نویسنده: اورولیان ژرون

یادگیری ژرف (عمیق) عملی با Keras و TensorFlow

(ویراست دوم)

مترجم:
دکتر مهدی اسماعیلی

یادگیری ژرف (عمیق) عملی با Keras و TensorFlow

مترجم: دکتر مهدی اسماعیلی
طراحی جلد و صفحه‌آرایی: همتا بیداریان
ناشر: انتشارات آتی‌نگر
چاپ اول، ۱۴۰۲
شمارگان: ۲۰۰ نسخه
قیمت: ۳,۲۵۰,۰۰۰ ریال
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۵۷۱-۸۴-۴

ISBN: 978-622-7571-84-4

حق چاپ برای انتشارات آتی‌نگر محفوظ است.

نشانی دفتر فروش: خیابان جمالزاده جنوبی، روبه‌روی کوچه رشتچی، پلاک ۱۴۴، واحد ۱
تلفن: ۸-۶۶۵۶۵۳۳۶ **نمابر:** ۶۶۵۶۵۳۳۷
www.ati-negar.com ∗ info@ati-negar.com

سرشناسه: ژرون، اورولیان، Géron ،Aurélien
یادگیری ژرف (عمیق) عملی با Keras و TensorFlow/ نویسنده اورولیان ژرون؛ مترجم: دکتر مهدی اسماعیلی
وضعیت ویراست: ویراست دوم.
تهران: آتی‌نگر ۱۴۰۲.
۵۲۲ ص.: مصور، جدول، نمودار.
ISBN: 978-622-7571-84-4
فیپا.
یادداشت: عنوان اصلی کتاب: Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow : concepts, tools, and techniques to build intelligent systems, 2nd ed, 2019
یادداشت: کتاب حاضر با عناوین «یادگیری ماشین عملی با Scikit-learn، keras و TensorFlow مفاهیم، ابزارها و تکنیک‌هایی برای ساخت سیستم‌های هوشمند (یادگیری ماشین با پایتون)» و «آموزش عملی یادگیری ماشین» توسط مترجمان و ناشران متفاوت در سال ۱۴۰۰ فیپا گرفته است.
عنوان دیگر: یادگیری ماشین عملی با Scikit-learn، keras و TensorFlow مفاهیم، ابزارها و تکنیک‌هایی برای ساخت سیستم‌های هوشمند (یادگیری ماشین با پایتون).
موضوع: تنسورفلو- TensorFlow- پایتون (زبان برنامه‌نویسی کامپیوتر)- Python (Computer program language)
موضوع: فراگیری ماشینی- Machine learning- هوش مصنوعی- Artificial intelligence
شناسه‌افزوده: اسماعیلی، مهدی، ۱۳۵۰، Esmaiili, Mehdi -، مترجم
شناسه‌افزوده: بیداریان، همتا، ۱۳۶۱- ، گرافیست
ردەبندی کنگره QA۷۶/۷۳
ردەبندی دیویی ۰۰۵/۱۳۳
شماره کتابشناسی ملی ۹۲۶۷۱۶۶

فهرست مطالب

پیشگفتار ۹

فصل ۱: چشم‌انداز یادگیری ماشین ۱۱

از نورون‌های بیولوژیکی تا نورون‌های مصنوعی ۱۲
پیاده‌سازی MLPها با Keras ۲۸
تنظیم اَبرپارامترهای شبکه عصبی ۵۶
تمرین‌ها ۶۴

فصل ۲: آموزش شبکه‌های عصبی عمیق ۶۷

ناپدید شدن/ انفجار گرادیان‌ها ۶۸
پیاده‌سازی نُرمال‌سازی دسته‌ای در Keras ۷۹
استفاده مجدد از لایه‌های پیش‌آموزش دیده ۸۳
بهینه‌سازهای سریع‌تر ۸۹
اجتناب از بیش‌برازش از طریق تنظیم ۱۰۳
خلاصه و رهنمون‌های کاربردی ۱۱۱
تمرین‌ها ۱۱۳

فصل ۳: مدل‌های سفارشی و آموزشی با TensorFlow ۱۱۵

گشت سریعی در TensorFlow ۱۱۶
استفاده از TensorFlow شبیه به NumPy ۱۱۹
مدل‌ها و الگوریتم‌های آموزش سفارشی ۱۲۵
توابع و گراف‌ها در TensorFlow ۱۴۷
تمرین‌ها ۱۵۲

فصل ۴: بارگذاری و پیش‌پردازش داده‌ها با TensorFlow ۱۵۵

Data API ۱۵۶
قالب TFRecord ۱۶۷
پیش‌پردازش ویژگی‌های ورودی ۱۷۴
TF Transform ۱۸۴
پروژه TensorFlow Datasets (TFDS) ۱۸۶
تمرین‌ها ۱۸۷

فصل ۵: بینایی ماشین با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن ۱۸۹

معماری قشر بصری ۱۹۰
لایه‌های کانولوشن ۱۹۲
لایه‌های ادغام ۲۰۱
معماری‌های CNN ۲۰۶
پیاده‌سازی ResNet-34 با استفاده از Keras ۲۲۴
استفاده از مدل‌های آموزش دیده در Keras ۲۲۵
مدل‌های از پیش آموزش دیده برای یادگیری انتقالی ۲۲۷
رده‌بندی و محل‌یابی ۲۳۰
تشخیص شیء ۲۳۲
تقطیع معنایی (بخش‌بندی معنایی) ۲۳۹
تمرین‌ها ۲۴۳

فصل ۶: پردازش توالی‌ها با استفاده از RNN و CNN ۲۴۵

نورون‌ها و لایه‌های برگشتی ۲۴۶
آموزش RNNها ۲۵۱
پیش‌بینی یک سری زمانی ۲۵۲
مدیریت توالی‌های طولانی ۲۶۱
تمرین‌ها ۲۷۳

فصل ۷: پردازش زبان طبیعی با RNN و مؤلفه توجه ۲۷۵

تولید متن شکسپیر با استفاده از یک RNN ۲۷۶
تحلیل احساسات ۲۸۶
شبکه رمزگذار–رمزگشا برای ترجمه ماشینی ۲۹۴
مکانیزم‌های توجه ۳۰۰
نوآوری‌های اخیر در مدل‌های زبانی ۳۱۴
تمرین‌ها ۳۱۷

فصل ۸: یادگیری بازنمایی و یادگیری مولد با استفاده از خود رمزگذارها و GAN ۳۱۹

نمایش‌های کارآمد داده‌ها ۳۲۱
اجرای PCA با یک خودرمزگذار خطی ناکامل ۳۲۲
خودرمزگذارهای عمیق ۳۲۴
خودرمزگذارهای کانولوشن ۳۳۱
خودرمزگذارهای برگشتی ۳۳۲
خودرمزگذارهای نویززُدا ۳۳۳
خودرمزگذارهای تُنُک ۳۳۵
خودرمزگذارهای متغیر ۳۳۸
شبکه‌های مولد متخاصم ۳۴۴
تمرین‌ها ۳۶۰

فصل ۹: یادگیری تقویمی ۳۶۱

یادگیری برای بهینه‌سازی پاداش‌ها ۳۶۲
جستجوی سیاست ۳۶۴
مقدمه‌ای بر OpenAI Gym ۳۶۶
سیاست‌های شبکه عصبی ۳۷۰
ارزیابی عمل‌ها: مسئله انتساب اعتبار ۳۷۲
گرادیان‌های سیاست ۳۷۳
فرایندهای تصمیم‌گیری مارکوف ۳۷۸

یادگیری تفاضل موقتی ۳۸۳
الگوریتم یادگیری کیو ۳۸۴
پیاده‌سازی یادگیری کیو عمیق ۳۸۸
گونه‌های مختلفی از الگوریتم یادگیری کیو عمیق ۳۹۳
کتابخانه TF-Agents ۳۹۷
مروری بر برخی از الگوریتم‌های محبوب RL ۴۱۸
تمرین‌ها ۴۲۰

فصل ۱۰: آموزش و استقرار مدل‌های TensorFlow **۴۲۳**

استفاده از یک مدل TensorFlow ۴۲۴
استقرار یک مدل در موبایل یا دستگاه تعبیه شده ۴۴۳
استفاده از GPU برای افزایش سرعت محاسبات ۴۴۷
آموزش مدل‌ها با استفاده از چند دستگاه ۴۶۱
تمرین‌ها ۴۷۷

پیوست الف: حل تمرین‌ها **۴۷۹**

فصل اول: مقدمه‌ای بر شبکه‌های عصبی مصنوعی با Keras ۴۷۹
فصل دوم: آموزش شبکه‌های عصبی عمیق ۴۸۱
فصل سوم: مدل‌های سفارشی و آموزش با TensorFlow ۴۸۳
فصل چهارم: بارگذاری و پیش‌پردازش داده‌ها با TensorFlow ۴۸۵
فصل پنجم: بینایی ماشین با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن ۴۸۸
فصل ششم: پردازش توالی‌ها با استفاده از RNN و CNN ۴۹۱
فصل هفتم: پردازش زبان طبیعی با RNN و مؤلفه توجه ۴۹۳
فصل هشتم: یادگیری بازنمایی و یادگیری مولد با استفاده از خود رمزگذارها و GAN ۴۹۶
فصل نهم: یادگیری تقویتی ۴۹۸
فصل دهم: آموزش و استقرار مدل‌های TensorFlow ۵۰۰

پیوست ب: دیگر معماری‌های محبوب ANN **۵۰۳**

شبکه‌های هاپفیلد ۵۰۳

ماشین‌های بولتزمن ۵۰۵
ماشین‌های بولتزمن محدود (RBM) ۵۰۷
شبکه‌های باور عمیق ۵۰۸
نگاشت‌های خودسازمان‌ده ۵۱۰

پیوست ج: گراف‌ها TensorFlow **۵۱۳**

توابع TF و توابع عینی ۵۱۳
کاوش تعاریف تابع و گراف‌ها ۵۱۵
نگاهی دقیق‌تر به ردیابی ۵۱۷
استفاده از AutoGraph برای ضبط جریان کنترل ۵۱۸
مدیریت متغیرها و دیگر منابع توابع TF ۵۱۹

دردیست عشق که هیچش طبیب نیست　　گر دردمند عشق بنالد غریب نیست
بگریست چشم دشمن من بر حدیث من　　فضل از غریب هست و وفا در قریب نیست

پیشگفتار

هوش مصنوعی علم طراحی سیستم‌هایی است که ویژگی‌هایی مشابه با هوش انسانی در آن دیده می‌شود. یادگیری عمیق یکی از شاخه‌های جذاب هوش مصنوعی است و بدون تردید کتاب حاضر یکی از بهترین کتاب‌هایی است که در حوزه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌توان به علاقمندان این حوزه پیشنهاد کرد. هدف اصلی کتاب آشنایی با مفاهیم و ابزارهایی است که شما برای پیاده‌سازی برنامه‌هایی نیاز دارید که می‌توانند از داده‌ها بیاموزند. در این کتاب برای آموزش و اجرای کارآمد الگوریتم‌ها کتابخانه‌های Scikit-Learn و TensorFlow و API سطح بالای یادگیری عمیق یعنی Keras استفاده شده است. قطعه کُدهای زیادی در کتاب دیده می‌شود که تقریباً از تمامی آنها می‌توانید در پروژه‌های عملی خود استفاده کنید.

با مشورت و همت دوست عزیزم جناب دکتر مولاناپور و به لطف خداوند ترجمه ویرایش دوم کتاب به پایان رسید. اما قبل از چاپ این نسخه از کتاب، ویرایش سوم آن به بازار آمد. ابتدا تصمیم گرفتیم تا تغییرات را در ترجمه خود اِعمال کنیم، اما با بررسی‌های بیشتر متوجه شدیم که این کار بسیار دشوار و زمانبر است و از اینرو تصمیم گرفتیم و امیدواریم تا در فرصتی مناسب به سراغ ویرایش سوم برویم. بدین ترتیب با اصرار بنده قرار شد تا بخش دوم کتاب یعنی شبکه‌های عصبی و یادگیری عمیق در یک مجلد به چاپ برسد.

کتاب دارای ۱۹ فصل است که در دو بخش سازماندهی شده است. نه فصل اول آن به بحث یادگیری ماشین و ۱۰ فصل بعدی به موضوع شبکه‌های عصبی و یادگیری عمیق تخصیص داده شده است. کتابی که اکنون در دستان شماست، ترجمه فصل‌های ۱۰ تا ۱۹ کتاب اصلی است و فصل‌ها نیز از ۱ تا ۱۰ شماره‌گذاری شده‌اند. به‌طور کلی رئوس مطالب این ۱۰ فصل عبارتند از: مقدمه‌ای بر شبکه‌های عصبی، ساخت و آموزش شبکه‌های عصبی با استفاده از TensorFlow و Keras، بررسی مهمترین معماری‌های شبکه‌های عصبی (شبکه‌های عصبی پیش‌خور، شبکه‌های عصبی کانولوشن، شبکه‌های عصبی برگشتی، ترانسفورمرها، خودرمزگذارها و شبکه‌های مولد تخاصمی)، تکنیک‌های آموزش شبکه‌های عصبی عمیق، استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق در یادگیری تقویتی، بارگذاری و پیش‌پردازش موثر داده‌های حجیم و استقرار مدل‌های TensorFlow.

تمام تلاش خود را انجام داده‌ایم تا ترجمه و نگارش کتاب به گونه‌ای انجام شود که خوانندگان محترم آن بتوانند مفاهیم آن را به راحتی درک کنند. اما با وجود همه سعی و تلاشی که در تمام مراحل آماده‌سازی این کتاب انجام گرفته است، یقین دارم که عاری از اشتباه نیست. در اینجا لازم می‌دانم از همه اساتید و دانشجویان

به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان در حین آماده‌سازی این کتاب سپاسگزاری کنم. همچنین از مدیریت محترم انتشارات آتی‌نگر و دوست گرامی جناب دکتر رامین مولاناپور نیز به خاطر آماده‌سازی، چاپ و پخش این کتاب تشکر می‌کنم. در آخر ضمن سپاسگزاری از همه کسانی که مرا یاری داده‌اند و با پذیرش مسئولیت هرگونه کاستی احتمالی، امیدوارم که این اندک مفید افتد.

مهدی اسماعیلی
تابستان ۱۴۰۲

فصل ۱

چشم‌انداز یادگیری ماشین

پرواز از پرندگان الهام گرفته شده، نوارچسب از نوعی گیاه و طبیعت نیز منبع الهام اختراعات بی‌شماری است. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که برای ساخت یک ماشین هوشمند با نگاه به معماری مغز از آن الهام گرفته شود. با این نگاه شبکه‌های عصبی مصنوعی ایجاد شده‌اند: یک شبکه عصبی مصنوعی یک مدل یادگیری ماشین است که ساختار آن از شبکه‌های نورون‌های بیولوژیکی موجود در مغز ما الهام گرفته شده است. با این حال اگر چه هواپیماها از پرندگان الهام گرفته شده‌اند، اما لازم نیست برای پرواز مانند آن‌ها بال خود را بر هم بزنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به تدریج با پسرعموهای بیولوژیکی خود کاملاً متفاوت شده‌اند. حتی برخی از محققان استدلال می‌کنند که ما باید قیاس بیولوژیکی را به کلی کنار بگذاریم (به‌عنوان مثال با گفتن «واحدها» به‌جای «نورون‌ها»)، تا مبادا خلاقیت خود را تنها به سیستم‌های پذیرفتنی بیولوژیکی محدود کنیم.[۱]

شبکه‌های عصبی مصنوعی در هسته اصلی یادگیری عمیق قرار دارند. آن‌ها همه‌کاره، قدرتمند و مقیاس‌پذیر هستند و به همین دلیل رویکردی ایده‌آل برای وظایف بزرگ و بسیار پیچیده یادگیری ماشین محسوب می‌شوند. از این وظایف می‌توان به رده‌بندی میلیاردها تصویر (به‌عنوان مثال تصاویر Google)، خدمات تشخیص گفتار (برای مثال Apple's Siri)، توصیه بهترین ویدئوها به صدها میلیون کاربر به‌صورت روزانه (برای مثال YouTube) و یادگیری شکست دادن قهرمان‌بازی Go (یعنی DeepMind's AlphaGo) اشاره کرد.

بخش اول این فصل، شبکه‌های عصبی مصنوعی را معرفی می‌کند که با گشت‌وگذار سریع در اولین معماری‌های ANN و به پیرو آن چندلایه پرسپترون (MLP)[۲] آغاز می‌شود که امروزه به شدت مورد استفاده قرار می‌گیرند (در مورد سایر معماری‌ها در فصل‌های بعدی صحبت خواهیم کرد). در بخش دوم فصل به چگونگی

۱- بر اساس الهام‌های بیولوژیکی و بدون ترس از خلق مدل‌های غیرواقعی بیولوژیکی می‌توانید به بهترین‌های هر دو دنیا دست پیدا کنید؛ البته به شرطی که مدل‌های شما به خوبی کار کنند.

2- Multilayer Perceptrons

پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی با استفاده از Keras API خواهیم پرداخت. این یک API سطح بالای ساده است که به زیبایی طراحی شده و از آن برای ساخت، آموزش، ارزیابی و اجرای شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. گول سادگی آن را نخورید، آنقدر رسا و انعطاف‌پذیر هست که با کمک آن می‌توانید طیف گسترده‌ای از معماری‌های شبکه عصبی را ایجاد کنید. در حقیقت احتمالاً برای بیشتر موارد استفاده شما کافی خواهد بود. همان‌طور که در فصل ۳ مشاهده خواهید کرد، در صورت نیاز به انعطاف‌پذیری بیشتر، همیشه می‌توانید مؤلفه‌های سفارشی‌شده Keras را با استفاده از API سطح پایین آن بنویسید.

اما ابتدا بیایید به گذشته برگردیم تا ببینیم شبکه‌های عصبی مصنوعی چگونه به‌وجود آمده‌اند!

از نورون‌های بیولوژیکی تا نورون‌های مصنوعی

شگفت‌انگیز است اما شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدتی وجود داشته‌اند: این شبکه‌ها اولین بار در سال ۱۹۴۳ توسط Warren McCulloch متخصص مغز و اعصاب و Walter Pitts ریاضیدان معرفی شدند. آن‌ها در مقاله برجسته[1] خود یک مدل محاسباتی ساده‌ای را ارائه دادند که در آن چگونگی عملکرد نورون‌های بیولوژیکی در مغز حیوانات برای انجام محاسبات پیچیده با استفاده از منطق گزاره‌ها بیان شده است. این اولین معماری شبکه عصبی مصنوعی بود. همان‌طور که در ادامه خواهیم دید، پس از آن معماری‌های دیگری نیز ابداع شده‌اند.

موفقیت‌های اولیه شبکه‌های عصبی مصنوعی منجر به این باور گسترده شد که ما به زودی با ماشین‌های هوشمند گفتگو خواهیم کرد. وقتی در دهه ۱۹۶۰ مشخص شد که این وعده محقق نخواهد شد (حداقل برای یک مدتی طولانی)، بودجه به سمت دیگری رفت و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز وارد یک خواب زمستانی طولانی شدند. در اوایل دهه ۱۹۸۰، معماری‌های جدیدی ابداع و تکنیک‌های آموزش بهتری نیز توسعه داده شد و به همین دلیل علاقه مطالعه روی شبکه‌های عصبی نیز از سرگرفته شد. اما پیشرفت کُند بود و در ادامه و در دهه ۱۹۹۰ سایر تکنیک‌های قدرتمند یادگیری ماشین مانند ماشین‌های بردار پشتیبان ابداع شد. به نظر می‌رسید که این تکنیک‌ها دارای نتایج بهتر و مبانی نظری قوی‌تری نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند و بنابراین یک‌بار دیگر مطالعه شبکه‌های عصبی متوقف شد.

اکنون شاهد موج دیگری از علاقه به شبکه‌های عصبی مصنوعی هستیم. آیا این موج هم مانند موج‌های قبلی از بین خواهد رفت؟ در اینجا چند دلیل خوب وجود دارد که باور کنید این زمان متفاوت است و در ضمن علاقه مجدد به شبکه‌های عصبی مصنوعی تأثیر عمیق‌تری بر زندگی ما خواهد داشت:

- ✓ اکنون مقدار زیادی داده برای آموزش شبکه‌های عصبی در دسترس است و شبکه‌های عصبی مصنوعی در مواجهه با مسائل بسیار بزرگ و پیچیده اغلب بهتر از سایر تکنیک‌های یادگیری ماشین عمل می‌کنند.

1- Warren S. McCulloch and Walter Pitts, "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity," *The Bulletin of Mathematical Biology* 5, no. 4 (1943): 115–113.

- ✓ افزایش فوق‌العاده قدرت محاسبات (دهه ۱۹۹۰ تاکنون، امکان آموزش شبکه‌های عصبی بزرگ را در مدت زمان معقول فراهم می‌کند. این موضوع تا حدودی به قانون مور[1] برمی‌گردد (تعداد مؤلفه‌های موجود در مدارهای مجتمع طی ۵۰ سال گذشته تقریباً هر ۲ سال دو برابر شده است)، اما به لطف صنعت بازی‌سازی، در این سال‌ها با تولید تعداد زیادی از کارت‌های GPU قدرتمند نیز روبه‌رو بوده‌ایم. علاوه بر این، بسترهای اَبری این قدرت را در اختیار همه قرار داده‌اند.
- ✓ الگوریتم‌های آموزش بهبود یافته است. انصافاً این الگوریتم‌های جدید فقط اندکی با آنچه در دهه ۱۹۹۰ استفاده می‌شد تفاوت دارند، اما این تغییرات نسبتاً کوچک، تأثیر مثبت زیادی را به همراه داشته است.
- ✓ برخی از محدویت‌های نظری شبکه‌های عصبی در عمل بی‌خطر است. به‌عنوان مثال، بسیاری از مردم تصور می‌کردند که الگوریتم‌های آموزش ANN محکوم به فنا شده‌اند، زیرا این الگوریتم‌ها در بهینه‌های محلی گرفتار می‌شوند، اما مشخص شد که این اتفاق در عمل کمتر رخ می‌دهد (و در صورت بروز، معمولاً جواب‌ها به بهینه‌های سراسری نزدیک هستند).
- ✓ به نظر می‌رسد شبکه‌های عصبی مصنوعی وارد یک حلقه مقدس از بودجه و پیشرفت شده‌اند. محصولات شگفت‌انگیز مبتنی‌بر شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور مرتب خبرساز هستند و این موضوع باعث جذب بودجه بیشتری به سمت آن‌ها شده و نتیجه آن نیز پیشرفت بیشتر و حتی تولید محصولات شگفت‌انگیزتر است.

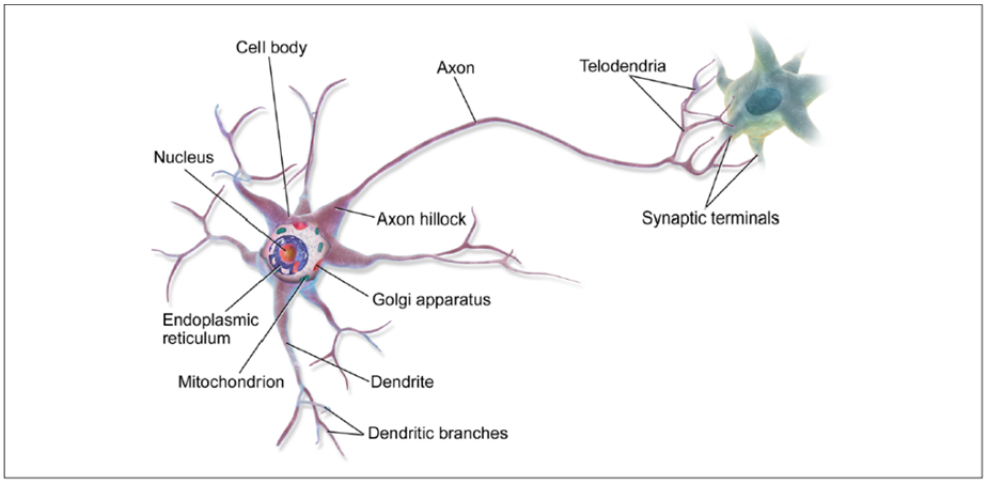
نورون‌های بیولوژیکی

قبل از اینکه در مورد نورون‌های مصنوعی بحث کنیم، اجازه دهید نگاهی سریع به یک نورون بیولوژیکی داشته باشیم (در شکل ۱-۱ نشان داده شده است). این ظاهر یک سلول غیرمعمول است که بیشتر در مغز حیوانات دیده می‌شود. نورون‌ها ترکیبی از یک بدنه سلول هستند که در آن اجزایی مانند هسته[2] و اکثر مؤلفه‌های پیچیده سلول، رشته‌هایی به نام دندریت‌ها[3] به اضافه رشته‌ای طولانی‌تر به نام آکسون[4] وجود دارد. طول آکسون ممکن است تنها چند برابر یا ده‌ها هزار برابر طولانی‌تر از بدنه سلول باشد. انتهای اکسون به شاخه‌هایی به نام تلودندریا[5] تقسیم می‌شود و در نوک این شاخه‌ها ساختارهای کوچکی به نام پایانه‌های سیناپس[6] وجود دارد که به دندریت‌ها یا بدنه سلول‌های نورون‌های دیگر متصل هستند.[7] نورن‌های بیولوژیکی شوک‌های الکتریکی کوتاهی را تولید می‌کنند که در امتداد آکسون‌ها حرکت می‌کنند و باعث می‌شوند سیناپس‌ها سیگنال‌های شیمیایی با نام انتقال‌دهنده‌های عصبی را آزاد کنند. هنگامی که یک نورون در طی چند

1- Moore’s law
2- Nucleus
3- Dendrites
4- Axon
5- Telodendria
6- Synapses

۷- آن‌ها در واقع متصل نیستند، فقط به‌قدری نزدیک هستند که می‌توانند به سرعت سیگنال‌های شیمیایی را مبادله کنند.

میلی‌ثانیه مقدار کافی از این انتقال‌دهنده‌های عصبی را دریافت می‌کنند، باعث شوک الکتریکی خود می‌شود (در واقع، این موضوع به انتقال‌دهنده‌های عصبی بستگی دارد، زیرا برخی از آن‌ها از فعال شدن نورون جلوگیری می‌کنند).



شکل ۱-۱. نورون بیولوژیکی[۱]

به نظر می‌رسد که هر یک از نورون‌های بیولوژیکی به روشی کاملاً ساده رفتار می‌کنند، اما این نورون‌ها در یک شبکه عظیم با تعداد میلیاردی سازماندهی شده که در آن شبکه معمولاً هر نورون به هزاران نورون دیگر متصل است. محاسبات بسیار پیچیده را می‌توان توسط شبکه‌ای از نورون‌های نسبتاً ساده انجام داد، دقیقاً مانند ساخت یک لانه پیچیده مورچه که از تلاش‌های مشترک مورچه‌های ساده پدیدار می‌شود. معماری شبکه‌های عصبی بیولوژیکی هنوز موضوع تحقیقاتی محسوب می‌شود[۲]، اما با عکس‌برداری از بخش‌های متعدد مغز به نظر می‌رسد که نورون‌ها اغلب در لایه‌های متوالی به‌خصوص در قشر مغز (به‌عنوان مثال لایه بیرونی مغز شما) سازمان‌دهی شده‌اند. این موضوع در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.

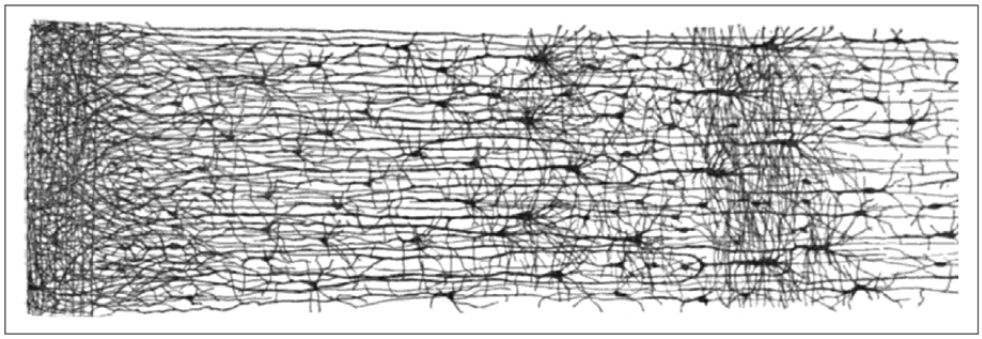
محاسبات منطقی با نورون‌ها

McCulloch و Pitts مدل بسیار ساده‌ای از نورون بیولوژیکی را ارائه کردند که بعداً به‌عنوان یک نورون مصنوعی شناخته شد: این نورون دارای یک یا چند ورودی دودویی (با دو حالت روشن و خاموش) و یک خروجی دودویی است. نورون مصنوعی هنگامی خروجی خود را فعال می‌کند که تعداد ورودی‌های فعال آن بیش از یک

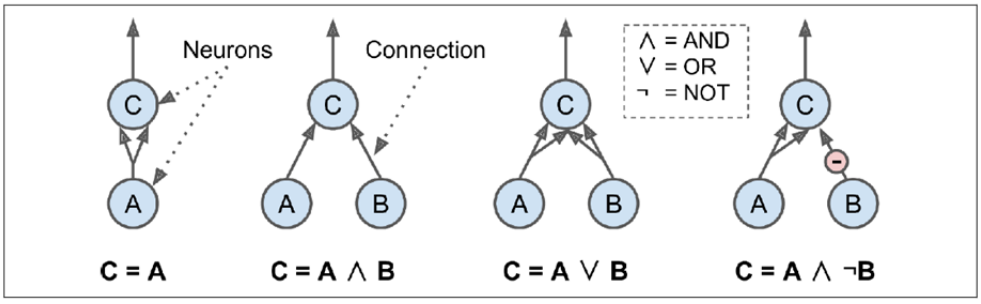
1- Image by Bruce Blaus (Creative Commons 3.0). Reproduced from https://en.wikipedia.org/wiki/Neuron.

۲- در حوزه یادگیری ماشین، عبارت «شبکه‌های عصبی» به ANN اشاره می‌کند نه BNN.

مقدار تعیین شده باشد. آن‌ها در مقاله خود نشان دادند که حتی با چنین مدل ساده‌ای می‌توان شبکه‌ای از سلول‌های عصبی مصنوعی ساخت که هر گونه گزاره‌های منطقی دلخواه را محاسبه می‌کند. به‌منظور مشاهده نحوه عملکرد چنین شبکه‌ای، اجازه دهید به سراغ چند شبکه عصبی مصنوعی برویم که محاسبات منطقی مختلفی را انجام می‌دهند (شکل ۱-۳ را ببینید)، با فرض اینکه یک نورون زمانی فعال می‌شود که حداقل دو ورودی آن فعال باشد.



شکل ۱-۲. لایه‌های چندگانه در یک شبکه عصبی بیولوژیکی[1]



شکل ۱-۳. شبکه‌های عصبی مصنوعی که محاسبات ساده منطقی را انجام می‌دهند.

اجازه دهید نحوه عملکرد این شبکه‌ها را بررسی کنیم:

- ✓ اولین شبکه در سمت چپ، تابع همانی[2] است. اگر نورن A فعال شود، آنگاه نورون C نیز می‌شود (زیرا دو سیگنال ورودی از نورن A دریافت می‌کند)؛ اما اگر نورون A خاموش باشد، نورون C نیز خاموش است.

1- Drawing of a cortical lamination by S. Ramon y Cajal (public domain). Reproduced from https://en.wikipedia.org/wiki/Cerebral_cortex.
2 Identity Function