

پیش‌بینی وضعیت قرنیه در بیماران قوز قرنیه پس از عمل جراحی کاشت حلقه

مرجان بختیارنیا^۱، کیوان معقولی^{۲*}، فرداد فرخی^۳، خسرو جدیدی^۴

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی پزشکی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- استاد، مرکز تحقیقات سلامت بینایی، دانشگاه علوم پزشکی سمنان، سمنان، ایران

یافته / دوره ۲۲ / شماره ۳ / پاییز ۹۹ / مسلسل ۸۵

چکیده

دریافت مقاله: ۹۹/۴/۲ پذیرش مقاله: ۹۹/۵/۲۰

مقدمه: یکی از عارضه‌های شایع در عیوب قرنیه بیماری قوز قرنیه است. در نتیجه پیشرفت سریع و گسترده علم در دهه‌های اخیر، عمل کاشت حلقه به روشی موفق برای درمان بیماری قوز قرنیه (کراتوکونوس) تبدیل شده ولی انتخاب بیمار در موفقیت این عمل بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر پیش‌بینی وضعیت قرنیه و یا به عبارت دقیق‌تر، پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه پس از عمل جراحی کاشت حلقه مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی بهینه برای الگوسازی و پیش‌بینی هستند. در این پژوهش برای نخستین بار به پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه بیماران، شش و دوازده ماه پس از عمل جراحی کاشت حلقه با استفاده از شبکه عصبی جلوسوی چندلایه پرداخته شده است. در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار متلب بر پیش‌بینی اندیس‌هایی از توپوگرافی قرنیه تمرکز شده است که مستقیماً در تشخیص و پیشروی بیماری قوز قرنیه مؤثر هستند. این رو داده‌های آماری تعدادی از بیماران، شامل اندیس‌های مؤثر توپوگرافی قرنیه پیش و پس از عمل کاشت حلقه جمع‌آوری شدند.

یافته‌ها: با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده، الگوهایی از شبکه عصبی ایجاد شدند و اندیس‌های مؤثر توپوگرافی قرنیه بیماران شش و دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه‌های کرارینگ و مایورینگ پیش‌بینی شدند. از چهار الگوی شبکه عصبی آموزش‌یافته، خطای میانگین ۷/۲۲٪ حاصل شد.

بحث و نتیجه‌گیری: انتخاب کاندیدای مناسب برای انجام عمل جراحی کاشت حلقه یکی از دغدغه‌های مهم چشم‌پزشکان است. بر مبنای نتایج حاصل‌شده، به منظور کمک به چشم‌پزشکان در انتخاب کاندیدای مناسب می‌توان از قابلیت و توانایی بالای شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه پس از جراحی کاشت حلقه بهره برد.

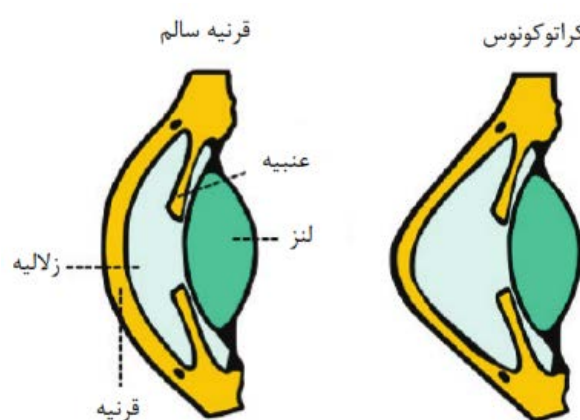
واژه‌های کلیدی: قوز قرنیه (کراتوکونوس)، توپوگرافی قرنیه، جراحی کاشت حلقه، پیش‌بینی اندیس‌ها، شبکه‌های عصبی.

*آدرس مکاتبه: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی پزشکی.

پست الکترونیک: k_maghooli@srbiau.ac.ir

مقدمه

در چشم فیبرهای کوچک پروتئینی موسوم به کلاژن، قرنیه را در جای خود نگه می‌دارند و از برآمده شدن آن جلوگیری می‌کنند. هنگامی که این فیبرها ضعیف می‌شوند، نمی‌توانند شکل قرنیه را حفظ کنند و قرنیه به تدریج، بیشتر شکل مخروطی به خود می‌گیرد. این وضعیت قوز قرنیه یا کراتوکونوس (KC) نامیده می‌شود (۱). در شکل زیر قرنیه سالم و قرنیه دچار بیماری قوز قرنیه نشان داده شده است.



شکل ۱. قرنیه سالم و قرنیه مبتلا به بیماری قوز قرنیه (۲)
بیماری قوز قرنیه اولین بار بیش از ۱۵۰ سال پیش توسط جان ناتینگهام تشخیص داده شد (۳). مطالعات بسیاری در مورد شیوع این بیماری صورت گرفته است. گزارش‌های علمی نشان می‌دهند شیوع این بیماری گسترده بوده و بسته به عوامل محیطی، ژنتیکی و نژادی از ۰/۰۲ تا ۳۳۳۳ مورد در هر ۱۰۰,۰۰۰ نفر متفاوت است. در دهه‌های اخیر درک از بیماری و چگونگی درمان آن به طور چشمگیری تغییر کرده است. یکی از روش‌های موفق درمان این بیماری عمل کاشت حلقه در قرنیه می‌باشد (۴-۶).

عمل کاشت یا ایمپلنت حلقه داخل قرنیه برای اصلاح عیب انکساری به حدود سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ بر-می‌گردد ولی به دلیل در دسترس نبودن ایمپلنت‌های مناسب و وسایل مربوط و ظهور لیزر، روش‌های کاشت

حلقه به فراموشی سپرده شد. به این روش مجدداً در دهه ۱۹۹۰ پس از رفع اشکالات قبلی توجه گردید. عمل کاشت حلقه در بعضی از قوزهای خفیف تا متوسط که تماس لنز را نمی‌توانند تحمل کنند، کاربرد دارد. این حلقه‌ها با کاهش میزان آستیگماتیسم نامنظم به بهبود بینایی کمک می‌کنند اما باید دانست که میزان موفقیت در حلقه‌های داخل قرنیه بسیار متغیر و از فردی به فرد دیگر متفاوت است و در صورت موفق نبودن درمان، نهایتاً بیمار به پیوند قرنیه نیاز خواهد داشت (۷،۸).

شاید بتوان گفت مهم‌ترین کاربرد فعلی حلقه، برای بیماران دچار قوز قرنیه خفیف یا متوسط است که قرنیه شفاف داشته باشند و ضخامت قرنیه برای انجام این عمل کافی باشد. در بیماران دچار قوز قرنیه، قرنیه دارای استحکام طبیعی نیست؛ بنابراین استفاده از لیزر یا لیزیک به منظور اصلاح عیوب انکساری در این بیماران ممنوع است اما حلقه‌های قرنیه‌ای باعث بهبود دید بدون عینک و با عینک در بیماران شده، از شدت بیماری می‌کاهند. قرار دادن حلقه در ضخامت قرنیه در محیط قرنیه انجام می‌شود و با کششی که روی قسمت مرکزی قرنیه ایجاد می‌کند، انحناي قرنیه را کاهش می‌دهد؛ بنابراین باعث کاهش نزدیک‌بینی می‌شود (۹).

حلقه‌های داخل قرنیه از جنس پلیمر PMMA می‌باشند که با قرنیه سازگار است. پلیمر PMMA ماده‌ای است که در طول سالیان گذشته برای ساخت لنزهای داخل چشمی مورد استفاده قرار گرفته و کاملاً با بافت چشم سازگار است؛ بنابراین باعث ایجاد التهاب نمی‌شود. معمولاً دو حلقه در دو طرف قرنیه کار گذاشته می‌شود (۹، ۱۰).

میزان موفقیت و بهبود شرایط قرنیه پس از عمل کاشت حلقه در بیماران با عارضه قوز قرنیه متغیر می‌باشد. از این رو یکی از دغدغه‌های چشم‌پزشکان برای درمان بیماران قوز قرنیه با استفاده از حلقه، تشخیص بیمارانی است که کاندیدای مناسبی برای انجام این جراحی هستند و این

روش نتایج دیداری بهتری برای آنها به همراه دارد. از طرف دیگر، مشخصات حلقه در نتیجه جراحی مؤثر می‌باشد. بنابراین با پیش‌بینی ویژگی‌های مرتبط با توپوگرافی قرنیه پس از جراحی می‌توان پزشکان را در این امر مهم یاری نمود.

شرح مفصلی از انحنای مختلف و ویژگی‌های شکل قرنیه را می‌توان با ثبت نقشه توپوگرافی قرنیه در اختیار داشت (۱۲، ۱۱). دو نوع نقشه اصلی توپوگرافی وجود دارد: (۱) نقشه‌های انحنای و (۲) نقشه‌های ارتفاع. نقشه‌های انحنای دو نوع هستند: نقشه‌های انحنای محوری و نقشه‌های انحنای مماسی. این اطلاعات برای نشان دادن آستیگماتیسم قرنیه و تشخیص آسیب‌های قرنیه بسیار مفید هستند.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) سیستمی محاسباتی می‌باشند که از تعداد زیادی واحد ساده پردازشی با نام گره یا نورون تشکیل شده‌اند (۱۳). در این ساختار ارتباطی قوی بین واحدها برقرار است. این سیستم قادر است دینامیک‌های پیچیده بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را پیش‌بینی و دنبال نماید. در شبکه‌های عصبی مصنوعی از روش پردازش اطلاعات در شبکه عصبی زیستی (در مغز انسان) الهام گرفته شده است. نورون‌ها واحد پردازش پایه در مغز هستند. در سیستم عصبی انسان به طور تقریبی ۸۶ میلیارد نورون یافت می‌شود که از طریق ۱۴۱۰ تا ۱۵۱۰ سیناپس به یکدیگر متصل هستند. در تحقیقات بسیاری از شبکه‌های عصبی به عنوان سیستمی هوشمند با قابلیت یادگیری نام برده شده است (۱۴، ۱۵).

در راستای به کارگیری ابزارهای یادگیری ماشین برای تشخیص وضعیت قرنیه چشم از نظر بیماری قوز قرنیه پژوهش‌های محدودی صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۲، آکاردو و همکاران با استفاده از روش شبکه‌های عصبی و با بهره‌گیری از اندیس‌های توپوگرافی به تشخیص عارضه قوز

قرنیه پرداختند (۱۶). در این پژوهش، ۹ اندیس توپوگرافی به عنوان پارامترهای ورودی به شبکه عصبی در نظر گرفته شده و سه حالت تشخیصی قرنیه طبیعی (N)، قرنیه با عارضه قوز قرنیه (KC) و سایر (O) به عنوان سه خروجی شبکه عصبی لحاظ شده است. در این پژوهش، با آزمون حالت‌های مختلف پارامترهای ورودی، تعداد نورون‌ها، پارامترهای آموزش شبکه عصبی و ... بهترین نتیجه با حساسیت تشخیصی ۹۴/۱٪ به دست آمده است. در همین راستا، در سال ۲۰۰۶، بشو و همکاران با استفاده از داده‌های ارتفاع داخلی و خارجی توپوگرافی سطح قرنیه، با ایجاد الگوریتمی به نام اندیس تشخیصی کراتوکونوس فوری‌های (FKI) در تشخیص عارضه قوز قرنیه به درصد حساسیت ۹۶/۹٪ رسیده‌اند (۱۷).

سوزا و همکاران در سال ۲۰۱۰ تشخیص بیماری قوز قرنیه را به سه روش مختلف یادگیری ماشین ارزیابی نمودند (۱۸). در این پژوهش کارایی سه ابزار طبقه‌بندی SVM، MLP و RBFNN با هم مقایسه شده است. ۱۱ مشخصه قرنیه چشم از نقشه‌های توپوگرافی قرنیه استخراج و به عنوان ورودی به ابزارهای طبقه‌بندی داده شدند و خروجی آنها، چهار حالت از وضعیت قرنیه چشم بود: وضعیت سالم، آستیگماتیسم، قوز قرنیه و PRK. حاصل این پژوهش آن است که هر سه روش طبقه‌بندی به کار گرفته شده، توانایی خوبی در تشخیص وضعیت قرنیه چشم از نظر بیماری قوز قرنیه دارند.

والدس-ماس و همکاران در سال ۲۰۱۴ پژوهشی مشابه پژوهش حاضر به انجام رساندند که طی آن با استفاده از شبکه عصبی به پیش‌بینی وضعیت قرنیه چشم شش ماه پس از عمل جراحی کاشت حلقه در بیماری قوز قرنیه پرداخته شد (۷). در این پژوهش، ۹ پارامتر شامل متغیرهای توپوگرافی قرنیه، متغیرهای جراحی و مشخصه‌های حلقه کاشته شده به عنوان ورودی به شبکه عصبی داده شد و خروجی شبکه عصبی اندیس انحنای

قرنیه (K1) و اندیس آستیگماتیسم قرنیه بود. پس از ارزیابی الگوهای مختلف از شبکه‌های عصبی، بهترین نتیجه در پیش‌بینی انحناى قرنیه و میزان آستیگماتیسم به ترتیب دارای خطای مطلق ۰/۹۷ و ۰/۹۳ دیوپتر بود.

کواکس و همکاران در سال ۲۰۱۶ به کمک شبکه‌های عصبی و با استفاده از مشخصه‌های توپوگرافی و توموگرافی هر دو چشم، به تشخیص بیماری قوز قرنیه در مراحل اولیه پرداختند (۱۹). در پژوهش مذکور مشخص شد که بیمارانی که فقط یکی از چشم‌های آنها علائم اولیه قوز قرنیه را دارند، از نظر مشخصه‌های توپوگرافی و توموگرافی تفاوت‌های قابل توجهی با چشم‌های فرد سالم دارند. با استفاده از همین یافته می‌توان به تشخیص زودهنگام بیمار قوز قرنیه در مراحل اولیه بیماری دست یافت. برای نیل به این هدف، اطلاعات مربوط به مشخصه‌های مختلف هر دو چشم بیمار به الگوریتم‌های یادگیری ماشین داده شده و امکان تشخیص بیماری در مراحل اولیه با دقت بالا فراهم شده است.

در این پژوهش برای نخستین بار شبکه عصبی مصنوعی برای یادگیری و پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه شش و دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه به کار برده شد. رویکرد به کار گرفته شده در پژوهش حاضر مشابه با پژوهش صورت گرفته توسط والدس-ماس و همکاران (۷) است، با این تفاوت که در پژوهش حاضر اندیس‌هایی از توپوگرافی قرنیه پیش‌بینی می‌شوند که مستقیماً در تشخیص و پیشروی بیماری قوز قرنیه مؤثر هستند.

مواد و روش‌ها

به منظور پیش‌بینی وضعیت بیماری قوز قرنیه پس از عمل کاشت حلقه، لازم است اندیس‌هایی از توپوگرافی قرنیه چشم انتخاب شوند که مستقیماً در تشخیص بیماری قوز قرنیه به کار برده می‌شوند. با در اختیار داشتن مجموعه داده مناسب شامل اندیس‌های توپوگرافی از بیماران با عارضه قوز قرنیه پیش و پس از عمل کاشت حلقه، می‌توان شبکه عصبی را آموزش داد

تا قادر به پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی شش و دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه باشد. به عبارت دیگر، می‌توان به این پرسش پاسخ داد که "اگر شخصی با عارضه قوز قرنیه تحت عمل جراحی قرار گیرد، اندیس‌های توپوگرافی قرنیه او شش و دوازده ماه پس از عمل جراحی چه مقادیری خواهند داشت؟".

به منظور دست‌یابی به پیش‌بینی وضعیت بیماری قوز قرنیه پس از عمل کاشت حلقه با استفاده از الگوی شبکه عصبی مصنوعی، لازم است مجموعه‌ای از داده‌های آماری از بیماران با عارضه قوز قرنیه تهیه شود که قبلاً تحت عمل جراحی کاشت حلقه قرار گرفته‌اند. این داده‌های آماری باید شامل مشخصه‌هایی از قرنیه چشم بیماران قبل و بعد از عمل کاشت حلقه باشد. از این رو در گام نخست، مشخصه‌هایی از قرنیه چشم بیماران شناسایی شد که مستقیماً در تشخیص عارضه قوز قرنیه استفاده می‌شوند.

بر اساس پژوهش‌های کرومیچ (۲۱،۲۰) اندیس‌های توپوگرافی Ast (آستیگماتیسم قرنیه)، K-Reading (قدرت قرنیه) و Pachymetry (ضخامت قرنیه) در تشخیص و شناسایی مراحل پیش روی قوز قرنیه استفاده می‌شوند. از این رو داده‌های آماری شامل اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم بیماران جمع‌آوری شد. این داده‌های آماری، بیمارانی (زن و مرد) را شامل می‌شد که بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ در مرکز تحقیقات سلامت بینایی تحت عمل جراحی با دو نوع حلقه کرارینگ و مایورینگ قرار گرفته بودند. علاوه بر ثبت و جمع‌آوری اندیس‌های توپوگرافی از بیماران قبل و بعد از عمل، مشخصات حلقه مورد استفاده در چشم بیمار شامل قطر و ضخامت حلقه نیز در مجموعه داده‌های آماری گنجانده شد.

در سال‌های اخیر، شبکه‌های عصبی مصنوعی در تحقیقاتی که در حوزه‌های مختلف انجام شده‌اند، بسیار مفید واقع شده‌اند. تاکنون برای اهداف مختلفی از جمله طبقه‌بندی، خوشه‌بندی، شناسایی الگو، الگوسازی و پیش‌بینی در بسیاری از حوزه‌ها از شبکه‌های عصبی مصنوعی کمک گرفته شده است. با وجود مزایایی نظیر توانایی تعلیم غیرخطی و مقاوم بودن در برابر

نویز، شبکه‌های عصبی ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی رفتار و دینامیک سیستم‌های غیرخطی و تخمین پارامترهای مختلف هستند. بحث آموزش در شبکه عصبی بسیار مهم است. آموزش صحیح روی نتایج تأثیر مستقیم دارد، چه بسا نتایج متفاوتی از دو شبکه عصبی با ساختار یکسان و آموزش‌های متفاوت حاصل شود. برای جلوگیری از آموزش بیش از حد و حفظ داده‌ها توسط شبکه (کاهش توانایی تعمیم شبکه)، باید از تکرارهای بیش از حد پرهیز نمود (۱۴، ۲۲، ۲۳).

در تحقیقات مختلف نشان داده شده است که شبکه‌های عصبی جلوسو (پیش‌خور) توانایی بالایی در پیش‌بینی‌های مختلف دارند (۱۴، ۲۴، ۲۵). الگوی طراحی شده در این پژوهش نیز شامل شبکه عصبی جلوسوی چند لایه بود. این شبکه‌ها به صورت شبکه‌های با سرپرستی و با الگوریتم پس‌انتشار خطا کار می‌کنند. شبکه عصبی طراحی شده در این پژوهش شبکه عصبی جلوسو با یک لایه پنهان بود. تعداد نوروں‌های لایه پنهان بر اساس سعی و خطا و با توجه به تعداد و پیچیدگی ورودی‌های مسئله طراحی شد.

با توجه به کل داده‌های در دسترس، ۸۵٪ داده‌ها برای آموزش و ۱۵٪ به منظور آزمون و اعتبارسنجی شبکه آموزش-یافته استفاده شدند. داده‌های آزمون شبکه مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و هدف هستند که در فرآیند آموزش شبکه استفاده نشده، صرفاً برای ارزیابی شبکه و تشخیص پدیده‌هایی از قبیل بیش‌برازش استفاده می‌شوند. مجموعه داده‌های آموزش و داده‌های ارزیابی به طور تصادفی از بین تمام داده‌ها انتخاب شدند. در نهایت به منظور ارزیابی کیفیت پیش‌بینی الگوی شبکه‌های عصبی از تحلیل رگرسیون در هر دو مجموعه از داده‌های آموزش و آزمون استفاده شد.

یافته‌ها

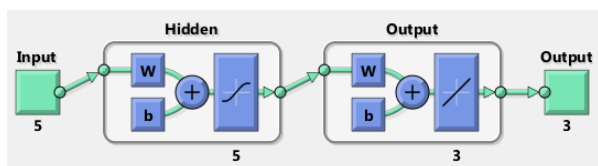
با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش پیشین، داده‌های جمع‌آوری شده شامل اندیس‌های توپوگرافی Ast (آستیگماتیسم قرنیه)، K-Reading (قدرت قرنیه) و Pachymetry (ضخامت قرنیه) از دو دسته عمده از بیماران دارای عارضه قوز قرنیه است:

بیمارانی که در عمل جراحی آنها از حلقه مایورینگ و دسته دیگر بیمارانی که در عمل جراحی آنها از حلقه کرارینگ استفاده شده است. این بیماران بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ در مرکز تحقیقات سلامت بینایی تحت عمل جراحی کاشت حلقه قرار گرفته بودند. در هر دسته، داده‌های مربوط به حداقل ۴۰ بیمار جمع‌آوری شد. برای هر یک از بیماران، داده‌های مربوط به پیش و پس از عمل کاشت حلقه (شش و دوازده ماه پس از عمل) ثبت و به همراه دو پارامتر قطر و ضخامت حلقه‌های کرارینگ و مایورینگ استفاده شده در جراحی چشم، به عنوان داده‌های ورودی به شبکه‌های عصبی داده شدند.

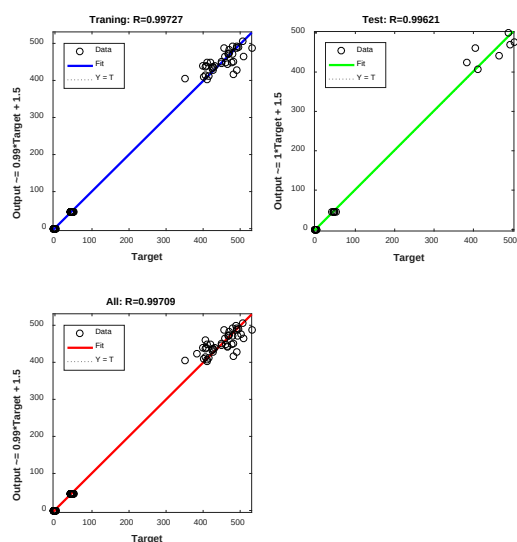
در محیط نرم‌افزار متلب، شبکه عصبی معرفی شده با یک لایه پنهان برای آموزش داده‌های ثبت شده به کار برده شد. ساختار شبکه‌های عصبی طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار متلب برای پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم با عارضه قوز قرنیه شش و دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه‌های کرارینگ و مایورینگ و عملکرد شبکه‌های عصبی طراحی شده در پیش-بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه در ادامه نشان داده شده‌اند.

در پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم با عارضه قوز قرنیه شش ماه پس از عمل کاشت حلقه کرارینگ با استفاده از شبکه عصبی پیشنهادی (شکل ۲)، همان‌طور که در نمودار ۱ ملاحظه می‌شود، مجموعه داده‌های آموزش دارای رگرسیون $R_{\text{Training}} = 0.99985$ هستند که دلالت بر نزدیکی بسیار زیاد خروجی و اهداف شبکه در مجموعه آموزش دارد. علاوه بر مقدار عددی تحلیل رگرسیون، در نمودار رابطه بین خروجی و هدف، اگر خط برازش شده دارای زاویه‌ای نزدیک به ۴۵ درجه باشد، دو مجموعه خروجی و هدف بسیار به هم نزدیک هستند. در نمودار با برچسب Test، تحلیل رگرسیون مجموعه داده‌های آزمون ارائه شده است. برای داده‌های آزمون مقدار رگرسیون $R_{\text{Test}} = 0.99191$ می‌باشد که به مقدار عددی ۱ (تطبیق کامل) نزدیک است. در نمودار با برچسب All، تحلیل رگرسیون برای کلیه داده‌ها (آموزش و آزمون) ارائه شده است که مقدار رگرسیون خطی برابر با $R_{\text{All}} = 0.99871$ می‌باشد.

۰/۹۹۷۰۹ R_{All} می‌باشد. مقادیر رگرسیون به مقدار عددی ۱ (تطبیق کامل) نزدیک هستند.

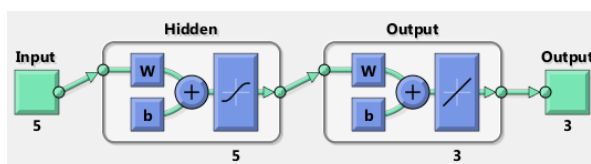


شکل ۳. ساختار شبکه عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه با عارضه قوز قرنیه دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه کرارینگ

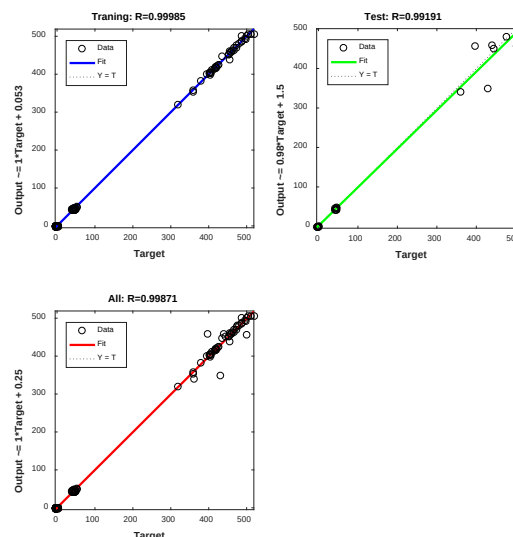


نمودار ۲. نتایج تحلیل رگرسیون خطی برای شبکه آموزش‌یافته به منظور پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه کرارینگ

همان‌طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، در پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم با عارضه قوز قرنیه شش ماه پس از عمل کاشت حلقه مایورینگ با استفاده از شبکه عصبی پیشنهادی (شکل ۴)، مجموعه داده‌های آموزش دارای رگرسیون $R_{Training}=0/999$ هستند. در نمودار رابطه بین خروجی و هدف، خط برازش‌شده دارای زاویه‌ای نزدیک به ۴۵ درجه می‌باشد. مقدار عددی تحلیل رگرسیون و زاویه خط برازش‌شده در نمودار رابطه بین خروجی و هدف بر نزدیکی بسیار زیاد خروجی و اهداف شبکه در مجموعه آموزش دلالت دارند. مشابه با نمودارهای پیشین، تحلیل رگرسیون مجموعه داده‌های آزمون در نمودار با برچسب Test و تحلیل رگرسیون برای کلیه داده‌ها (آموزش و آزمون) در نمودار با برچسب All ارائه شده است. مقدار رگرسیون برای داده‌های آزمون

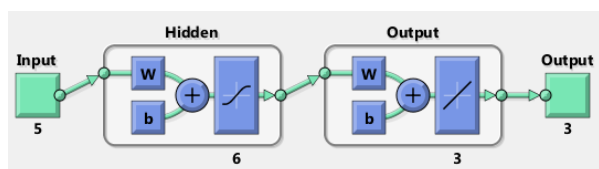


شکل ۲. ساختار شبکه عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه با عارضه قوز قرنیه شش ماه پس از عمل کاشت حلقه کرارینگ

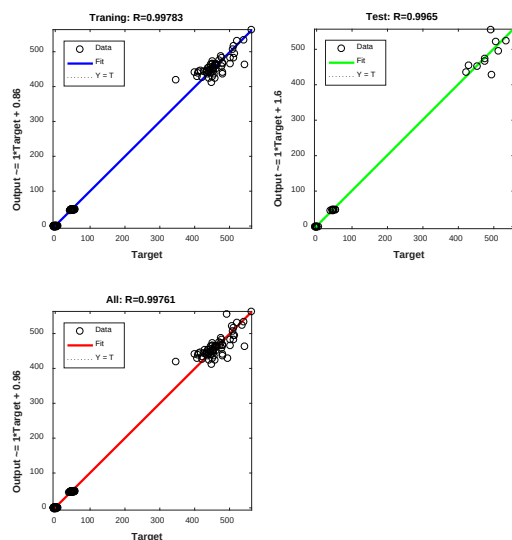


نمودار ۱. نتایج تحلیل رگرسیون خطی برای شبکه آموزش‌یافته به منظور پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه شش ماه پس از عمل کاشت حلقه کرارینگ

در پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم با عارضه قوز قرنیه دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه کرارینگ با استفاده از شبکه عصبی طراحی شده (شکل ۳)، همان‌طور که در نمودار با برچسب Training از نمودار ۲ مشاهده می‌شود، مجموعه داده‌های آموزش دارای رگرسیون $R_{Training}=0/99727$ هستند که دلالت بر نزدیکی بسیار زیاد خروجی و اهداف شبکه در مجموعه آموزش دارد. علاوه بر مقدار عددی تحلیل رگرسیون، زاویه نزدیک به ۴۵ درجه خط برازش‌شده در نمودار رابطه بین خروجی و هدف بر نزدیکی بسیار زیاد دو مجموعه خروجی و هدف دلالت دارد. در نمودار با برچسب Test، تحلیل رگرسیون مجموعه داده‌های آزمون ارائه شده است. برای داده‌های آزمون مقدار رگرسیون $R_{Test}=0/99621$ می‌باشد. تحلیل رگرسیون برای کلیه داده‌ها (آموزش و آزمون) در نمودار با برچسب All ارائه شده است که مقدار رگرسیون برابر با



شکل ۵. ساختار شبکه عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه با عارضه قوز قرنیه دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه مایورینگ

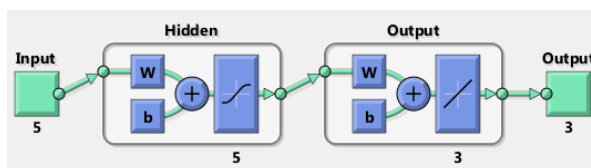


نمودار ۴. نتایج تحلیل رگرسیون خطی برای شبکه آموزش‌یافته به منظور پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه مایورینگ

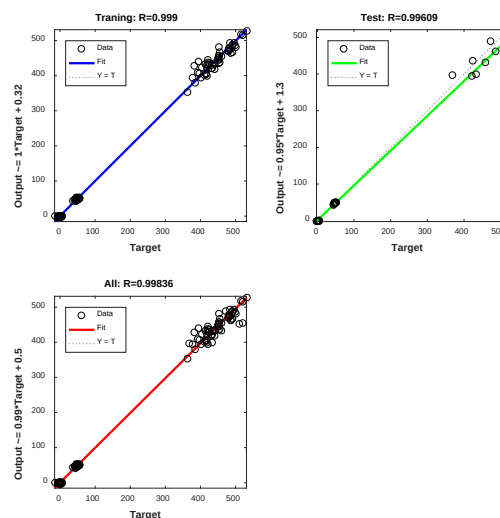
بحث و نتیجه‌گیری

قرنیه به طور طبیعی شکلی گرد یا کروی دارد ولی در بیماری قوز قرنیه، قرنیه نازک، برآمده و مخروطی شکل می‌شود. این تغییر هنگام ورود نور به چشم بر روند انکسار آن تأثیر می‌گذارد و سبب کاهش وضوح بینایی چشم می‌شود. قوز قرنیه ممکن است در یک یا هر دو چشم روی دهد ولی در نود درصد موارد در هر دو چشم دیده می‌شود. در این صورت خواندن، نوشتن و یا رانندگی فرد مختل می‌شود. اصلاح دید در مراحل ابتدایی بیماری با عینک و سپس با لنز تماسی ممکن است. متخصصان در زمان پیشرفت بیماری از لنز تماسی سخت نیز استفاده می‌کنند. چنانچه روند پیشرفت بیماری کم باشد، از حلقه‌های داخل چشم برای اصلاح دید بیمار استفاده و در مراحل پیشرفته، پیوند قرنیه انجام می‌شود (۲۶).

$R_{\text{Test}} = 0.99609$ و برای کلیه داده‌ها $R_{\text{All}} = 0.99836$ می‌باشد که هر دو به مقدار عددی ۱ (تطبیق کامل) نزدیک هستند.



شکل ۴. ساختار شبکه عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه با عارضه قوز قرنیه شش ماه پس از عمل کاشت حلقه مایورینگ



نمودار ۳. نتایج تحلیل رگرسیون خطی برای شبکه آموزش‌یافته به منظور پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه شش ماه پس از عمل کاشت حلقه مایورینگ

در پیش‌بینی اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم با عارضه قوز قرنیه دوازده ماه پس از عمل کاشت حلقه مایورینگ با استفاده از شبکه عصبی طراحی شده (شکل ۵)، مجموعه داده‌های آموزش، با توجه به نمودار با برچسب Training در نمودار ۴، دارای رگرسیون $R_{\text{Training}} = 0.99783$ می‌باشد که دلالت بر نزدیکی خروجی و اهداف شبکه در مجموعه آموزش دارد. با توجه به نمودار با برچسب Test، برای داده‌های آزمون مقدار رگرسیون $R_{\text{Test}} = 0.99609$ می‌باشد. از تحلیل رگرسیون برای کلیه داده‌ها (آموزش و آزمون)، طبق نمودار با برچسب All، مقدار رگرسیون خطی برابر با $R_{\text{All}} = 0.99761$ به دست آمده است. مقادیر رگرسیون دلالت بر نزدیکی زیاد خروجی و اهداف شبکه در مجموعه داده‌های آموزش و آزمون دارند.

شبکه عصبی آموزش یافته پیش‌بینی می‌نماید که اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم بیمار شش ماه پس از عمل کاشت حلقه مایورینگ دارای مقادیر زیر خواهند بود:

$$Ast_{output} = -1.09$$

$$K-Reading_{output} = 48.5$$

$$Pachymetry_{output} = 438.24$$

مقادیر واقعی استخراج شده از روی توپوگرافی ثبت شده و یا به عبارت دیگر اهداف شبکه به شرح زیر می‌باشند:

$$Ast_{target} = -0.90$$

$$K-Reading_{target} = 45.2$$

$$Pachymetry_{target} = 451$$

با مقایسه کیفی دو مجموعه خروجی و اهداف، ملاحظه می‌شود که مقادیر عددی اندیس‌ها به هم نزدیک هستند.

به منظور ارزیابی کمی کیفیت پیش‌بینی هر شبکه، تمام داده‌های در دسترس به عنوان ورودی شبکه عصبی قرار داده شدند. تمامی خروجی‌های شبکه با اهداف متناظر مقایسه و اختلاف عددی آنها محاسبه شدند. نتایج میانگین درصد خطای پیش‌بینی شبکه‌های عصبی پیشنهادی در ادامه ارائه شده‌اند. بر مبنای نتایج به دست آمده، میانگین خطای پیش‌بینی اندیس‌های Ast، K-Reading و Pachymetry قرنیه با استفاده از شبکه‌های عصبی پیشنهادی به ترتیب برابر با $6/58\%$ ، $9/03\%$ و $6/04\%$ (خطای میانگین $7/22\%$) می‌باشد.

میانگین خطای پیش‌بینی اندیس‌های مؤثر توپوگرافی قرنیه توسط شبکه‌های عصبی آموزش یافته $7/22\%$ به دست آمده است. بدین ترتیب با آموزش موفق شبکه‌های عصبی مذکور به راهکاری برای تشخیص اثربخشی جراحی کاشت حلقه برای بیماران با عارضه قوز قرنیه دست یافتیم. امید است در ادامه تحقیقات با بهره‌گیری از داده‌های بیشتری از توپوگرافی قرنیه، در پیش‌بینی اندیس‌های مؤثر توپوگرافی قرنیه با استفاده از شبکه‌های عصبی پیشنهادی به نتایج دقیق‌تری دست یابیم.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد گروه مهندسی پزشکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات می‌باشد. نویسندگان از کادر مجرب مرکز تحقیقات

نتایج بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی در تحقیقات مختلف به خوبی بیانگر توانایی حل مسائل پیچیده در دنیای واقعی و قدرت بالای پردازش موازی اطلاعات و یادگیری شبکه‌های عصبی است. از آنجا که اندیس‌های توپوگرافی قرنیه چشم اطلاعات کم‌حجمی می‌باشند، مدل‌های محاسباتی الگویی و از جمله شبکه عصبی می‌توانند با دقت و سرعت بالاتر و با در اختیار داشتن داده‌های آماری کمتر، الگوی رفتار حاکم بر تعداد محدود پارامترها را شناسایی کنند. از طرفی داده‌هایی همچون اندیس‌های توپوگرافی قرنیه، اطلاعات ارزشمند بالینی را در اختیار پزشکان قرار می‌دهند و با پیش‌بینی داده‌های مذکور با استفاده از شبکه‌های عصبی می‌توان وضعیت بهبود بیماری را در بازه‌های زمانی مختلف پیش‌بینی نمود.

در این مقاله الگویی بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی اندیس‌های مؤثر از توپوگرافی قرنیه چشم پس از عمل کاشت حلقه در بیماری قوز قرنیه ارائه شده است. با هدف پیش‌بینی اندیس‌های مذکور شش و دوازده ماه پس از عمل جراحی کاشت هر یک از حلقه‌های کرارینگ و مایورینگ، ۴ شبکه عصبی با استفاده از داده‌های آماری در دسترس با موفقیت آموزش یافتند. با استفاده از شبکه‌های آموزش یافته می‌توان اندیس‌های توپوگرافی قرنیه را شش و دوازده ماه پس از عمل کاشت هر یک از حلقه‌های کرارینگ و مایورینگ با دقت خوبی پیش‌بینی نمود.

نمونه‌ای از پیش‌بینی انجام شده توسط یکی از شبکه‌های آموزش یافته را بررسی می‌نماییم. فرض شود اندیس‌های توپوگرافی قرنیه بیماری با عارضه قوز قرنیه قبل از عمل دارای مقادیر زیر باشند:

$$Ast_{pre} = -4.00$$

$$K-Reading_{pre} = 53.5$$

$$Pachymetry_{pre} = 400$$

هم‌چنین مشخصه‌های (قطر و ضخامت) حلقه مایورینگ انتخاب شده برای کاشت به شرح زیر باشند:

$$Ring\ Diameter = 6$$

$$Ring\ Thickness = 280$$

سلامت بینایی به خاطر فراهم‌نمودن داده‌های مورد نیاز در
این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

1. Rastine, Medical Site and Health Magazine. What is keratoconus? Causes, symptoms, diagnosis and treatment. <https://rastineh.com/what-is-a-cornea-or-keratoconus/>. 2018. (In Persian)
2. Lavric A, Valentin P. KeratoDetect: Keratoconus detection algorithm using convolutional neural networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2019;2019(8162567):1-9.
3. Mohammadpour M, Heidari Z, Hashemi H. Updates on managements for keratoconus. *Journal of Current Ophthalmology*. 2018;30(2):110-24.
4. Mohammadi SF, Mohammadzadeh V, Kadivar S, Beheshtnejad AH, Norooznejhad AH, Hashemi SH. Topographic typology in a consecutive series of refractive surgery candidates. *International Ophthalmology*. 2018;38(4):1611-9.
5. Al-Amri AM. Prevalence of keratoconus in a refractive surgery population. *Journal of Ophthalmology*. 2018;2018(5983530):1-5.
6. Kanimozhi R, Gayathri R. A survey on detection of keratoconus. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET)*. 2018;5(3):304-9.
7. Valdés-Mas MA, Martín-Guerrero JD, Rupérez MJ, Pastor F, Dualde C, Monserrat C, et al. A new approach based on machine learning for predicting corneal curvature (K1) and astigmatism in patients with keratoconus after intracorneal ring implantation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2014;116(1):39-47.
8. Dr Alireza Naderi, Ophthalmologist, Cornea Sub-Specialist Website. Keratoconus. <http://www.dr-naderi.com/main/main.aspx?id=29>. 2020. (In Persian)
9. Noor Eye Hospital and Clinics Website. Intacs, intracorneal ring. <https://www.noor-vision.com/fa/>. 2020. (In Persian)
10. Lago MA, Rupérez MJ, Monserrat C, Martínez-Martínez F, Martínez-Sanchis S, Larra E, et al. Patient-specific simulation of the intrastromal ring segment implantation in corneas with keratoconus. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015;51(1):260-8.
11. Lanza M, Cennamo M, Iaccarino S, Romano V, Bifani M, Irregolare C, et al. Evaluation of corneal deformation analyzed with a Scheimpflug based device. *Contact Lens and Anterior Eye*. 2015;38(2):89-93.
12. Mülhaupt M, Dietzko S, Wolffsohn J, Bandlitz S. Corneal topography with an aberrometry-topography system. *Contact Lens and Anterior Eye*. 2018;41(5):436-41.
13. Valdés-Mas MA, Martín JD, Rupérez MJ, Peris C, Monserrat C. Machine learning for predicting astigmatism in patients with keratoconus after intracorneal ring implantation. *IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI), Valencia*. 2014:756-759.
14. Falahian R, Mehdizadeh Dastjerdi M, Molaie M, Jafari S, Gharibzadeh S. Artificial neural network-based modeling of brain response to flicker light. *Nonlinear Dynamics*. 2015;81(4):1951-67.
15. Molaie M, Falahian R, Gharibzadeh S, Jafari S, Sprott JC. Artificial neural

- networks: powerful tools for modeling chaotic behavior in the nervous system. *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2014;8(40):1-3.
16. Accardo PA, Pensiero S. Neural network-based system for early keratoconus detection from corneal topography. *Journal of Biomedical Informatics*. 2002;35(3):151-9.
 17. Bessho K, Maeda N, Kuroda T, Fujikado T, Tano Y, Oshika T. Automated keratoconus detection using height data of anterior and posterior corneal surfaces. *Japanese Journal of Ophthalmology*. 2006;50(5):409-16.
 18. Souza MB, Medeiros FW, Souza DB, Garcia R, Alves MR. Evaluation of machine learning classifiers in keratoconus detection from orbscan II examinations. *Clinics (Sao Paulo, Brazil)*. 2010;65(12):-1223-8.
 19. Kovacs I, Mihaltz K, Kranitz K, Juhasz E, Takacs A, Dienes L, et al. Accuracy of machine learning classifiers using bilateral data from a Scheimpflug camera for identifying eyes with preclinical signs of keratoconus. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*. 2016;42(2):275-83.
 20. Krumeich JH, Kezirian GM. Circular keratotomy to reduce astigmatism and improve vision in stage I and II keratoconus. *Journal of Refractive Surgery*. 2009;25(4):357-65.
 21. Krumeich JH, Daniel J. Live epikeratophakia and deep lamellar keratoplasty for I-III stage-specific surgical treatment of keratoconus. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. 1997;211(2):94-100. (In German)
 22. Isa IS, Saad Z, Omar S, Osman MK, Ahmad KA, Sakim HAM. Suitable MLP network activation functions for breast cancer and thyroid disease detection. *Second International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation, Tuban*. 2010:39-44.
 23. Abiodun OI, Jantan A, Omolara AE, Dada KV, Mohamed NA, Arshad H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*. 2018;4(11):e00938.
 24. Mahsal Khan M, Masood Ahmad A, Muhammad Khan G, Miller JF. Fast learning neural networks using Cartesian genetic programming. *Neurocomputing*. 2013;121(1):274-89.
 25. Engler JJ. Characterization of normality of chaotic systems including prediction and detection of anomalies. Iowa City (Iowa): Iowa Research Online, University of Iowa. 2011:69.
 26. Young Journalists Club. Reduced visual acuity is one of the symptoms of keratoconus. <https://www.yjc.ir/fa/news/4284076/>. 2013. (In Persian)

Prediction of Corneal Condition after Corneal Ring Implantation in Keratoconus Patients

Bakhtiarnia M¹, Maghooli K^{2*}, Farokhi F³, Jadidi K⁴

1. MSc, Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, k_maghooli@srbiau.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Biomedical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4. Professor, Vision Health Research Center, Semnan University of Medical Sciences, Semnan, Iran

Received: 22 Jun 2020

Accepted: 10 Aug 2020

Abstract

Background: Keratoconus is a common complication among corneal defects. As a result of expeditious and extensive progress of medical science in recent decades, corneal ring implantation has turned into a successful surgical procedure to correct the vision of keratoconus patients; however, selecting the right patient is essential in the success of the operation. The prediction of corneal condition or, more precisely, the prediction of corneal topographic indices after implanting the ring has been taken into consideration in the present study.

Materials and Methods: Neural network framework is one of the optimal methods for the modeling and prediction. In this study, corneal topographic indices of patients have been predicted 6 and 12 months after the ring implantation for the first time using the multilayer feed forward neural network. The study has focused on predicting corneal topographic indices that are applicable to keratoconus diagnosis and progression using MATLAB software. Therefore, the statistical data of a number of patients, including the effective indices of the corneal topography before and after implanting the ring, were collected.

Results: Using the collected data, neural network models have been developed and the corneal topographic indices have been predicted 6 and 12 months after the implantation of keraring and myoring rings. The mean error of 7.22% is achieved for the four trained neural network models.

Conclusion: Choosing the right surgical candidate is one of the primary concerns of ophthalmologists. The results indicate the great capability of neural networks in assisting ophthalmologists to select right surgical candidates through predicting corneal topographic indices after the ring implantation.

Keywords: Keratoconus, Corneal topography, Ring implantation, Indices prediction, Neural networks.

***Citation:** Bakhtiarnia M, Maghooli K, Farokhi F, Jadidi K. Prediction of Corneal Condition after Corneal Ring Implantation in Keratoconus Patients. Yafte. 2020; 22(3):118-129.