

# مروری بر الگوریتم‌های شبکه‌ی عصبی

فرزاد عبدالحسینی، سید سبحان میریوسفی، هومن هاشمی  
دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی کامپیوتر  
{abdolhosseini, miryoosefi, hohashemi}@ce.sharif.edu

## چکیده -

کلید واژه‌ها - الگوریتم، هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی.

## ۱ - مقدمه

کار بر روی شبکه‌های عصبی مصنوعی یا به اختصار شبکه‌های عصبی از جایی آغاز شد که دانشمندان به این مهم دست یافتند که سیستم پردازش مغز انسان بسیار متفاوت با سیستم‌های کامپیوتری دیجیتال مرسوم می‌باشد. مغز انسان از یک ساختار بسیار پیچیده، غیر خطی و موازی بهره میبرد و همچنین قابلیت بهبود و ارتقای خود را نیز دارا می‌باشد.

برای مثال قدرت بینایی و بصری انسان را در نظر بگیرید که یک نوع پردازش اطلاعات است. ما اطلاعات رواز محیط بیرون توسط حسگر پیچیده چشم دریافت می‌کنیم آن‌ها را تجزیه و تحلیل می‌کنیم تا بتوانیم چیزهایی که برای تعامل با محیط نیاز داریم بدست آوریم. مغز انسان میتواند فرآیند تشخیص چهره در یک محیط نا آشنا را در کمتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه انجام دهد در صورتی که فرآیند‌های بسیار ساده تر از این برای کامپیوترهای حال حاضر چند روز زمان میبرد.

به عنوان مثالی دیگر خفاش را در نظر بگیرید. این خفاش از یک سیستم ردیاب صوتی یا همان سونار بهره میبرد به این شکل که هنگامی که در تعقیب شکار خود است یک موج صوتی از خود ساطع میکند و از روی انعکاس آن توسط طعمه میتواند اطلاعاتی نظیر سرعت نسبی طعمه، اندازه طعمه و ... بدست آورد. تمام این پردازش‌های پیچیده در مغز کوچک خفاش که به اندازه‌ی یک آلو است انجام می‌پذیرد.

اما مغز انسان یا خفاش چگونه این کارها را انجام می‌دهد؟

## ۲ - آشنایی و مفاهیم اولیه

در اینجا ابتدا یک تعریف ارائه می‌کنیم [۱] و سپس در بخش‌های بعد به توضیح آن می‌پردازیم:

شبکه عصبی مصنوعی یک پردازنده توزیع شده موازی و گسترده است و که از واحد‌های پردازشی ساده ساخته شده است

که میتواند دانش اکتسابی را در خود ذخیره کند و در آینده از آن‌ها در تصمیم‌گیری‌ها استفاده کند از دو جهت این شبکه عصبی مصنوعی مغز انسان را تداعی میکند:

۱. اطلاعات از محیط و توسط فرآیند یادگیری کسب میشود.

۲. میزان قدرت اتصالات بین واحد‌های پردازشی (نورون‌ها) که به آن وزن سیناپسی می‌گوییم برای ذخیره اطلاعات استفاده میشود.

### ۱-۲ مزایای شبکه‌های عصبی

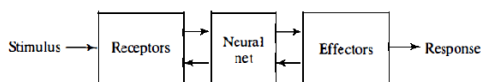
شبکه عصبی قدرت محاسباتی‌اش را از دو ویژگی بهره میگیرد ویژگی اول اینکه یک شبکه بسیار گسترده، موازی و توزیع شده است و ویژگی دوم اینکه قابلیت یادگیری است اینکه میتواند با توجه به محیط یک سری اطلاعات و تجارب کسب کند و از این تجارب در تصمیم‌گیری‌های بعدی استفاده کند به این ویژگی کلیت بخشی<sup>۱</sup> می‌گوییم. این ویژگی‌ها باعث میشود مسائلی که در حال حاضر برای کامپیوترهای مرسوم دست‌نیافتی است توسط این شبکه‌ها قابل حل باشد البته باید توجه داشت که گونه‌های خاصی از مسائل هستند که توسط این شبکه‌های عصبی به طور بهینه قابل حل هستند و پردازنده‌های مرسوم در بعضی موارد بهتر عمل میکنند. باید توجه داشت بخش‌های مربوط از یک مسئله را توسط این شبکه‌ها حل کنیم. همچنین تا ساختن شبکه عصبی که به طور کامل مغز انسان یا هر شبکه عصبی طبیعی دیگر را تداعی کند راه طولانی‌ای در پیش داریم.

حالا بعضی از مزایا و توانایی‌های شبکه‌های عصبی را ذکر میکنیم:

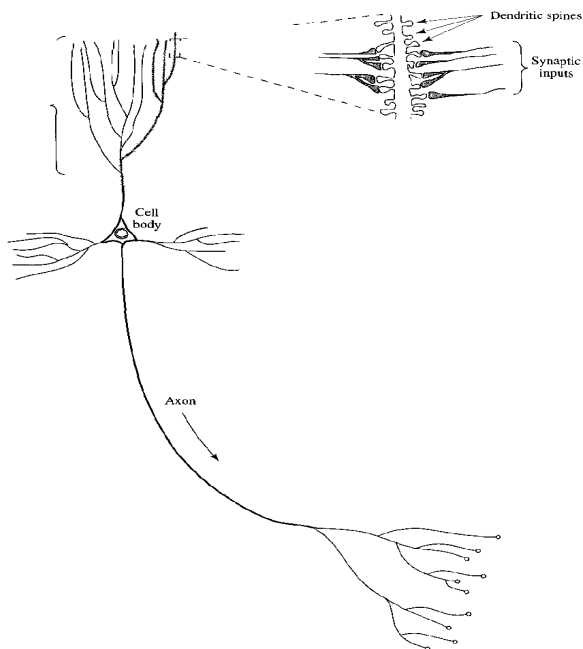
- توانایی غیرخطی بودن:<sup>۲</sup> واحد‌های سازنده شبکه عصبی یا همان نورون‌ها میتوانند غیرخطی باشند و در نتیجه کل

<sup>۱</sup> Generalization

<sup>۲</sup> Nonlinearity



شکل ۱: ساختار سه بخشی شبکه عصبی انسان



شکل ۲: ساختار نورون زیستی

بخش مرکزی همان شبکه عصبی است که شامل شبکه گسترده نورون ها است و محل تصمیم گیری میباشد. بخش اول یا همان گیرنده ها اطلاعات را از محیط گرفته و به سیگنال های قابل فهم برای شبکه عصبی تبدیل میکند و بخش آخر نیز دستورات را از شبکه عصبی گرفته و واکنش موردنظر را در محیط انجام میدهد. در سال ۱۹۱۱ ساختار نورونی<sup>۷</sup> برای مغز معرفی شد. نورون ها ۵ الی ۶ مرتبه توانی از سیلیکون کند تر هستند. اتفاقات در چیپ های سیلیکونی هر ۱ نانوثانیه اتفاق میافتد و این در حالی است که در نورون هر ۱ میلی ثانیه. ولی مغز انسان این سرعت کم نورون ها را با تعداد بسیار زیاد آن ها و اتصالات (سیناپس ها) بسیار زیاده تر جبران کرده است. تخمین زده میشود که تعداد نورون ها حدود ۱۰ میلیارد و تعداد اتصالات بین آن ها حدود ۶۰ تریلیارد است. از طرفی دیگر مصرف انرژی مغز انسان در مقایسه با چیپ های سیلیکونی حدود ۱۰ مرتبه توانی کمتر است. در شکل ۲ ساختار نورون و سیناپس را مشاهده میکنید.

### ۲-۳- مدل نورون برای شبکه عصبی

نورون یک واحد پردازش اطلاعات است که واحد سازنده شبکه عصبی است در شکل ۳ مدل ارائه شده برای نورون را مشاهده

<sup>۷</sup>Ramon y Cajal

شبکه عصبی غیرخطی میشود این ویژگی بسیار مهم است زیرا بسیاری از مسائل ذاتا غیرخطی هستند مانند پردازش گفتار.

● **نگاشت ورودی-خروجی:**<sup>۳</sup> در بسیاری از مسائل ما ارتباط منطقی بین ورودی و خروجی را نمیدانیم ولی برای چند نمونه خاص ورودی خروجی مورد انتظار را در دست داریم ما میتوانیم به کمک این ها شبکه عصبی را آموزش دهیم در اینصورت شبکه عصبی وزن های سیناپسی خود را به گونه ای تغییر میدهد که جواب تاحدممکن به خروجی مورد نظر نزدیک شود در اینصورت به گونه ای توانستیم بدون هیچ دانسته قبلی بین ورودی و خروجی های درست نگاشت برقرار کنیم حال میتوانیم از شبکه عصبی برای بدست آوردن خروجی مورد نظر برای ورودی های دیگر استفاده کنیم این تکنیک در مسائل الگویی بسیار استفاده میشود.

● **تطبیق پذیری:**<sup>۴</sup> ساختار شبکه عصبی به نحوی است که میتواند خود را در محیط وفق دهد به اینگونه که اگر محیط تغییر کند شبکه عصبی وزن های سیناپسی خود را به گونه این تغییر میدهد که با محیط تغییر یافته تطبیق پیدا کند البته باید توجه داشت که شبکه عصبی نباید بیش از حد هم نسبت به تغییرات حساس باشد زیرا که تغییرات خیلی کوچک که حتی میتواند ناشی از خطای حسگر ها باشد بروی آن تاثیر میگذارد این تطبیق پذیری باید به گونه ای باشد که نه خیلی بی حساس باشد که پایداری سیستم به هم بریزد نه خیلی بی تفاوت که روند یادگیری و بهبود را مختل کند.

● **تحمل خطا:**<sup>۵</sup> ساختار شبکه های عصبی به علت گستردگی به گونه ایست تحمل خطا و خرابی بالایی دارد. برای مثال با از کار افتادن یک نورون تغییر محسوسی در نتیجه حاصل نمیشود و آسیب باید خیلی زیاد باشد تا کار شبکه را مختل کند.

● **آزمایشات زیستی:**<sup>۶</sup> از آن جایی که شبکه عصبی تا حد خوبی میتواند شبکه های عصبی واقعی را تداعی کند از آن میتواند در آزمایشات و پژوهش های زیستی استفاده کرد.

## ۲-۲- بررسی مغز انسان

از آن جایی که شبکه عصبی برگرفته از مغز انسان است ابتدا به بررسی آن میپردازیم. شبکه عصبی مغز انسان یک سیستم سه بخشی است همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>۳</sup> Input-Output Mapping

<sup>۴</sup> Adaptivity

<sup>۵</sup> Fault Tolerance

<sup>۶</sup> Neurobiological Analogy

تصمیم در مدل قبلی را به کمک تابعی خطی بهبود بخشیده است:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } v > \frac{1}{4} \\ v + \frac{1}{4} & \text{if } -\frac{1}{4} \leq v \leq \frac{1}{4} \\ 0 & \text{if } v < -\frac{1}{4} \end{cases}$$

- **تابع Sigmoid:** این تابع یکی از پرکاربردترین توابع فعال سازی است در واقع چیزی بین دو حالت قبلی است. توجه کنید اگر ثابت  $a$  را به سمت بینهایت میل بدهیم تبدیل به تابع Threshold می شود.

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)}$$

- **مدل احتمالاتی:** در بعضی از مسائل نیاز است که تابع فعال سازی ما تصمیم قطعی نگیرد و به صورت احتمالاتی عمل کند مانند مثال زیر:

$$P(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)}$$

$$\varphi(v) = \begin{cases} +1 & \text{with probability } P(v) \\ -1 & \text{with probability } 1 - P(v) \end{cases}$$

## ۲-۵- نمایش شبکه عصبی با گراف جهتدار

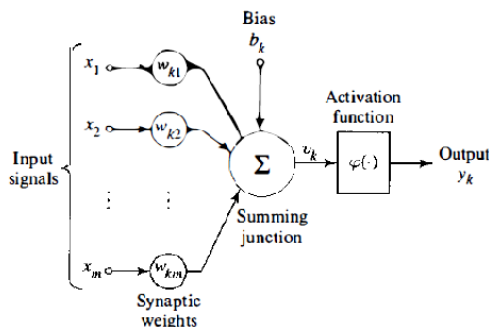
شبکه عصبی را میتوان به وسیله یک گراف جهتدار نشان داد. این گراف از سه قاعده زیر طبیعت میکند:

- **قاعده ۱:** سیگنال در جهت یال منتقل میشود ۲ نوع یال در گراف موجود است:

— **یال سیناپسی:** در این یال مقدار ورودی یال (سیگنال گرهی ابتدای یال) در وزن نوشته شده روی یال که در واقع همان وزن سیناپسی است ضرب میشود تا حاصل تولید شود.

— **یال فعال سازی:** در این یال مقدار ورودی یال (سیگنال گرهی ابتدای یال) به عنوان ورودی تابع نوشته شده روی یال در نظر گرفته میشود تا حاصل تولید شود.

- **قاعده ۲:** سیگنال یک گره جمع جبری سیگنال یال هایی است که به آن وارد میشوند.



شکل ۳: مدل ریاضی ارائه شده برای نورون

می کنید. در اینجا به تشریح بخش های مختلف می پردازیم:

- **سیناپس ها یا اتصالات** هر کدام به همراه یک عدد که به آن وزن سیناپسی میگوییم مشخص شده اند هنگامی که سیگنال  $x_i$  را در سیناپس  $j$  از نورون  $k$  داشته باشیم و وزن سیناپسی این سیناپس  $W_{k,j}$  باشد آن وقت سیگنال ورودی در وزن سیناپسی ضرب میشود.

- **یک جمع کننده** که مقادیر ورودی (سیگنال های ضرب شده در وزن سیناپسی) و همچنین مقدار ثابت (bias) را جمع می کند.

- **تابع فعال سازی** که مقدار حاصل جمع را میگیرد و خروجی مورد نظر را تولید میکند.

همانطور که در بالا توضیح دادیم داریم:

$$u_k = \sum_{j=1}^k W_{k,j} X_j$$

$$v_k = u_k + b_k$$

$$y_k = \varphi(v_k)$$

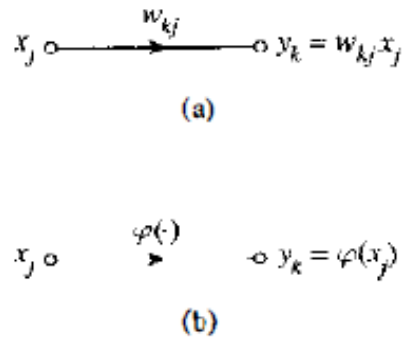
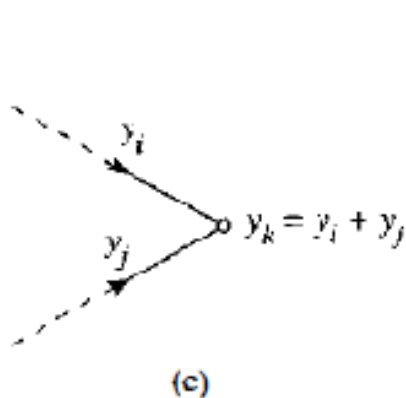
به مقدار  $v_k$  در عبارت بالا پتانسیل فعال سازی نورون میگوییم.

## ۲-۴- انواع توابع فعال سازی

- **تابع Threshold:** این تابع به نوعی بر اساس اینکه مقدار ورودی میزان مشخصی را رد کرده است یا خیر تصمیم گیری انجام می دهد و بسیار پر کاربرد است:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } v \geq 0 \\ 0 & \text{if } v < 0 \end{cases}$$

- **تابع PiecewiseLinear:** این تابع حالت بسیار تیز تغییر



شکل ۴: قاعده ۱

● **قاعده ۳:** یال هایی که از یک گره خارج میشوند از هم مستقل بوده و سیگنال اولیه برابر سیگنال گره دارند.

در شکل ۴ و ۵ میتوانیم این سه قاعده را مشاهده کنید. در نتیجه میتوانیم تعریفی دیگر [۱] برای شبکه عصبی ارائه دهیم:

شبکه عصبی یک گراف جهتدار است تشکیل شده از گره و یال های سیناپسی یا فعال سازی و دارای چهار ویژگی زیر است:

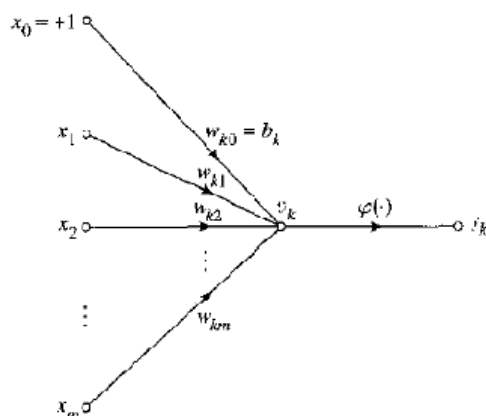
● هر نورون متشکل از تعدادی یال سیناپسی و حداکثر یک یال فعال سازی است.

● وزن یال های سیناپسی نشان دهنده وزن های سیناپسی است (مقادیر قابل تغییر در یادگیری).

● جمع سیگنال یال های سیناپسی پتانسیل فعال سازی گره را میسازد.

● تابع فعال سازی روی پتانسیل فعال سازی اعمال میشود و خروجی نورون تولید میشود.

در شکل ۶ میتوانیم مدل نورون ارائه شده را به عنوان یک گراف جهتدار مشاهده کنید.



شکل ۶: مدل گراف جهتدار برای نورون

## ۲-۶ معماری شبکه عصبی

به نحوه قرار گرفتن گره در شبکه عصبی و اتصالات بین آن ها معماری شبکه عصبی می گویند. معماری شبکه های عصبی را به چند دسته ی اصلی تقسیم می کنیم:

۱. شبکه های رو به جلو: شبکه هایی که در ساختار گراف آن ها دور وجود ندارد.

### ۳-۳- شبکه‌های تک لایه

این نوع از شبکه‌های رو به جلو همانطور که از اسمشان مشخص است، فقط یک لایه نورون دارند (البته اگر گره‌های ورودی را نورون فرض نکنیم) و از آنها با نام پرسپترون<sup>۸</sup> یاد می‌شود. این شبکه‌ها در سال ۱۹۶۰ توسط فرانک روزنبلت<sup>۹</sup> در دنباله‌ای از مقالات و یک کتاب<sup>۱۰</sup> بررسی شده و توسعه داده شدند. پس از انتشار این کتاب، شبکه‌های تک لایه محبوبیت زیادی به دست‌آوردند و نویسنده محبوبیت جهانی به دست آورد. پس از آن تحقیقات زیادی بر روی این شبکه‌ها انجام شد و محققان اکثراً انتظارات بسیار زیادی از آنها داشتند تا این که مینسکی<sup>۱۱</sup> و پیرت<sup>۱۲</sup> در کتابشان با نام پرسپترون<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۶۹ با نشان دادن محدودیت‌های این نوع شبکه‌ها، از شور و هیجان این تحقیقات به طور قابل ملاحظه‌ای کاستند تا حدی که تا سال ۱۹۸۰ تقریباً تحقیق بر روی این شبکه‌ها متوقف شد.<sup>[۶]</sup>

یک مثال قابل توجه از بزرگنمایی‌هایی که در مورد توانایی پرسپترون‌ها قبل از انتشار مقاله‌ی مینسکی و پیرت انجام گرفت، پروژه‌ای بود که در آن تعدادی عکس که در هر کدام دقیقاً یک تراکتور یا یک تانک (در محیط‌های مختلف) قرار داشت به یک شبکه‌ی عصبی داده شد و هدف این بود که این شبکه بتواند در نهایت تشخیص بدهد که وسیله‌ی موجود در عکس تانک بوده یا تراکتور. حتی در بعضی از این عکس‌ها قسمتی از وسیله توسط درختان جنگلی پوشیده شده بود و وسیله به طور کامل دیده نمی‌شد. این پروژه در ابتدا نتایج بسیار موفقیت آمیزی داشت و به خوبی می‌توانست بین دو وسیله تشخیص درست بدهد. اما در نهایت مشخص شد که دلیل نتایج درست این شبکه این بوده که عکس تراکتورها در یک روز آفتابی و عکس تانک‌ها در یک روز ابری گرفته شده بود و تنها کاری که شبکه انجام می‌داد تعیین مقدار روشنایی تصویر و تصمیم‌گیری بر اساس آن بود، کاری که برای چشم انسان (حداقل با دقت بالا) کار ساده‌ای نیست، اما برای نورون‌ها به سادگی قابل انجام است. اینگونه اتفاقات می‌توانند یک الگوریتم را به سرعت بدنام کنند.<sup>[۴]</sup>

ساده‌ترین مثالی که شبکه‌های تک لایه در شبیه‌سازی‌شان عاجز اند، گیت منطقی xor است. البته این تنها مثال نیست و فقط نماینده‌ی گروه بزرگی از توابع است که نورون‌ها قابلیت تولید خروجی همانندشان را ندارند، اما خبر خوب این است که این مشکل با اضافه کردن تعداد لایه‌ها حل می‌شود و همین گیت xor

• شبکه‌های تک لایه: شبکه‌های رو به جلویی که تنها شامل دو سطح از گره هستند سطح گره ورودی و سطح گره خروجی (نورون‌های خروجی).

• شبکه‌های چند لایه: شبکه‌هایی که حداقل دارای یک سطح بیشتر از شبکه‌های تک لایه هستند. (به لایه‌های میانی لایه‌های پنهان نورون نیز می‌گویند)

۲. شبکه‌های درجریان: شبکه‌هایی که در ساختار گراف ان‌ها دور وجود دارد.

### ۳- الگوهای اتصالات

!! در واقع همانطور که در قسمت بعدی نشان داده می‌شود، می‌توان با استفاده از نورون‌های بسیار ساده، تمام گیت‌های پایه‌ای یک رایانه را پیاده‌سازی کرد، پس قدرت محاسبه‌ای شبکه‌های عصبی مصنوعی حداقل به اندازه‌ی قدرت رایانه‌ها است با این تفاوت که قدرت اصلی این شبکه‌ها در قابلیت یادگیری آن‌ها بدون برنامه‌ریزی است.

#### ۳-۱- تقلید از نورون‌ها

سلام

#### ۳-۱-۱- تقلید از نورون‌ها

سلام

#### ۳-۲- شبکه‌های تغذیه‌ی رو به جلو

ساده‌ترین نوع شبکه‌های عصبی، شبکه‌هایی اند که در ساختارشان دور وجود نداشته باشد. یعنی خروجی یک گره هرگز (بعد از یک یا چند مرحله) به خود آن گره برنگردد. در نتیجه اطلاعات همیشه از یک قسمت وارد شده و بعد از گذشتن از درون یک یا چند نورون مختلف به انتهای مسیر (گره‌های خروجی) می‌رسند. معمولاً این شبکه‌ها را در حالت کلی به صورت شکل ۷ نشان می‌دهند.

اهمیت این معماری ساده در این است که با وجود سادگی، توانایی بالایی دارند و مهم‌تر از آن، برای آن‌ها الگوریتم‌های یادگیری کارآمد وجود دارد. در مقابل، معماری‌های پیچیده‌تری که جلوتر خواهیم دید، با وجود پتانسیل بالا نمی‌توانند از قدرت خود به حد کافی استفاده کنند (به جز در مواردی که برای یک دسته سوال اختصاصی شده‌اند).

<sup>۸</sup>perceptron

<sup>۹</sup>Frank Rosenblatt

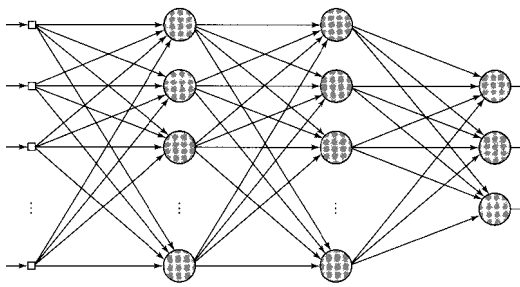
<sup>۱۰</sup>Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain

Mechanisms, Spartan Books, 1962

<sup>۱۱</sup>Marvin Minsky

<sup>۱۲</sup>Seymour Paper

<sup>۱۳</sup>Perceptrons: an introduction to computational geometry, 1969



شکل ۷: معماری شبکه‌های چند لایه (این مثال: سه لایه)

به خودش داده شود (با ضریب ۱) و دو سیگنال ورودی set با ضریب ۱ و reset با ضریب منفی ۲ - (البته بسته به استفاده می‌تواند ۱- هم باشد) و عدد ثابت (bias) هم برابر ۱- باشد. حال تا وقتی که سیگنالی نیاید، همیشه مقدار خروجی نورون ثابت می‌ماند و با آمدن سیگنال هم مقدار آن تعیین می‌شود.

### ۳-۴- شبکه‌های چند لایه

این شبکه‌ها که حالت کلی شبکه‌های رو به جلو اند، امروزه مدل استاندارد مورد استفاده برای بیشتر مسائل تشخیص الگو با کمک یادگیری با ناظر اند. با ظهور و استفاده از این شبکه‌ها در الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی، جان تازه‌ای در تحقیقات در این زمینه دمیده شد. این شبکه‌ها محدودیت‌های شبکه‌های تک لایه در تولید فقط بعضی از انواع توابع خروجی را ندارند.

یکی از مشکلاتی که شبکه‌های تک لایه با آن روبرو بودند این بود که برای این که بهتر کار کنند، نیاز بود که ابتدا از ورودی‌ها چند خاصیت کلی استخراج شوند و سپس با استفاده از این خاصیت‌ها پرسپترون‌ها کار تصمیم‌گیری را انجام بدهند. اما با استفاده از شبکه‌های چند لایه می‌توانیم ابتدا حتی بدون دانستن خروجی‌ها (بدون ناظر) مقدار زیادی خواص را فقط با داشتن ورودی‌های مختلف از آن‌ها استخراج کنیم و سپس با یا بدون داشتن خروجی‌ها شروع به تصمیم‌گیری کنیم. به همین دلیل این الگوریتم‌ها برای داده‌کاوی<sup>۱۵</sup> در مجموعه‌ی عظیمی از داده‌ها حتی وقتی که نمی‌دانیم دنبال چه چیزی می‌گردیم و برای مثال فقط می‌خواهیم دنبال بی‌قاعدگی‌ها بگردیم بسیار مناسب هستند. برای اطلاعات بیشتر و کاربردهای عملی این شبکه‌ها می‌توانید به ابزار متن‌باز وکا<sup>۱۶</sup> مراجعه کنید.

در معماری این شبکه‌ها تعدادی لایه نرون وجود دارد که نه گره ورودی‌اند و نه گره خروجی. به این لایه‌ها در اصطلاح، لایه‌های پنهان<sup>۱۷</sup> می‌گویند. اهمیت این لایه‌ها در این است که این لایه‌ها

با دو لایه نورون به سادگی قابل پیاده‌سازی است.

یک نکته‌ی مهم در تحلیل و بررسی رفتار شبکه‌های تک لایه این است که اگر دقت کنید، هر کدام از نورون‌ها کاملاً به طور مستقل از دیگر نورون‌ها رفتار می‌کند چون مقادیر ورودی را که نمی‌توانیم تغییری بدهیم و بین نورون‌های سطح اول هم هیچ ارتباطی وجود ندارد. پس برای مثال هر شبکه‌ی تک لایه با  $k$  نورون را می‌توان  $k$  تا شبکه با فقط یک نورون در نظر گرفت که البته ورودی تمام‌شان را یکی می‌دهیم. این موضوع باعث می‌شود که تحلیل این شبکه‌ها بسیار ساده باشد و الگوریتم یادگیری کارایی برای آن‌ها طراحی شود. البته این موضوع باعث می‌شود که به سادگی ببینیم که این نوع شبکه‌ها توانایی بالایی در حل مسائل مختلف ندارند و با بزرگ‌تر کردن‌شان بر قدرت‌شان افزوده نمی‌شود.

### ۳-۳-۱- توانایی‌های یک تک نورون

برای نشان دادن حداقل توانایی‌های یک نورون ساده، با استفاده از آن‌ها گیت‌های منطقی پایه‌ای رایانه و دو مثال پیشرفته‌تر را طراحی می‌کنیم. برای این کار فرض کنید که تابع فعال‌سازی تمام نورون‌های این بخش از نوع تابع Threshold (که در بخش ۲-۴- تعریف شده) می‌باشد:

● **گیت not:** برای ساختن این گیت باید یک ورودی داشته باشیم که ضریب آن را برابر ۱- قرار می‌دهیم و مقدار عدد ثابت (bias) را برابر ۰ قرار می‌دهیم و یک گیت not ساخته می‌شود.

● **گیت and:** برای ساختن این گیت باید دو ورودی داشته باشیم که ضریب هر کدام را برابر ۱ قرار می‌دهیم و مقدار عدد ثابت را برابر ۲ قرار می‌دهیم. حال مقدار خروجی فقط در صورتی یک است که هر دو ورودی یک باشند.

● **گیت or:** همانند and دو ورودی داریم با ضریب ۱ و فقط مقدار عدد ثابت را برابر ۱ قرار می‌دهیم. حال اگر هر کدام را یک کنیم، جواب یک می‌شود.

● **تابع اکثریت** یعنی این که  $n$  ورودی داشته باشیم و بگوییم که اکثریت آن‌ها صفر بوده‌اند یا یک: برای این تابع هم  $n$  ورودی داریم که ضریب هر کدام یک است و مقدار عدد ثابت برابر  $\frac{n}{2}$  - است.

● **فلپ‌فلاپ<sup>۱۸</sup>:** ساخت این قطعه به داشتن دور در گراف ساختار نورون‌ها دارد و در نتیجه فقط در شبکه‌های در جریان (بخش ۳-۵) قابل پیاده‌سازی است. اما برای ساخت آن فقط کافی است که خروجی نورون به عنوان ورودی دوباره

<sup>۱۵</sup>DataMining

<sup>۱۶</sup><http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

<sup>۱۷</sup>hidden layers

<sup>۱۸</sup>flip-flop

تنها چیزی اند که شبکه‌های چند لایه را از شبکه‌های تک لایه جدا می‌کنند، پس قدرت این شبکه‌ها بر دوش این لایه‌ها است. اما وجود این لایه‌ها مشکلاتی را برای الگوریتم‌های یادگیری ایجاد می‌کند.

در ادامه بعضی از این مشکلات را بررسی کرده و راه‌حل‌های آن‌ها را ارائه می‌دهیم.

### ۳-۴-۱- بیش‌برازش

بیش‌برازش<sup>۱۸</sup> به پدیده‌ی نامطلوبی در مدل‌های آماری گفته می‌شود که در آن درجه‌ی آزادی مدل بسیار بیشتر از درجه‌ی آزادی واقعی انتخاب شده و در نتیجه اگرچه مدل روی داده‌های استفاده شده برای یادگیری بسیار خوب نتیجه می‌دهد، اما بر روی داده‌های جدید دارای خطای زیاد است. [۷] برای مثال وقتی که مقدار یک چند جمله‌ای درجه‌ی دو را با یک چند جمله‌ای درجه‌ی سه تخمین بزنیم.

همانند تمام مدل‌های آماری، شبکه‌های چند لایه نیز وقتی که تعداد پارامترهای مسئله (همان تعداد لایه‌ها و اندازه‌ی کلی شبکه) بیش از حد باشد، به مشکل بیش‌برازش بر می‌خوریم. در این حالت حتی شبکه‌ی ما می‌تواند به صورتی تمام ورودی‌های داده‌شده را در خود ذخیره کند و بر روی آن‌ها درست جواب بدهد اما لزوماً این نتایج را بر روی ورودی‌های جدید تعمیم ندهد.

به وضوح اگر اندازه‌ی شبکه بسیار کوچک باشد نیز مشکلات دیگری<sup>۱۹</sup> پیش می‌آید و نتایج دقت کافی را ندارند.

اگر قرار باشد در شبکه موجود تمام گره‌ها به یکدیگر وصل باشند، تنها موضوع باقی‌مانده، اندازه‌ی شبکه است. یکی از روش‌های ساده برای حل این مشکل این است که ابتدا چند ساختار را بررسی کنیم و کوچک‌ترین ساختاری را انتخاب کنیم که نتایج قابل قبولی دارد. روش‌های دیگر استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل<sup>۲۰</sup> است. یک روش برای شبکه‌های تماماً متصل نیستند، الگوریتم صدمه‌ی مغزی بهینه<sup>۲۱</sup> است که ابتدا از یک گراف کامل شروع می‌کند و سپس بعضی از ارتباطات آن‌را حذف می‌کند. [۲، ص-۷۳۷]

### ۳-۴-۲- انتشار رو به عقب

یکی از ابتدایی‌ترین مشکلات شبکه‌های چند لایه این است که نیاز به الگوریتم کارایی برای انجام یادگیری در لایه‌های نهفته داریم. به این دلیل که این لایه‌ها به طور مستقیم به خروجی‌ها وصل نیستند و نمی‌توانیم به طور مستقیم خروجی‌شان را بررسی کرده و بر اساس

آن تغییرات لازم را انجام بدهیم. یکی از اولین و پرکاربردترین روش‌های ارائه شده، الگوریتم انتشار رو به عقب<sup>۲۲</sup> است. در این روش مقدار خطای لایه‌های عقب‌تر بر اساس خطای لایه‌های جلوتر به دست می‌آید و به اصطلاح خطا رو به عقب انتشار پیدا می‌کند. یک پیش‌نیاز برای انجام این روش این است که توابع فعال‌سازی نوروها توابعی پیوسته باشند. برای مثال می‌توان از تابع فعال‌سازی Sigmoid (بخش ۲-۴-) استفاده کرد.

برای بهتر فهمیدن روش این الگوریتم، در نظر بگیرید که خروجی نوروهای لایه‌های جلوتر یک تابع بر حسب خروجی نوروهای لایه‌های مرحله‌ی قبل است. حال با در دست داشتن مقدار خطای تابع می‌توانیم مقدار تاثیر پارامترهای ورودی تابع را در خطا محاسبه کنیم. با انجام این کار و انتشار مقدار خطای به دست آمده به مراحل قبل، مقدار خطای آن‌ها نیز به دست می‌آید. [۴]

یک نکته‌ی مهم در مورد درستی این روش این است که شاید این روش بهترین روش ممکن نباشد، یک الگوریتم کارا هم نظر پردازشی و هم از نظر نتایج به دست آمده است.

اما هنوز این روش نمی‌تواند به عنوان یک روش یادگیری کامل بر روی تمام شبکه‌ها استفاده شود. به شبکه‌هایی که تعداد لایه‌های زیادی (در واقع تعداد لایه‌های پنهان زیاد) داشته باشند، شبکه‌های عمیق<sup>۲۳</sup> می‌گویند. در هنگام اجرای این الگوریتم بر روی این شبکه‌ها دیده می‌شود که یادگیری بعد از چند سطح دیگر کار خود را نمی‌تواند به خوبی انجام دهد. این مشکل به دلیل موضوعی به نام مسئله‌ی گرادیان محو شونده<sup>۲۴</sup> ایجاد می‌شود. یعنی سهم خطایی که برای لایه‌های قبلی محاسبه می‌کردیم، بعد از چند مرحله به سرعت از بین می‌رود و شاید حتی بعد از چهار مرحله، مقدار به دست آمده با تقریب خوبی برابر صفر باشد. به همین دلیل معمولاً ابتدا برای لایه‌های اولیه از الگوریتم‌های یادگیری بدون ناظر استفاده می‌شود و سپس برای لایه‌های انتهایی از این الگوریتم یا الگوریتم‌های مشابه استفاده می‌شود.

### ۳-۵- شبکه‌های در جریان

این نوع شبکه‌ها بسیار قدرتمندتر از شبکه‌های رو به جلو اند. در کل در طراحی شبکه‌های در جریان<sup>۲۵</sup> می‌تواند دوره‌های جهت‌دار وجود داشته باشد، یعنی یک داده می‌تواند پس از گذشتن از چند مرحله دوباره به جای اولیه خود برگردد. به همین دلیل این شبکه‌ها توانایی نگه‌داری داده‌ها در طول زمان (عنصر حافظه همانند فلیپ‌فلاپ که در بخش ۳-۳-۱- نشان داده شد) را دارند. و همان طور که در بخش مذکور نشان داده شد، می‌توانند تمام اجزای

<sup>۲۲</sup> back propagation

<sup>۲۳</sup> deep networks

<sup>۲۴</sup> Vanishing Gradient problem

<sup>۲۵</sup> recurrent

<sup>۱۸</sup> overfitting

<sup>۱۹</sup> underfitting

<sup>۲۰</sup> cross-validation

<sup>۲۱</sup> optimal brain damage



پایه‌ای یک رایانه‌ی کامل را داشته باشند. پس اگر بتوانیم آن‌ها را تعلیم دهیم قدرت بسیار بالایی می‌توانند داشته باشند. اما به دلیل این که می‌توانند اشکال بسیار مختلف و پیچیده‌ای داشته باشند، الگوریتم‌های یادگیری مناسبی برای‌شان به دست نیامده و به همین دلیل در حال حاضر نمی‌توانیم از تمامی قدرت‌شان استفاده کنیم و طراحی چنین الگوریتمی بسیار مورد نیاز و سودمند است.

این شبکه‌ها طبعی‌ترین روش برای مدل کردن داده‌های پشت سر هم (دنباله‌ی داده‌ها) هستند. معمولاً در هنگام عمل یادگیری برای این شبکه‌ها آن‌ها را به صورت شبکه‌های چند لایه‌ی رو به جلو مدل می‌کنیم که در زمان عمق پیدا کرده اند. یعنی برای هر مرحله‌ی زمان، یک بار کل شبکه را قرار می‌دهیم و یال‌های‌شان را به جای وصل کردن به همان مرحله، به مرحله‌ی بعدی وصل می‌کنیم. یکی از خوبی‌های این روش این است که با این کار می‌توانیم از الگوریتم‌های یادگیری ساخته شده برای شبکه‌های رو به جلو، در این شبکه‌ها نیز استفاده کنیم. [۴]

همچنین روش دیگری که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از حالت‌های خاص توپولوژی نورون‌ها (در مقابل گراف کامل) بود که هر کدام به دلیل محدودیت‌های‌شان، تحلیل و بررسی و در نتیجه تعلیم‌شان ساده‌تر باشد.

### ۳-۶- مثال‌هایی از شبکه‌های در جریان

برای این که ببینید این الگوریتم‌ها چه کارهایی را می‌توانند انجام بدهند، چند مثال از فعالیت‌ها در این زمینه می‌آوریم:

در سال ۱۹۱۱ ایلینا ساتسکور<sup>۲۶</sup> یک نوع خاص از شبکه‌های در جریان را برای پیش‌بینی کاراکتر بعدی در یک دنباله از کلمات تعلیم داد. و سپس با استفاده از همین شبکه، یک متن کامل را از ابتدا تولید کرد. این متن شاید در نگاه کلی معنای خاصی نداشت اما با وجود این موضوع، همین که تمام کلمات تولید شده کلمات درست انگلیسی بودند و بسیاری از عبارات و حتی جملات آن معنای کامل و درست داشتند، خود نشان دهنده‌ی دقت و قدرت این الگوریتم بود. [۴]

### ۳-۶-۱ شبکه‌های رقابتی

### ۳-۶-۲ شبکه‌های هاپفیلد

یک حالت خاص از شبکه‌های در جریان، شبکه‌های متقارن اند. در این شبکه‌ها یال‌ها به جای یک طرفه، دو طرفه اند. پس وزن در دو طرف یکسان است. جان هاپفیلد<sup>۲۷</sup> و دیگران متوجه شدند که تحلیل این نوع شبکه‌ها بسیار ساده‌تر از حالت کلی شبکه‌های در جریان است.

هاپفیلد و دیگران<sup>۲۸</sup> بر اساس همین موضوع شبکه‌هایی را طراحی کردند. شبکه‌ی هاپفیلد معمولاً به عنوان حافظه‌های تداعی‌گیر<sup>۲۹</sup> استفاده می‌شوند. ثابت می‌شود که این شبکه‌ها همیشه به یک کمینه‌ی موضعی<sup>۳۰</sup> همگرا می‌شوند. اما ضمانتی وجود ندارد که این کمینه‌ی موضعی همان جواب مسئله باشد. همچنین این شبکه‌ها به عنوان مدلی برای درک بهتر حافظه‌ی انسان نیز استفاده می‌شوند. [۸]

### ۳-۶-۳ مدل‌ای آر.تی.

سلام

### ۴- تعریف مسئله

جستجو و یافتن الگو درون داده‌ها را می‌توان یک مسئله‌ی کاملاً پایه‌ای و پر کاربرد در علم، صنعت و به طور کلی در زندگی در نظر گرفت. برای مثال در قرن ۱۶ ام کپلر با توجه به اطلاعات زیاد مشاهداتی موجود متوجه الگوی حرکتی سیارات شد و با مشاهدات طیف نشی اتم‌ها به پیدایش فیزیک کوانتوم ختم شد.

به طور کلی فیلد شناسایی الگوها به دنبال شناسایی خودکار نظم و قواعد درون داده‌ها توسط الگوریتم‌های کامپیوتری و پس از پیدا کردن این قواعد، به دنبال کارهایی همچون دسته‌بندی این داده‌ها در گروه‌های مختلف است. [۳، ص ۱]

شبکه‌های عصبی مصنوعی به خصوص در سال‌های اخیر به دلیل پیشرفت‌های حاصل در این زمینه به عنوان یک دسته از الگوریتم‌های قوی و پویای تشخیص الگو همیشه گزینه‌ی مناسبی برای حل این گونه مسائل بوده‌اند.

معیارهایی که با آن‌ها می‌توان این مسائل را تفکیک کرد متنوع اند، اما از میان آن‌ها می‌توان رایج‌ترین و مهم‌ترین آن‌ها را نام برد که عبارت‌اند از، نحوه‌ی یادگیری که معمولاً این مسائل را در دو فرم با نظارت و بدون نظارت دسته‌بندی می‌کند و خواسته‌ی مسئله که به طور عمده یکی از حالت‌های دسته‌بندی داده‌ها و یا پیش‌بینی داده‌های پیوسته است.

در ادامه هر یک از این معیارها را بررسی می‌کنیم.

### ۴-۱ خواسته‌ی مسئله

الگویی که بر روی یک دسته از داده‌ها پیدا می‌شود را می‌توان یافته‌ی اصلی الگوریتم در نظر گرفت و با توجه به انواع الگوهایی که یک الگوریتم شناسایی می‌کند، می‌توان الگوریتم‌ها و مسائل متناظر آن‌ها را دسته‌بندی کرد.

<sup>۲۸</sup> برای مثال ماشین بلتزمن (Boltzmann) را ببینید.

<sup>۲۹</sup> Content-addressable memory

<sup>۳۰</sup> local minima

<sup>۲۶</sup> Ilya Sutskever

<sup>۲۷</sup> John Hopfield



در مسئله بگردد، اما در ادامه می‌بینیم در واقعیت بسیار با این گونه مسائل روبه‌رو می‌شویم، برای مثال وقتی که برای اولین بار کسی با چند دسته از اشیاء جدید روبه‌رو می‌شود، بدون آن که کسی به او بگوید این اشیاء با هم تفاوت دارند، فرد از روی تفاوت‌هایی مانند شکل، اندازه و ... آن‌ها را در گروه‌هایی دسته‌بندی می‌کند و برای هر گروه مفهومی در ذهن خود در نظر می‌گیرد، از آن جا که این دسته از مسائل هیچ گونه راهنمایی‌ای در مرحله یادگیری دریافت نمی‌کنند، یادگیری این دسته مسائل را یادگیری بدون نظارت می‌نامند.

## ۵- یادگیری

بر اهمیت ترین ویژگی شبکه‌های عصبی، توانایی یادگیری و بهبود عملکرد آن‌ها به وسیله یادگیری است. در واقع اتصالات بین عصب‌ها و شیوه فعالیت آن‌ها، تابع  $y(x)$  که در قسمت قبل مطرح شد را می‌سازند، پس در شبکه‌های عصبی مرحله یادگیری که مرحله تولید  $y$  است، با تعیین وزن اتصالات بین عصب‌ها انجام می‌شود. تعریف دقیق یادگیری در شبکه‌های عصبی را می‌توان به صورت زیر دانست:

یادگیری فرایندی است که در آن متغیرهای آزاد یک شبکه عصبی (یعنی وزن اتصالات و ...) در جریان تحریک شدن به وسیله محیطی که شبکه در آن قرار دارد مقدار می‌گیرند. نوع یادگیری، تغییراتی که در این متغیرها رخ می‌دهد را تعیین می‌کند. [۱، ص-۵۰]

با توجه به تعریف بالا می‌توان گفت که یادگیری در شبکه‌های عصبی از دنباله‌ی وقایع زیر تشکیل شده:

۱. تحریک توسط یک محیط.
۲. تغییر متغیرهای آزاد بر اساس این تحریک.
۳. پاسخ دادن به صورتی جدید به محیط به خاطر تغییرات مرحله قبل.

همان طور که تعریف به آن اشاره کرد یادگیری انواعی دارد که روش تغییرات داخلی را تعیین می‌کنند. از آنجا که این تغییرات به صورت‌های متفاوتی می‌توانند شکل گیرند، می‌توان انواع زیادی از یادگیری را تولید کرد، چند نمونه از روش‌های یادگیری معروف را می‌توان روش‌های زیر دانست:

۱. تصحیح خطا
۲. یادگیری هب
۳. یادگیری رقابتی

این الگو در واقع یک تابع است که الگوریتم با بررسی داده‌های قدیمی پیدا می‌کند و از این تابع برای حدس زدن ویژگی‌های داده‌های جدید استفاده می‌کند. این تابع را در ادامه با  $y(x)$  نشان می‌دهیم.

به طور کلی در یک مسئله یادگیری<sup>۳۱</sup> در صورتی که خواسته‌ی مسئله درون یابی<sup>۳۲</sup> یا برون یابی<sup>۳۳</sup> یک داده‌ی پیوسته باشد به آن یک مسئله رگرسیون<sup>۳۴</sup> می‌گویند و در صورتی که هدف پیشینی یک کلاس گسسته و محدود برای داده‌های جدید باشد به آن کلاس‌بندی<sup>۳۵</sup> می‌گویند، یا به تفسیری دیگر از کتاب پترن ریکاگنیشن:

در صورتی که هدف یک فرایند، انتساب داده‌های ورودی به تعداد متناهی‌ای از کلاس‌های گسسته باشد به آن کار کلاس‌بندی می‌گوییم و اگر خروجی (یعنی خروجی تابع  $y(x)$ ) شامل یک یا چند داده‌ی پیوسته باشد در این صورت به این کار رگرسیون می‌گوییم. [۳]

در نتیجه این دسته‌بندی بر اساس خروجی تابع  $y$  است.

## ۴-۲- نحوه یادگیری

فرض کنید یک مجموعه‌ی داده  $X = x_1, x_2, \dots, x_N$  در اختیار شما قرار گرفته و از شما می‌خواهند که با استفاده از آن یک روش و یا الگو ارائه دهید که در صورت مواجه با داده‌ی جدید  $\hat{x}$  با آن الگو بتوان یک ویژگی از  $\hat{x}$  به اسم  $\hat{t}$  را با تابع  $y(\hat{x})$  پیشینی کرد. همان طور که از جمله‌ی بالا معلوم است ویژگی خواسته شده توسط مسئله مبهم است و قبل از شروع به حل مسئله نیاز به رفع ابهام دارد.

در بعضی از مسائل علاوه بر  $X$  که مجموعه‌ی تعلیم<sup>۳۶</sup> نام دارد یک بردار  $t = t_1, t_2, \dots, t_N$  به نام بردار هدف<sup>۳۷</sup> از مقدار ویژگی مورد نظربه ازای ورودی‌های متناظر سوال به ما داده می‌شود، و هدف آن است که با یافتن یک الگو در این ۲ مجموعه  $y(x)$  را شکل دهیم و این ویژگی را برای ورودی‌هایی که  $\hat{t}$  به ما داده نشده با  $y(\hat{x})$  پیشینی کنیم، به یادگیری این دسته از مسائل به علت راهنمایی‌هایی که در مرحله یادگیری به الگوریتم داده می‌شود، یادگیری با نظارت<sup>۳۸</sup> گفته می‌شود.

اما در بعضی دیگر از مسائل بردار  $t$  به الگوریتم داده نمی‌شود، با این که ممکن است در نگاه اول عجیب به نظر برسد که الگوریتم باید بدون داشتن هیچ ایده‌ای از خواسته‌ی مسئله به دنبال ویژگی‌ای

<sup>۳۱</sup> Learning Problem

<sup>۳۲</sup> Interpolation

<sup>۳۳</sup> Extrapolation

<sup>۳۴</sup> Regression

<sup>۳۵</sup> Classification

<sup>۳۶</sup> Training set

<sup>۳۷</sup> Target vector

<sup>۳۸</sup> Supervised learning

## ۵. یادگیری بتلزن

در بخش های بعدی درباره ی هر یک از این روش های یادگیری توضیحی مختصر داده می شود، برای یادگیری بیشتر در این زمینه می توانید به منابع ذکر شده در قسمت پایانی رجوع کنید.

## ۵-۱- قواعد تصحیح خطا

در ساده ترین حالت این روش یادگیری می توانید فرض کنید یک عصب  $k$  داریم که خروجی آن قابل اندازه گیری است و آن را با  $y(x)$  نشان می دهیم، برای این عصب یک مقدار مطلوب خروجی وجود دارد که آن را  $d(x)$  می نامیم و مستقیماً به ما داده می شود. در اثر مقایسه ی سیگنال خروجی با سیگنال مطلوب یک سیگنال خطا به دست می آید که برابر با مقدار زیر است:

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n)$$

سیگنال خطای  $e$  یک مکانیزم کنترلی را فعال می کند که هدف آن اعمال یک سری تغییرات بر روی وزن اتصالات عصب ها به منظور بهبود دادن خروجی است. این تغییرات طراحی شده اند تا مرحله به مرحله فاصله ی  $y(x)$  را از  $d(x)$  کم کنند. در هر مرحله با انتخاب تغییراتی که مقدار تابع هزینه ی زیر را کمینه کند این کار را انجام می دهیم:

$$\xi(n) = \frac{1}{\gamma} e_k^2(n)$$

که در اینجا  $e_k(n)$  نشان دهنده ی مقدار خطا در مرحله ی  $n$  ام است. می توان این تابع هزینه را تابع انرژی لحظه ای خطا نامید. این تغییرات مرحله به مرحله تا جایی ادامه می یابد که عصب  $k$  به یک وضعیت تعادل برسد، در این حالت فرایند متوقف می شود. می توان نشان داد که کمینه کردن این تابع هزینه معادل است با انتخاب یک بردار تغییرات  $\Delta\omega$  به صورت زیر که مقدار ورودی ها و مقدار خطا متناسب است.

$$\Delta\omega_{k,j} = \eta e_k(n) x_j(n)$$

$$\omega_{k,j}(n+1) = \omega_{k,j}(n) + \Delta\omega_{k,j}(n)$$

که  $\omega_{k,j}(n)$  وزن اتصال بین عصب  $k$  و  $j$  در مرحله ی  $n$  است و  $\eta$  ضریب یادگیری شبکه است که مقدار آن سرعت فرایند یادگیری را تعیین می کند. برای اندازه گیری خطا لازم است که علاوه بر مقدار مطلوب به خود خروجی نیز دسترسی داشت پس  $k$  باید یک عصب خروجی باشد که همیشه ممکن نیست، به علاوه این روش به صورت موضعی عمل می کند، یعنی خطا تنها از روی عصب های مجاور به دست می آید و حالت های پیچیده تر را در نظر نمی گیرد.

در یادگیری بر پایه ی حافظه، بیشتر تجربیات گزشته به صورت واضح در یک حافظه ی رده بندی شده به صورت ورودی-خروجی یعنی  $\{(X_i, d_i)\}_{i=1}^N$  ذخیره می شوند، که  $x$  و  $d$  به ترتیب نشان دهنده ی ورودی و خروجی مورد نظر است. فرض کنید مقدار خروجی یکی از مقدارهای ۰ یا ۱ باشد. در این صورت با دریافت  $\hat{x}$  (ورودی جدید) الگوریتم با بررسی داده های آزمایشی در همسایگی  $\hat{x}$  و آنالیز آن ها پاسخ خود را می دهد.

در تعریف بالا دو چیز نیاز به رفع ابهام دارد، یکی مفهوم همسایگی  $\hat{x}$  و دیگری روش اعمال قوانین یادگیری بر روی داده های آزمایشی در همسایگی  $\hat{x}$  است. برای مثال یک روش یادگیری ساده مبتنی بر حافظه قانون نزدیک ترین همسایه<sup>۳۹</sup> است. در این جا همسایگی  $\hat{x}$ ، آزمایشی است که در نزدیک ترین فاصله از آن قرار دارد یعنی آزمایشی که بردار ورودی آن تا بردار  $\hat{x}$  کمترین فاصله ی اقلیدسی را داراست:

$$\min_i d(x_i, \hat{x}) = d(x_N, \hat{x})$$

مقداری که به این داده یعنی  $x_N'$  نسبت دارد به عنوان مقدار خروجی  $\hat{x}$  گزارش می شود، می توان ثابت کرد در صورت برقرار بودن چند شرط بر روی داده ها، احتمال خطای این مقدار خروجی، حداکثر ۲ برابر احتمال خطای بیز است، یعنی حداکثر دو برابر احتمال خطای بهینه.

یا یک حالت دیگر از یادگیری های مبتنی بر حافظه که در واقع تعمیم روش قبل است، کلاس بندی  $k$  نزدیک ترین همسایه است. در این روش همسایگی  $\hat{x}$ ،  $k$  آزمایشی است که در نزدیک ترین فاصله از بردار ورودی قرار دارند، و الگوریتم با یافتن کلاسی که در این  $k$  آزمایش بیشتر از همه تکرار شده، جواب مسئله را می دهد. الگوریتم های دیگری نیز وجود دارند که بر پایه ی حافظه هستند اما ما به همین دو مورد بسنده می کنیم.

## ۵-۳- بتلزن (Boltzmann)

قانون یادگیری بتلزن که به نام مبدع آن نام گذاری شده، الگوریتمی احتمالاتی است و به شبکه های عصبی ای که بر پایه ی این الگوریتم کار می کنند ماشین های بتلزن می گویند.

در یک ماشین بتلزن هر عصب می تواند در ۲ حالت مختلف مثلاً ۱ یا ۰ قرار گیرد و برای کل سیستم می توان یک تابع انرژی  $E$  در نظر گرفت که مقدار آن با وضعیتی که عصب ها می گیرند

<sup>۳۹</sup>Nearest neighbor rule

تعیین می‌شود:

$$E = -\frac{1}{4} \sum_j \sum_{\substack{k \\ j \neq k}} \omega_{kj} x_k x_j$$

ماشین در هر مرحله با انتخاب یک عصب تصادفی و عوض کردن وضعیت آن عصب با احتمالی که تابع زیر توصیف می‌کند در دمای  $T$  تلاش می‌کند تا مقدار انرژی را به دمای تعادل برساند (البته که این دما کمیتی فیزیکی نیست و می‌توان آن را شبه دما نامید).

$$P(x_k \rightarrow -x_k) = \frac{1}{1 + \exp(-\Delta E_k/T)}$$

اینجا  $\Delta E_k$  مقدار تغییرات انرژی بر اثر تغییر وضعیت عصب  $k$  را نشان می‌دهد.

عصب‌های ماشین بلتزن را می‌توان به دو دسته‌ی پنهان و آشکار تقسیم کرد، این ماشین در دو حالت مختلف عمل می‌کند:

۱. حالتی که وضعیت عصب‌های آشکار از سوی محیط تحمیل می‌شود.

۲. حالتی که عصب‌های آشکار آزادانه تغییر می‌کنند.

که در هر دو این حالات وضعیت عصب‌های پنهان به صورت آزاد می‌تواند تغییر کند. فرض کنید  $\rho_{i,j}^+$  مقدار هم بستگی وضعیت‌های دو عصب  $i$  و  $j$  و میانگین گرفته شده در تمام وضعیت‌های تعادل حالت اول است. و  $\rho_{i,j}^-$  همین هم بستگی در حالت دوم است. تغییر وزن اتصال بین این دو عصب را با فرمول زیر تعیین می‌کنیم:

$$\Delta \omega_{k,j} = \eta(\rho_{k,j}^+ - \rho_{k,j}^-), \quad j \neq k$$

که متغیرهای بالا قبل تر تعریف شده اند.

## ۴-۵- هبین (Hebians)

فرضیه‌ی هب یکی از قدیمی ترین و مشهور ترین قانون‌های یادگیری را ارائه می‌کند:

وقتی که یک عصب  $A$  به اندازه کافی به عصب  $B$  نزدیک باشد که آن را تحریک کند و به طور مداوم در فعال کردن عصب  $B$  شرکت کند، فرایندی در یکی یا هر دو این عصب‌ها شکل می‌گیرد که تاثیر عصب  $A$  را بر روی عصب  $B$  افزایش می‌دهد. [۱، ص-۵۱]

با عوض کردن جمله بندی این گزاره، دو قانون زیر را به دست می‌آوریم:

۱. اگر دو عصب در دو سمت یک سیناپس (یک اتصال) به طور هم‌زمان عمل کنند، در آن صورت قدرت آن سیناپس به دلخواهی افزایش می‌یابد.

۲. اگر دو عصب در دو سمت یک سیناپس (یک اتصال) به طور غیر هم‌زمان عمل کنند، در آن صورت قدرت آن سیناپس به دلخواهی کاهش می‌یابد. [۱، ص-۵۵]

به چنین سیناپسی سیناپس هبین می‌گویند، در واقع چنین اتصالی از یک فرایند فعال وابسته به زمان و به شدت موضعی برای بهبود کارایی عصب‌ها و بهینه سازی آنها استفاده می‌کند. از تعریف اولیه، قانون دوم نوشته شده به دست نمی‌آید در واقع مدل‌های متفاوتی با توجه به قوانین هبین می‌توان ساخت که می‌توانند به صورت متفاوتی عمل کنند، برای مثال ممکن است تغییرات وزن اتصالات متناسب با حاصل ضرب وضعیت دو عصب تغییر کند که در این صورت سیناپس خاصیت کواریانسی پیدا می‌کند و یا این که تنها با هم‌زمانی‌ها تقویت شود و تضعیفی در کار نباشد که مشابه تعریف اولیه است. به شباهت قوانین هبین با پدیده‌ی شرطی سازی در روانشناسی نیز می‌توان توجه کرد.

## ۵-۵- آموزش رقابتی

مشابه اسم این یادگیری، عصب‌های شبکه‌های عصبی در این روش با یکدیگر سر فعال شدن رقابت می‌کنند، برعکس روش‌های قبلی که در آن به طور هم‌زمان چند عصب از شبکه می‌توانستند فعالیت کنند، در این روش تنها عصب برنده فعال می‌شود، که این خاصیت این شبکه‌ها را برای کشف ویژگی‌های مهم آماری برای دسته بندی داده‌ها مناسب می‌سازد. قواعد این روش را در سه عنصر می‌توان خلاصه کرد:

۱. یک مجموعه از عصب‌ها که کاملاً مشابه اند، به جز در وزن اتصالات که به صورت تصادفی توزیع شده اند.

۲. یک محدودیت بر روی قدرت عصب‌ها.

۳. یک مکانیزم رقابت که عصب‌ها به وسیله‌ی آن بتوانند رقابت کنند و برنده تعیین شود.

در ساده ترین حالت این شبکه می‌توان یک سطح از عصب‌های خروجی در نظر گرفت که همه‌ی عصب‌های ورودی به همه‌ی آنها اتصالاتی با وزن مثبت دارند (اتصالات بین عصب‌های خروجی نیز مشکلی ایجاد نمی‌کند).

برای این که عصب  $k$  بین عصب‌ها برنده شود باید میدان القایی<sup>۴\*</sup> آن به ازای ورودی  $\hat{x}$  در بین همه‌ی عصب‌ها بیشینه باشد، در نتیجه ورودی‌های عصب برنده به نحوی تغییر می‌کنند که عصب  $k$  با ورودی  $\hat{x}$  آموزش یابد و این عصب با این ورودی

<sup>۴\*</sup> Local induced field

راحت تر تحریک شود، برای این کار بردار وزن اتصالات عصب  $k$  به سمت ورودی  $\hat{x}$  شیفته داده می‌شود، یا به عبارتی:

$$\Delta\omega_{k,j} = \begin{cases} \eta(x_j - \omega_{k,j}) & \text{اگر عصب } k \text{ مسابقه را ببرد} \\ 0 & \text{اگر عصب } k \text{ مسابقه را ببازد} \end{cases}$$

که ضریب  $\eta$  همان ضریب یادگیری است. تعبیر شهودی فرایند ذکر شده این است که در صورت خوشه ای بودن داده ها در چند همسایگی، برای دسته بندی این داده ها به وسیله شبکه‌ی عصبی بالا در گروه‌های جدا از هم، می‌خواهیم که به هر گروه یک عصب نسبت دهیم که در صورتی که ورودی درون یکی از آن گروه‌ها فعال شود، عصب متناظر با آن گروه شروع به فعالیت کند. برای این کار بردار ورودی عصب ها را رندم در فضای حالات پراکنده می‌کنیم و در صورتی که بردار ورودی یک عصب به ورودی یک آزمایش نزدیک تر باشد (و در نتیجه بیشتر از بقیه‌ی عصب ها تحریک شود)، آن عصب را متناظر با گروه آن ورودی در نظر می‌گیریم و بردار آن را به بردار این ورودی نزدیک می‌کنیم. بعد از چندین مرحله اجرای این آزمایش به حالتی می‌رسیم که بردار هر عصب در میان گروه متناظر آن قرار دارد و در مراحل بعدی این عصب اعضای آن گروه را شناسایی می‌کند، از آن جا که بردار های ورودی در ابتدا تصادفی پراکنده شده بودند، به صورت احتمالی هر گروه یک عصب درون خود دارد، و از آنجا که هر آزمایش یک برنده دارد، در صورتی که یک گروه عصب متناظر خود را پیدا کند، از آن پس عصب برنده‌ی خود را خواهد داشت و بردار عصب های دیگر را به سمت خود نمی‌کشاند.

شکل زیر این فرایند را نشان می‌دهد:

[شکل از کتاب هیکن]

## ۶- کاربردهای مهم

در چند دهه‌ی اخیر بسیاری از فعالیت هایی که پیش از این تنها به وسیله‌ی انسان قابل انجام بوده، به وسیله‌ی کامپیوتر دست یافتنی شده است. علت این پیشرفت را می‌توان پیدایش پردازنده های قوی تر و همچنین الگوریتم های جدید ماشین لرنینگ دانست. به عنوان یکی از این الگوریتم ها شبکه‌های عصبی نیز نقش موثری در این فرایند داشته‌اند. مواردی که در ادامه مطرح می‌شود به طور کلی کاربرد هایی هستند که به وسیله‌ی شبکه های عصبی و یا سایر ماشین های یادگیری آماری ممکن شده اند.

### ۱-۶ تشخیص الگو، صدا و تصویر

امروزه پیشرفت ها در این زمینه تا حدی بوده که حتی بعضی از تلفن های همراه هم دارای امکاناتی همچون دستیار های صوتی

و یا تشخیص چهره هستند، گرچه در ابتدا موفقیت های ماشین های آماری در این زمینه بسیار بیشتر از شبکه‌های عصبی بود ولی با پیدایش شبکه های عمیق و پیشرفت شبکه‌های عصبی، این شبکه‌ها از ماشین های آماری پیشی گرفتند.

### ۲-۶ خوشه‌سازی و دسته‌بندی

وقتی حجم داده‌ها زیاد و یا تعداد ابعاد ورودی بیش از ۳ یا ۴ بعد می‌شود ادراک انسان دچار مشکل شده و توانایی خود را در تجسم داده از دست می‌دهد، این مشکل برای کامپیوتر نیز به دلیل افزایش محاسبات به صورت نمایی با افزایش ابعاد ورودی وجود دارد اما شدت آن کم‌تر است.

### ۱-۲-۶ استخراج اطلاعات

انسان ها در برابر حجم زیاد داده ها از ماشین ها عقب ماندند، علاوه بر برتری هایی که در بالا ذکر شد، گاهی ماشین ها نظمی در داده های پیدا می‌کنند که انسان به طور شهودی قابلیت درک آن را ندارد.

### ۲-۲-۶ تحلیل اطلاعات

به طور مشابه کامپیوتر ها در این زمینه هم ثابت کردند که در بعضی از موارد از انسان ها سریع ترند، بسیاری از شرکت های اقتصادی بر پایه‌ی این برنامه ها سرمایه‌گذاری های خود را انجام می‌دهند.

### ۳-۶ تقریب تابع ها

محاسبه ی بعضی از توابع به راحتی امکان پذیر نیست. تقریب تابع های پیچیده را به عنوان یکی دیگر از کاربرد های الگوریتم های ماشین لرنینگ می‌توان نام برد.

### ۴-۶ پیش‌بینی و حدس

پیش‌بینی وضع هوا، بازار، حدس زدن نتیجه‌ی یک رخداد و ... از کاربرد های دیگر شبکه های عصبی است، اکثر این موارد حتی به وسیله‌ی مغز انسان هم قابل پیش‌بینی نیستند.

### ۵-۶ بهینه‌سازی مسائل پیچیده

مسائل NP دسته ای کاربردی از مسائل هستند که تا کنون الگوریتم ای قطعی برای حل آن ها در زمان مناسب ارائه نشده است. اما شبکه های عصبی و سایر ماشین های یادگیری می‌توانند آن ها را در زمان خیلی خوبی با اطمینان بالایی حل کنند. و شاید حتی این دسته از مسئله ها را بتوان علت این دانست که چرا الگوریتم های قطعی توانایی رقابت با مغز انسان را ندارند.

## مراجع

- [1] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2<sup>nd</sup> ed., New Jersey, Prentice-Hall, 1999.
- [2] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3<sup>rd</sup> ed., New Jersey, Prentice-Hall, 2010
- [3] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, 1<sup>st</sup> ed., New York, Springer, 2006.
- [4] G. Hinton, *Neural Networks and Machine Learning [lecture notes]*, Retrieved from coursera.org, 2012
- [5] A. Ng, *Machine Learning [lecture notes]*. Retrieved from coursera.org, 2014
- [6] Wikipedia contributors, "Frank Rosenblatt" *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, [online], Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Frank\\_Rosenblatt](https://en.wikipedia.org/wiki/Frank_Rosenblatt)
- [7] Wikipedia contributors, "Overfitting" *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, [online], Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Overfitting>
- [8] Wikipedia contributors, "Hopfield network" *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, [online], Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hopfield\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Hopfield_network)