیرمدل ها متفاوت است.

نتایج این حالت در جدول های ۷، ۸ و ۹ دیده می شود. همان طور که مشاهده می شود نتایج مدل نسبت به حالت قبل بدتر شده است. دلیل این افت عملکرد را می توان در تعداد محدود مجموعه داده آموزشی برای آموزش هر زیر شبکه دانست. تعداد کل داده های آموزشی شبکه حدود ۳۰۰ تا است. با پخش کردن این تعداد داده های آموزشی بین ۵ زیر شبکه مختلف تقسیم کنیم برای هر شبکه ۶۰ داده آموزشی می ماند که تعداد بسیار کمی برای آموزش یک شبکه عصبی است.

Table 7: Elman شبکه عصبی با ترکیب شبکه های Elman

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	5 * Elman(4)	0.60	0.67	0.61	0.66	0.58	0.70
2	5 * Elman(32)	0.51	0.77	0.52	0.74	0.51	0.77
3	5 * Elman(1024)	0.36	0.83	0.38	0.77	0.44	0.75
4	Elman(4) + Elman(1024)	0.39	0.87	0.40	0.81	0.44	0.84
5	Elman(4) + Elman(16), Elman(32), Elman(512), Elman(1024)	0.48	0.78	0.47	0.74	0.49	0.82

Table 8: Jordan شبکه عصبی با ترکیب شبکه های Jordan

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	5 * Jordan(4)	0.64	0.67	0.65	0.66	0.64	0.70
2	5 * Jordan(32)	0.64	0.70	0.64	0.68	0.64	0.74
3	5 * Jordan(1024)	0.65	0.70	0.65	0.66	0.64	0.73
4	Jordan(4) + Jordan(1024)	0.44	0.80	0.48	0.81	0.50	0.76
5	Jordan(4) + Jordan(16) + Jordan(32) + Jordan(512) + Jordan(1024)	0.65	0.68	0.65	0.66	0.65	0.72

Table 9: Elman و Jordan شبکه‌های ترکیب عصبی با ترکیب شبکه‌های

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	2 * Elman(4) + 2 * Jordan(4)	0.60	0.71	0.63	0.68	0.60	0.72
2	2 * Elman(32) + 2 * Jordan (32)	0.53	0.77	0.57	0.70	0.55	0.76
3	2 * Elman(1024) + 2 * Jordan (1024)	0.34	0.85	0.40	0.79	0.44	0.76
4	Elman(4) + Elman(1024) + Jordan(4) + Jordan(1024)	0.48	0.82	0.51	0.74	0.50	0.77
5	3 * Elman(32) + 2 * Jordan(1024)	0.46	0.79	0.48	0.70	0.50	0.78

برای بررسی تاثیر تعداد زیرشبکه‌ها بر روی عملکرد کلی مدل تجميع شده شبکه‌های عصبی Elman و Jordan را با ۳۲ لایه پنهان را امتحان می‌کنیم. نتایج این مدل در جدول ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. با افزایش تعداد زیر شبکه‌ها همان‌طور که در قسمت‌های قبل دیدیم عملکرد کلی مدل بهتر می‌شود اما در این جا چون داده‌های آموزشی بین زیرشبکه‌ها افراز شده است بنابراین با افزایش تعداد زیرمدل‌ها تعداد داده آموزشی که هر مدل در اختیار دارد کمتر می‌شود. بنابراین هر مدل نمی‌تواند به خوبی الگوی داده‌ها را آموخته و در نتیجه مدل عملکرد ضعیف‌تری را از خود نشان می‌دهد.

Table 10: عملکرد شبکه عصبی تجميع شده با تعداد مختلف زیرشبکه Elman

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	Elmant(32)	0.33	0.83	0.43	0.74	0.37	0.81
2	2 * Elman(32)	0.38	0.81	0.43	0.72	0.49	0.74
3	4 * Elman(32)	0.46	0.77	0.52	0.70	0.54	0.75
4	8 * Elman(32)	0.54	0.74	0.56	0.70	0.58	0.73
5	16 * Elman(32)	0.59	0.72	0.60	0.68	0.60	0.72

Table 11: عملکرد شبکه عصبی تجمیع شده با تعداد مختلف زیر شبکه Jordan

index	description	train		validation		test	
		loss	accuracy	loss	accuracy	loss	accuracy
1	Jordan(32)	0.47	0.79	0.48	0.74	0.49	0.74
2	2 * Jordan(32)	0.50	0.77	0.55	0.70	0.56	0.72
3	4 * Jordan(32)	0.55	0.75	0.58	0.68	0.57	0.73
4	8 * Jordan(32)	0.59	0.72	0.60	0.68	0.59	0.75
5	16 * Jordan(32)	0.62	0.70	0.63	0.68	0.61	0.75