

پیش‌بینی اکتازی قرنیه پس از لیزیک با استفاده از ضرایب زرنیک موجود در توپوگرافی قبل از عمل

شیوا پیرهادی^۱
کیوان معقولی^۲
احمد شجاعی^۳
فرهود موسوی زاده^۴
محمود بابایی^۳

خلاصه

مقدمه: پیش‌بینی اکتازی قرنیه بعد از جراحی رفراکتیو با استفاده از ضرایب زرنیک استخراج شده از تصاویر توپوگرافی قبل از عمل و ارائه قواعدی جهت کمک به تشخیص صحیح‌تر چشم‌پزشکان در رابطه با انجام جراحی لیزیک.

روش بررسی: افراد بررسی شده در این مطالعه همگی تحت جراحی LASIK قرار گرفته بودند و بعد از ۶-۳ سال مجدداً مورد ارزیابی قرار گرفتند. ما این افراد را به چهار گروه تقسیم‌بندی کردیم: ۱- کسانی که قبل از عمل وضعیت نرمالی داشتند و بعد از آن نیز علائمی از اکتازی قرنیه در آن‌ها مشاهده نشده بود. ۲- کسانی که قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس بودند اما بعد از عمل دچار اکتازی قرنیه نشدند. ۳- کسانی که قبل از عمل نرمال بودند اما بعد از آن دچار اکتازی قرنیه شده بودند. ۴- کسانی که قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس بودند و بعد از آن دچار اکتازی قرنیه شدند. تصاویر توپوگرافی قبل از عمل تمامی این افراد جمع‌آوری و اندازه ضرایب زرنیک از این تصاویر استخراج شد. سپس از یک طبقه‌بند درخت تصمیم‌گیری برای طبقه‌بندی افراد در این چهار گروه استفاده و قواعدی برای کمک به تصمیم چشم‌پزشکان ارائه شد.

یافته‌ها: طبقه‌بندی ۴ گروه افراد مورد مطالعه با صحت ۹۹/۱۶ درصد انجام شد. قواعد به‌دست‌آمده جهت پیش‌بینی وضعیت افراد پس از جراحی رفراکتیو براساس confidence و support و تعداد ویژگی‌های موجود در بخش مقدم قواعد، مرتب شدند. برای گروه‌های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۴، ۱۷، ۲۳ و ۱۲ قاعده با confidence بالای ۷۰ درصد به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: ضرایب مرتبه بالای چندجمله‌ای زرنیک که از تصاویر توپوگرافی قبل از لیزیک استخراج شد، ویژگی‌های بسیار مناسبی برای پیش‌بینی وضعیت اکتازی بعد از جراحی بودند. استفاده از این ضرایب و طبقه‌بند درخت تصمیم‌گیری C5.0 منجر به تولید قواعدی با صحت بالا شد به‌طوری‌که علاوه بر معیارهای تشخیصی موجود، به چشم‌پزشکان در تصمیم‌گیری بهتر برای انجام جراحی لیزیک و پیشگیری از اکتازی قرنیه بعد از لیزیک کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: توپوگرافی، اکتازی پس از لیزیک، چندجمله‌ای زرنیک، درخت تصمیم‌گیری

۱. دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۳. کلینیک چشم پزشکی بصیر، تهران، ایران.
۴. دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران.

نویسنده مسئول: کیوان معقولی. تلفن: ۰۲۱۴۴۴۷۴۳۲۲
پست الکترونیک: k_maghooli@srbiu.ac.ir

مقدمه

اکتازی قرنیه عبارت است از شیب‌دار و نازک شدن پیش‌رونده قرنیه. اکتازی پس از لیزیک، نادر اما یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین موضوعات بالینی است که در میان جراحان رفرکتیو بسیار مورد بحث می‌باشد [۱-۴]. مشخص نمودن بیماری‌هایی که در خطر اکتازی پس از جراحی قرار دارند یک چالش اساسی است [۱]. آنالیزهای گذشته‌نگر، فاکتورهای مربوط به جراحی و بیمار را که با اکتازی پس از عمل ارتباط دارند، مشخص نموده‌اند. یکی از مهم‌ترین این فاکتورها جراحی رفرکتیو قرنیه در چشم‌هایی با کراتوکونوس آشکار نشده و یا دژنراسیون حاشیه‌ای شفاف^۱ است [۵]. مواردی نیز گزارش شده است که بیماران بدون هیچ فاکتور خطری دچار اکتازی پس از تصحیح بینایی با لیزر شده‌اند [۷و۶]. از طرف دیگر بیماری‌هایی با یک فاکتور خطر یا بیشتر بوده‌اند که پس از تصحیح بینایی دچار اکتازی نشده‌اند [۸]. همچنین آنالیز دادگان بزرگ توسط Binder موفق نشد ارتباط برخی فاکتورهای از قبل شناخته‌شده را به عنوان ریسک فاکتور نشان دهد [۹].

توپوگرافی قرنیه یکی از رایج‌ترین روش‌های تشخیص نامنظمی قرنیه است. توپوگرافی قرنیه که به عنوان ویدیو کراتوگرافی یا نقشه‌برداری قرنیه نیز شناخته می‌شود، یک پیشرفت مهم در اندازه‌گیری انحناء قرنیه محسوب می‌گردد. اکثر توپوگراف‌ها چیزی حدود ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ نقطه بر روی تمام سطح قرنیه را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. در این مقاله توپوگرافی قبل از عمل را برای چنین گروه‌هایی یعنی افرادی که دچار اکتازی پس از جراحی شده‌اند و افرادی که پس از عمل نرمال بوده‌اند، مقایسه می‌کنیم تا با استفاده از اندازه ضرایب زرنیک استخراج‌شده از تصاویر توپوگرافی قبل از عمل بتوانیم افرادی را که دچار اکتازی پس از عمل خواهند شد، پیش‌بینی کنیم.

روش بررسی

دادگان مورد استفاده در این مطالعه، نقشه محوری توپوگرافی قبل از عمل افرادی است که همگی تحت عمل تصحیح بینایی به روش لیزیک قرار گرفته‌اند. افراد مورد مطالعه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ به کلینیک تخصصی چشم پزشکی بصیر مراجعه کرده‌اند و قبل از جراحی، توپوگرافی قرنیه با استفاده از دستگاه EyeSys 2000 (EyeSys vision Inc., Houston, TX) از دستگاه لیزر اگزایمر Nidek EC-5000 (Nidek Inc., Japan) تحت عمل لیزیک قرار گرفتند. محدوده تصحیح ایجاد شده برای هر بیمار نیز به اندازه خطای رفرکتیو آن فرد بوده است. ما این افراد را به چهار گروه تقسیم‌بندی نمودیم:

۱. افرادی که قبل از عمل جراحی رفرکتیو، نرمال و بعد از آن دچار اکتازی قرنیه نشده‌اند. (۵۵ چشم از ۳۲ فرد)

۲. افرادی که قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس اما بعد از آن دچار

1. Pellucid Marginal Degeneration

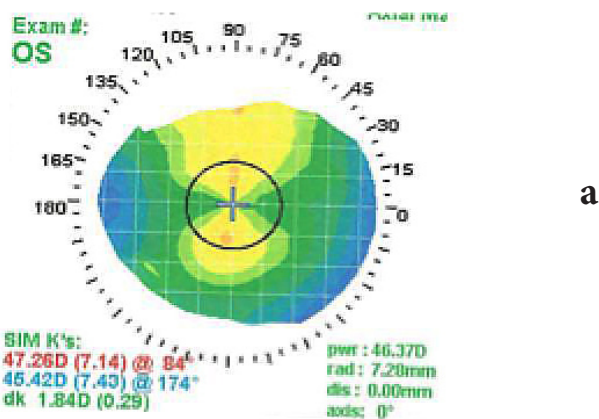
اکتازی نشده‌اند. (۲۴ چشم از ۱۶ نفر)

۳. افرادی که قبل از عمل نرمال و بعد از آن دچار اکتازی شده‌اند. (۲۳ چشم از ۱۲ نفر)

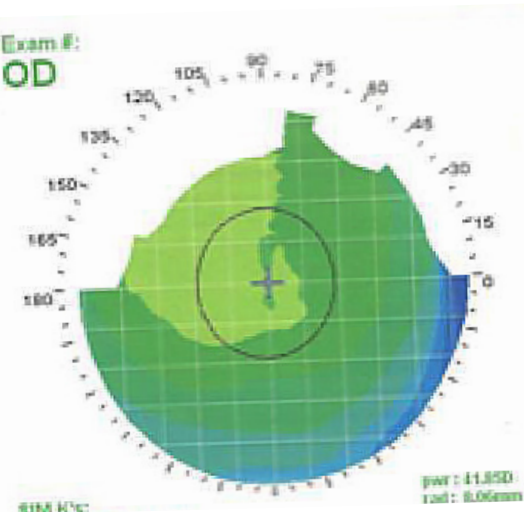
۴. افرادی که قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس و بعد از آن دچار اکتازی شده‌اند. (۱۷ چشم از ۹ نفر)

نمونه‌ای از تصاویر قبل از جراحی هر یک از ۴ گروه مذکور، در شکل ۱ قابل مشاهده است.

همان‌طور که می‌دانید توپوگرافی قرنیه یکی از رایج‌ترین روش‌های تشخیص نامنظمی‌های قرنیه است. با توجه به نامشخص بودن زمان آغاز و نحوه سیر قوز قرنیه، ممکن است فردی که در معاینات و توپوگرافی اولیه قرنیه فاقد علائم بیماری بوده و جراحی بدون عارضه‌ای را پشت سر گذاشته است، در هر زمانی علائم قوز قرنیه را بروز دهد [۱۱و۱۰]. به همین دلیل افراد هر ۴ گروه ذکر شده بین ۳-۶ سال مجدداً تحت معاینه قرار گرفتند و از آن‌ها توپوگرافی مجدد و همچنین ارباسکن گرفته شد و مشخص گردید که بعد از گذشت این مدت از جراحی، نرمال هستند یا دچار اکتازی قرنیه شده‌اند.



a



b

به‌عنوان یک ابزار تشخیصی با حساسیت و قطعیت بالا برای آشکار کردن کراتوکونوس تحت بالینی [۱۳] و تفکیک چشم‌های نرمال و کراتوکونوس استفاده شود [۱۶-۱۴]. از این‌رو در این مطالعه تنها از ضرایب زرنیک استخراج‌شده از تصاویر توپوگرافی به‌عنوان ویژگی برای تفکیک این ۴ گروه استفاده شده‌است. در مرحله بعد می‌بایست از یک کلاسه‌بند استفاده کرد تا بتوان هر چشم را با ویژگی‌های مذکور در گروه مربوطه به‌درستی طبقه‌بندی کرد. برای این هدف، دادگان به دو دسته آموزش و تست تقسیم می‌شوند. مدل با استفاده از دادگان آموزشی ایجاد و با استفاده از دادگان تست که آن‌ها را ندیده است ارزیابی می‌شود. بدین ترتیب صحت کلاسه‌بند به‌صورت نسبت تعداد داده‌ای که درست طبقه‌بندی شده‌اند به کل نمونه‌ها به‌دست می‌آید.

در مطالعه‌ای سطح قرنیه با چندجمله‌ای زرنیک مدل و از یک طبقه‌بند درخت تصمیم‌گیری به نام الگوریتم C4.5 برای تفکیک قرنیه‌های نرمال از کراتوکونوس استفاده شد که صحت گزارش‌شده ۹۲ درصد بوده‌است [۱۷]. ما نیز در مطالعه خود از درخت تصمیم‌گیری به‌عنوان روش طبقه‌بندی استفاده کردیم. الگوریتم به‌کاررفته در مطالعه ما، الگوریتم درخت تصمیم‌گیری C5.0 نام دارد که ورژن جدیدتری نسبت به روش C4.5 محسوب می‌شود. این الگوریتم را در بخش درخت تصمیم‌گیری با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌دهیم.

چندجمله‌ای زرنیک

زرنیک مجموعه‌ای از چندجمله‌ای‌های مختلط را ارائه می‌کند که مجموعه متعامد کاملی داخل دایره واحد تشکیل می‌دهند. برای تعریف چندجمله‌ای‌های زرنیک، ورژن‌های متعددی ارائه شده‌است. ما در اینجا از تعریف پیشنهادشده توسط استاندارد ANSI استفاده می‌کنیم [۱۸]. در این تعریف دایره واحد در مختصات قطبی (ρ, θ) بیان می‌شود که $0 \leq \rho \leq 1$ و $0 \leq \theta \leq 2\pi$ است. چندجمله‌ای زرنیک به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

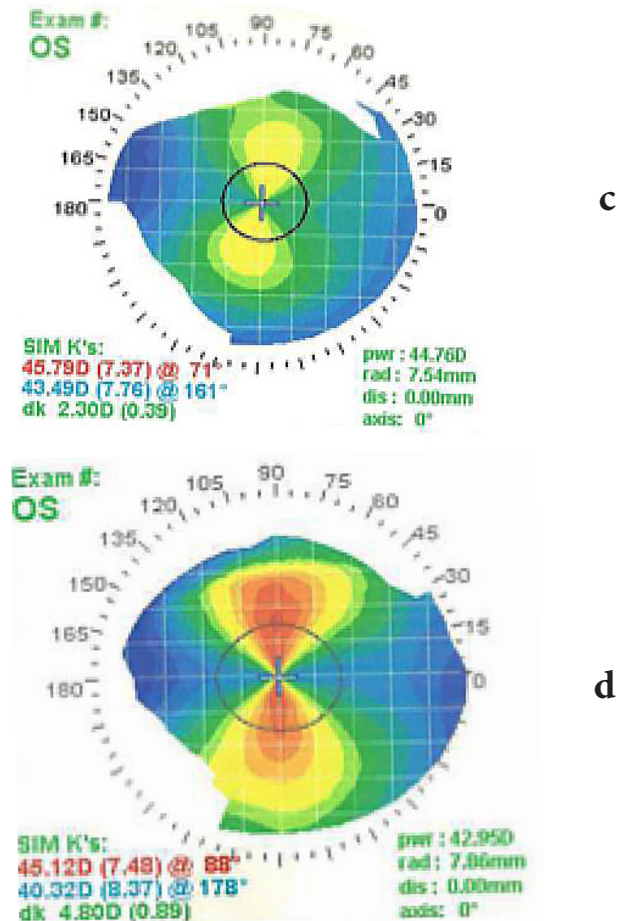
$$(1) \quad Z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos m\theta & \text{for } m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin m\theta & \text{for } m < 0 \end{cases}$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنید چندجمله‌ای دارای سه مؤلفه است: فاکتور نرمالیزاسیون، چندجمله‌ای شعاعی و مؤلفه سینوسی. n مرتبه چندجمله‌ای شعاعی و m فرکانس زاویه‌ای مؤلفه سینوسی است. n ، صفر یا عدد صحیح مثبت و m می‌تواند عددهای صحیح منفی و مثبت باشد با این شرط که $|m| \leq n$ و $n-|m|$ عددی زوج باشد.

فاکتور نرمالیزاسیون به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$(2) \quad N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}} \quad \delta_{m0} = 1 \text{ for } m = 0, \delta_{m0} = 0 \text{ for } m \neq 0$$

2. Subclinical keratoconus



شکل ۱: نمونه‌ای از تصاویر قبل از جراحی ۴ گروه:

- گروه a: (قبل از عمل، نرمال و بعد از آن دچار اکتازی قرنیه نشده‌است)
گروه b: (قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس اما بعد از آن دچار اکتازی نشده‌است)
گروه c: (قبل از عمل نرمال و بعد از آن دچار اکتازی شده‌است)
گروه d: (قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس و بعد از آن دچار اکتازی شده‌است).

معیارهای چشم‌پزشک در تشخیص قوز قرنیه در تصاویر توپوگرافی قبل و بعد از جراحی، اندیکس ویدئوکراتوگرافی Rabinowitz بوده است [۱۲] که شامل: انحنای قسمت مرکزی قرنیه (CK) بیش از ۴۷/۲ دیوپتر، میزان Inferior/Posterior (I-S value) بیش از ۱/۲ دیوپتر (عبارت است از اختلاف انحنای ۳ میلی‌متر فوقانی تحتانی از مرکز قرنیه)، آستیگماتیسم simk بیش از ۱/۵ دیوپتر، Skewed Radial Axes (SRAX) بیش از ۲۱ درجه (نمایه SRAX عبارت است از زاویه بین پرشیب‌ترین محور نیمه فوقانی و تحتانی قرنیه).

بعد از عمل نیز چشم‌پزشک با بررسی‌های مجدد مشخص نمود که کدام اشخاص به اکتازی قرنیه پس از لیزیک مبتلا شده‌اند و کدام اشخاص وضعیت نرمالی داشته‌اند. بدین ترتیب وضعیت قبل و بعد از عمل افراد تعیین گردید و چهار گروه مذکور ایجاد شد. چندجمله‌ای‌های زرنیک به‌دست‌آمده از اولین سطح قرنیه می‌تواند

که $z(\rho, \theta)$ ارتفاع سطح قرنیه در هر نقطه با مختصات ρ و θ است. $a_{n,m}$ یا ضرایب بسط، وزن‌های هریک از چندجمله‌ای‌های زرنیک هستند که اصطلاحاً ممان‌های زرنیک نیز نامیده می‌شوند. ممان‌های زرنیک برای تصویر با تابع تصویر $f(\rho, \theta)$ با فرمول زیر به دست خواهد آمد [۱۹]:

$$(6) \quad a_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(\rho, \theta) R_{nm}(\rho) e^{-jm\theta} \rho d\rho d\theta$$

در محاسبه زرنیک، مرکز تصویر در مرکز دایره قرار می‌گیرد و بقیه تصویر به داخل دایره نگاشت می‌شود و نقاطی که بیرون دایره می‌افتند در محاسبه وارد نمی‌شوند. همچنین توجه کنید که: $a_{n,m}^* = a_{n,-m}$. به این معنا که برای هر n ، ممان‌های m و $-m$ مزدوج مختلط یکدیگرند. بنابراین از لحاظ اندازه با هم برابرند.

برای دستیابی به ممان‌های زرنیک در تصاویر رنگی، دو رویکرد استفاده می‌شود. رویکرد اول، تصویر رنگی را به مقیاس خاکستری تبدیل می‌کند که این کار ممکن است منجر به از دست دادن برخی ویژگی‌های رنگی مهم شود. رویکرد دوم تصویر رنگی را به کانال‌های تشکیل‌دهنده آن تبدیل می‌کند. با این کار به‌ازای هر کانال تصویری خواهیم داشت و ممان‌ها

$R_n^{|m|}$ یا چندجمله‌ای شعاعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(3) \quad R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2}-s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2}-s\right)!} \rho^{n-2s}$$

توجه داشته باشید که برای این چندجمله‌ای‌ها رابطه زیر برقرار است [۱۹]:

$$(4) \quad R_n^{-m}(\rho) = R_n^m(\rho)$$

جدول ۱ فهرستی از چندجمله‌ای‌های زرنیک تا مرتبه ۴ و معانی هریک را در رابطه با ابیراهی اولیه نشان می‌دهد [۱۸].

Schwiegerling و همکاران [۲۰] روشی برای تجزیه و تحلیل و استخراج اطلاعات ارتفاع قرنیه ارائه دادند که در آن اطلاعات ارتفاع قرنیه به مجموعه متعامد چندجمله‌ای‌های زرنیک یعنی $\{Z_n^m(\rho, \theta)\}$ تجزیه می‌شود. درواقع، این تجزیه کردن، اطلاعات سطح قرنیه را از طریق ترکیب خطی چندجمله‌ای‌های زرنیک به صورت زیر تقریب می‌زند:

$$(5) \quad z(\rho, \theta) \cong \sum_{n,m} a_{n,m} Z_n^m(\rho, \theta)$$

جدول ۱: چندجمله‌ای‌های زرنیک (تا مرتبه ۴)

Order	Frequency	$Z_n^m(\rho, \theta)$	meaning
n	m		
0	0	1	Constant term or Piston
1	-1	$2\rho \sin(\theta)$	Tilt in y-direction, Distortion
1	1	$2\rho \cos(\theta)$	Tilt in x-direction, Distortion
2	-2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin(2\theta)$	Astigmatism with axis at $\pm 45^\circ$
2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Field curvature, Defocus
2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos(2\theta)$	Astigmatism with axis at 0° or 90°
3	-3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin(3\theta)$	
3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \sin(\theta)$	Coma along y-axis
3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \cos(\theta)$	Coma along x-axis
3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos(3\theta)$	
4	-4	$\sqrt{10}\rho^4 \sin(4\theta)$	
4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin(2\theta)$	Secondary Astigmatism
4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Spherical Aberration, Defocus
4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos(2\theta)$	Secondary Astigmatism
4	4	$\sqrt{10}\rho^4 \cos(4\theta)$	

N در رابطه بالا بیانگر تعداد پیکسل‌ها در امتداد هر محور از تصویر است. در نهایت، رابطه بین ممان‌های زرنیک چهارگانه و ممان‌های زرنیک متعارف را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$a_{n,m}(f) = b_{n,m} + ic_{n,m} + jd_{n,m} + kf_{n,m}$$

که:

$$(14) \quad b_{n,m} = \frac{-1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im}(a_{n,m}(f_R)) + \operatorname{Im}(a_{n,m}(f_G)) + \operatorname{Im}(a_{n,m}(f_B)) \right]$$

$$(15) \quad c_{n,m} = \operatorname{Re}(a_{n,m}(f_R)) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im}(a_{n,m}(f_G)) - \operatorname{Im}(a_{n,m}(f_B)) \right]$$

$$(16) \quad d_{n,m} = \operatorname{Re}(a_{n,m}(f_G)) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im}(a_{n,m}(f_B)) - \operatorname{Im}(a_{n,m}(f_R)) \right]$$

$$(17) \quad f_{n,m} = \operatorname{Re}(a_{n,m}(f_B)) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im}(a_{n,m}(f_R)) - \operatorname{Im}(a_{n,m}(f_G)) \right]$$

$a_{n,m}(f_R)$ ، $a_{n,m}(f_G)$ و $a_{n,m}(f_B)$ به ترتیب ممان‌های زرنیک متعارف کانال قرمز، سبز و آبی هستند. $\operatorname{Re}(x)$ قسمت حقیقی و $\operatorname{Im}(x)$ قسمت موهومی عدد مختلط x هستند.

بنابراین با توجه به روابط ذکر شده می‌توان به ازای مرتبه‌های مختلف چندجمله‌ای زرنیک، ممان‌ها را از تصاویر رنگی استخراج کرد. بدین ترتیب این اطمینان وجود خواهد داشت که از حداکثر دانش موجود در تصاویر توپوگرافی رنگی استفاده شده است. در ضمن این ممان‌ها به صورت اعداد مختلط هستند که با توجه به رابطه ۱۰ می‌توان اندازه آن‌ها را محاسبه کرد. از آنجاکه در هر مرتبه از چندجمله‌ای، ضرایب m و $-m$ مزدج مختلط هستند و با توجه به اینکه اندازه دو عدد که مزدج مختلط یکدیگرند، با هم برابر است، می‌توان تنها به محاسبه ضرایب مثبت پرداخت.

درخت تصمیم‌گیری

درخت‌های تصمیم‌گیری یکی از ابزارهای قوی و متداول برای دسته‌بندی و پیش‌بینی است. این روش بخصوص زمانی که تعاملات پیچیده‌ای بین ویژگی‌ها وجود دارد که با متدهای مدل‌سازی آماری سنتی قابل جوابگویی نیست، مفید است [۱۷]. درخت تصمیم‌گیری پیش‌بینی خود را در قالب یک سری قوانین اگر/آنگاه توضیح می‌دهد. یکی از خصوصیات این روش فهم آسان مدل ایجاد شده توسط آن است. به عبارتی با اینکه ممکن است الگوریتم‌هایی که درخت را ایجاد می‌کنند چندان ساده نباشند ولی فهمیدن نتایج آن آسان است.

کلاسه‌بندی داده‌ها با درختان تصمیم‌گیری طی یک فرآیند دومارحله‌ای انجام می‌شود. در مرحله اول که به آن مرحله آموزش گفته می‌شود، مدل براساس یک الگوریتم کلاسه‌بندی با استفاده از مجموعه آموزشی ساخته می‌شود. مجموعه آموزشی به صورت تصادفی از پایگاه داده انتخاب می‌شود. در مرحله دوم، یادگیری از طریق یک تابع انجام می‌شود که می‌تواند برچسب هر داده از پایگاه داده را پیش‌بینی کند. این داده‌ها قبلاً توسط مدل دیده نشده‌اند و برای ارزیابی عملکرد مدل از آن‌ها استفاده می‌شود. با مقایسه برچسب واقعی داده‌ها و برچسب‌هایی که مدل برای

به طور جداگانه از تصاویر مربوط به هر کانال به دست می‌آیند [۲۱-۳].

در مطالعه‌ای روشی تحت عنوان ممان‌های زرنیک چهارگانه [۲۴] برای استخراج ممان‌های زرنیک از تصاویر رنگی ارائه شده است که در آن، این ممان‌ها از طریق ممان‌های زرنیک سنتی از هر کانال تصویر به دست می‌آیند و نتایج به دست آمده کارایی بیشتری نسبت به دیگر توصیف‌گرها را گزارش می‌دهد. از این رو ما در مطالعه خود از ممان‌های زرنیک چهارگانه استفاده کرده‌ایم.

فرض کنید $f(x,y)$ یک تصویر در فضای رنگی RGB باشد. این تصویر می‌تواند به سه کانال قرمز، سبز و آبی به صورت زیر تجزیه شود [۲۴]:

$$(7) \quad f(x,y) = f_R(x,y)i + f_G(x,y)j + f_B(x,y)k$$

Quaternion، تعمیم اعداد مختلط است که می‌تواند به صورت یک عدد مختلط چهاربعدی با یک قسمت حقیقی و سه قسمت موهومی نشان داده شود:

$$(8) \quad q = a + bi + cj + dk$$

که a و b اعداد حقیقی و i و j و k سه قسمت موهومی طبق قوانین زیر هستند:

$$(9) \quad \begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 &= -1 \\ ij = -ji = k, \quad jk &= -kj = i, \quad ki = -ik = j \end{aligned}$$

اندازه یک quaternion از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(10) \quad |q| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}$$

بر اساس تعاریفی که از ممان‌های زرنیک برای تصاویر مقیاس خاکستری ارائه شد، ممان‌های زرنیک چهارگانه از مرتبه n با تکرار m از تصویر رنگی $f(\rho, \theta)$ به صورت زیر ارائه می‌شود [۲۴]:

$$(11) \quad a_{n,m}(f) = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(\rho, \theta) R_{nm}(\rho) e^{-\mu m \theta} \rho d\rho d\theta$$

$|m| \leq n$ و $n - |m|$ می‌بایست زوج باشد.

μ هم به صورت $\pi = (i + j + k) / \sqrt{3}$ انتخاب می‌شود [۲۴].

در حالت گسسته برای یک تصویر دیجیتالی رابطه ممان زرنیک چهارگانه به صورت زیر خواهد بود:

$$(12) \quad a_{n,m}(f) = \frac{n+1}{\pi(N-1)^2} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N R_{nm}(\rho) f(x,y) e^{-\mu m \theta}$$

قوانین یکسان باشد، براساس تعداد ویژگی‌های موجود در مقدم قواعد، مرتب می‌شوند.

تجزیه و تحلیل داده

از نرم‌افزار *MATLAB (ver. 7.9.0.529; The MathWorks, Inc., Natick, MA)* [۲۷] جهت استخراج اندازه ضرایب زرنیک و از *SPSS Clementine (ver. 11.1; SPSS Inc. Chicago, IL)* [۲۸] برای پیاده‌سازی الگوریتم درخت تصمیم‌گیری C5.0 استفاده شد. الگوریتم درخت تصمیم‌گیری C5.0 به همراه رویکرد تقویت بر روی دادگان اعمال شد. جهت هرس کردن درخت نیز از تنظیمات پیش‌فرض نرم‌افزار استفاده شد که یک هرس کلی^۳ انجام می‌دهد.

جهت تقسیم دادگان به دو دسته آموزشی و تست، از تکنیک اعتبارسنجی 10-fold^۹ استفاده شد. در این روش، کل دادگان به دسته‌هایی ۱۰ تایی تقسیم می‌شوند و هربار یکی از این دسته‌ها به عنوان داده تست و بقیه به عنوان داده آموزشی به کلاسه‌بند داده می‌شود. این کار تازمانی که هر کدام از دسته‌های ۱۰ تایی یکبار به عنوان تست به طبقه‌بند داده شوند، تکرار^{۱۰} می‌شود. صحت طبقه‌بندی درخت تصمیم‌گیری ایجاد شده با تقسیم کل تعداد طبقه‌بندی‌های ناصحیح در ۱۰ بار تکرار، بر کل تعداد نمونه‌ها در مجموعه دادگان به دست می‌آید. این رویکرد بخصوص زمانی که تعداد داده‌های دردسترس کم است، منجر به استفاده مؤثرتری از آن‌ها می‌شود و تخمین پایداری از نرخ خطا ارائه می‌دهد زیرا طبقه‌بند طراحی شده در هر تکرار با داده‌هایی که آن‌ها را ندیده است، تست می‌شود [۲۹ و ۳۰].

یافته‌ها

چشم‌های بررسی شده در این مطالعه به ۴ گروه زیر تقسیم شده‌اند:

a - قبل از عمل نرمال و بعد از آن علائمی از اکتازی مشاهده نشده‌است.

b - قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس و بعد از آن علائمی از اکتازی مشاهده نشده‌است.

c - قبل از عمل نرمال و بعد از آن دچار اکتازی شده‌اند.

d - قبل از عمل مشکوک و بعد از آن دچار اکتازی شده‌اند.

اندازه ضرایب زرنیک از مرتبه ۱۹ از تصاویر توپوگرافی قبل از عمل چشم مورد مطالعه استخراج شد. به ازای هر نمونه، ۱۱۰ ویژگی به دست آمد که دو ضریب مرتبه پایین ۰,۰ و ۱,۱ از مجموعه ویژگی‌ها حذف شدند. بنابراین نمونه‌ها با ۱۰۸ ویژگی با روش اعتبارسنجی 10-fold هربار به نمونه‌های آموزشی و تست تقسیم شدند و در نهایت به صحت ۹۹/۱۶ درصد برای درخت تصمیم‌گیری ایجاد شده دست یافتیم.

آن‌ها پیش‌بینی کرده است، می‌توان صحت مدل را محاسبه کرد.

مرحله یادگیری، خود طی دو گام اساسی رشد و هرس انجام می‌شود. منظور از هرس کردن عملیاتی است که درخت تصمیم‌گیری برای افزایش دقت و کم کردن پیچیدگی خود استفاده می‌کند. درواقع، درخت تصمیم‌گیری هر شاخه از درخت را آن قدر به عمق می‌برد که بتواند به طور کامل نمونه‌های آموزشی را طبقه‌بندی کند. این امر می‌تواند منجر به تطبیق بیش از حد^۳ شود. برای پرهیز از تطبیق بیش از حد می‌توانیم از رشد درخت قبل از رسیدن به مرحله‌ای که به طور کامل مثال‌های آموزشی را طبقه‌بندی کند، جلوگیری کنیم یا اینکه به درخت اجازه رشد کامل دهیم و سپس شاخه‌هایی که مفید نیستند را هرس کنیم. در عمل، روش دوم بیشتر استفاده شده است زیرا تخمین اندازه صحیح درخت کار آسانی نیست. در طول فرآیند آموزش، الگوریتم درخت تصمیم می‌بایست به صورت مکرر مؤثرترین روش جهت تقسیم کردن دادگان را بیابد. مرحله هرس برای جلوگیری از پردازش بیش از حد صورت می‌گیرد. اگر درخت هرس شده بهتر از درخت اصلی عمل کند، تغییرات ذخیره می‌شود.

الگوریتم C5.0 یکی از الگوریتم‌های درخت تصمیم‌گیری می‌باشد که در این مقاله از آن به منظور کشف دانش و قوانین با کیفیت استفاده شده است. این الگوریتم بهبود یافته الگوریتم C4.5 است که توسط محقق استرالیایی Ross Quinlan در سال ۱۹۹۳ طراحی شد [۲۵]. در C5.0 تقسیم کردن نمونه‌ها براساس فیلدی که بیشترین بهره اطلاعات را دارد، صورت می‌گیرد. شدت هرس شدن درخت را نیز می‌توان تنظیم نمود. با افزایش آن درختی کوچک‌تر و مختصرتر خواهیم داشت و با کاهش آن درختی دقیق‌تر ایجاد خواهد شد.

الگوریتم C5.0 روشی برای افزایش دقت خود دارد که به آن تقویت^۴ گفته می‌شود. این روش بر پایه ساختن ترتیبی از چندین مدل کار می‌کند. اولین مدل در این روش به طور معمولی ساخته می‌شود. سپس مدل دوم، براساس نمونه‌هایی که در مدل اول به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند، ساخته می‌شود. سپس مدل سوم براساس خطاهای مدل دوم ساخته می‌شود و این روش ادامه می‌یابد. در نهایت، براساس روند رأی‌گیری وزن‌دهی شده مدل اصلی از ترکیب تمام مدل‌ها ساخته می‌شود.

با اجرای الگوریتم C5.0، قوانینی به شکل اگر/آنگاه حاصل می‌شود که دانش نهفته در داده‌ها را منعکس می‌کند. می‌توان با روش‌هایی که از مکانیزم‌های امتیازبندی استفاده می‌کنند، این قوانین را مرتب کرد. از جمله مهم‌ترین این رویکردها، روش اطمینان و حمایت و تعداد مقدم (CSA)^۵ است [۲۶]. در این روش، ابتدا قوانین براساس میزان اطمینان^۶ به شکل نزولی مرتب می‌شوند سپس قوانینی که اطمینان یکسانی دارند براساس میزان حمایت^۷ مرتب می‌شوند و اگر میزان حمایت تعدادی از

3. Overfitting
4. Boosting

5. Confidence Support and size of Antecedent
6. Confidence

7. Support
8. Global

9. 10-fold cross validation
10. Iteration

تنها یکی از نمونه‌ها که به گروه d تعلق داشت به‌طور اشتباه در گروه a طبقه‌بندی شد. قوانین اگر/آنگاه استخراج‌شده برای کلاس‌های a تا d به‌ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۴ قابل مشاهده هستند. این قوانین براساس میزان اطمینان، حمایت و تعداد ویژگی‌های مقدم مرتب شده‌اند. برای کلاس a، ۱۳ کلاس b، ۲۷ کلاس c، ۴۵ و برای کلاس d، ۳۴ قانون ایجاد شد. برای هر کلاس قوانینی که confidence بالای ۷۰ درصد داشتند به‌ترتیب آورده شده‌اند. با استفاده از این قوانین می‌توان از روی توپوگرافی قبل از عمل افراد پیش‌بینی کنیم که آیا فرد بعد از تصحیح بینایی با لیزر، نرمال یا دچار اکتازی خواهد شد؟

برای کلاس a، ۴ قانون استخراج شد. در صورتی که فرد براساس معیارهای موجود در توپوگرافی، قبل از عمل نرمال تشخیص داده‌شود و اندازه ضرایب زرنیک مطابق پیش‌شرط‌های این قوانین باشد، می‌توان پیش‌بینی کرد که

فرد بعد از عمل نیز نرمال خواهد بود.

برای کلاس b، ۱۷ قانون به‌دست آمد. در صورتی که فرد مطابق معیارهای تشخیصی موجود در توپوگرافی مشکوک به کراتوکونوس باشد و پیش‌شرط‌های موجود در قوانین مربوط به این کلاس نیز در مورد آن صدق کند، می‌توان پیش‌بینی کرد که بعد از عمل دچار اکتازی نخواهد شد.

برای کلاس c و d هم به‌ترتیب ۲۳ و ۱۲ قانون استخراج شد که برای این دو گروه نیز می‌توان وضعیت بعد از عمل را پیش‌بینی کرد. برای این دو گروه در صورتی که پیش‌شرط‌ها برقرار باشند، اکتازی پس از جراحی پیش‌بینی می‌شود. یعنی فرد با توجه به معیارهای توپوگرافی نرمال است اما بعد از عمل به اکتازی دچار خواهد شد (کلاس c) یا مشکوک به کراتوکونوس است و بعد از عمل دچار اکتازی می‌شود (کلاس d).

جدول ۲: قواعد استخراج‌شده از درخت تصمیم‌گیری C_{5.0} برای کلاس a

NO.	Confidence	Support	Size-of-Antecedent	Rule (for a class)
1	0.889	7	2	If $a_{12,10} \leq 182.531$ and $a_{7,5} \leq 231.483$ then a
2	0.867	8.385	2	If $a_{13,9} > 517.517$ and $a_{8,2} > 696.562$ then a
3	0.728	51.578	8	If $a_{10,10} > 45.755$ and $160.178 < a_{11,5} \leq 1156.556$ and $a_{14,8} > 148.123$ and $a_{16,8} > 167.183$ and $a_{17,15} > 68.377$ and $a_{4,4} \leq 920.924$ and $a_{5,1} > 1984.444$ and $a_{9,7} \leq 624.477$ then a
4	0.727	3.504	3	If $a_{10,4} \leq 1538.354$ and $a_{11,9} > 237.928$ and $a_{16,16} \leq 120.024$ then a

$a_{n,m}$ means the nth order of Zernike's coefficient with a frequency of m. The resulted numbers in each rule are relevant to the magnitude of Zernike's coefficients

جدول ۳: قواعد استخراج‌شده از درخت تصمیم‌گیری C_{5.0} برای کلاس b

NO	Confidence	Support	Size-of-Antecedent	Rule (for b class)
1	0.933	13	10	If $a_{11,11} > 67.326$ and $a_{13,11} \leq 376.698$ and $a_{13,5} \leq 801.592$ and $a_{14,0} > 419.258$ and $a_{14,8} > 148.123$ and $a_{15,5} > 312.777$ and $a_{18,16} > 122.297$ and $a_{18,8} \leq 446.163$ and $a_{2,0} > 5579.273$ and $a_{7,5} > 231.483$ then b

2	0.836	20.722	9	If $a_{12,12} > 78.977$ and $148.123 < a_{14,8} \leq 694.721$ and $a_{15,1} \leq 1200.798$ and $a_{16,0} > 297.147$ and $a_{16,6} > 221.363$ and $a_{18,16} \leq 311.170$ and $a_{19,5} \leq 893.973$ and $a_{2,0} > 5579.273$ and $a_{8,0} > 1294.696$ then b
3	0.822	17.462	11	If $a_{12,0} > 265.732$ and $a_{14,8} > 148.123$ and $a_{15,1} \leq 1528.565$ and $a_{16,0} > 283.473$ and $a_{17,1} \leq 1345.239$ and $a_{17,7} \leq 634.718$ and $a_{18,16} > 132.822$ and $a_{18,8} > 179.895$ and $a_{2,0} > 5579.273$ and $a_{8,0} > 1294.696$ and $a_{9,7} \leq 624.477$ then b
4	0.82	6.536	2	If $a_{11,9} \leq 237.928$ and $a_{16,16} \leq 120.024$ then b
5	0.8	3	2	If $a_{12,4} > 1029.723$ and $a_{2,0} \leq 5579.273$ then b
6	0.795	21.905	11	If $a_{10,2} \leq 2328.694$ and $a_{11,5} > 121.749$ and $a_{13,5} \leq 801.592$ and $a_{13,9} \leq 517.517$ and $a_{18,16} > 107.766$ and $a_{19,1} \leq 689.828$ and $a_{19,5} \leq 893.973$ and $a_{2,0} > 5579.273$ and $a_{2,2} > 1139.025$ and $A_{8,2} > 696.562$ and $A_{8,4} \leq 1185.278$ then b
7	0.793	8.082	4	If $a_{12,0} > 227.249$ and $77.300 < a_{17,17} \leq 107.384$ and $a_{17,7} \leq 634.718$ and $a_{19,11} \leq 420.399$ then b
8	0.793	3.046	2	If $a_{15,11} > 506.423$ and $a_{16,16} > 120.024$ then b
9	0.786	4.364	3	If $a_{10,4} > 1241.757$ and $a_{12,2} > 869.825$ and $a_{14,8} \leq 694.721$ then b
10	0.781	9.517	2	If $a_{16,16} \leq 120.024$ and $a_{5,1} \leq 3012.803$ then b
11	0.778	5.716	4	If $a_{11,3} > 433.970$ and $a_{12,2} > 869.825$ and $a_{2,0} > 5579.273$ and $a_{9,7} > 434.096$ then b
12	0.775	14.782	2	If $a_{17,15} \leq 68.377$ and $a_{19,17} > 118.737$ then b

13	0.754	32.499	10	If $a_{10,0} > 270.266$ and $A_{10,2} \leq 2328.694$ and $A_{13,11} > 76.359$ and $A_{14,4} \leq 1215.423$ and $A_{14,8} \leq 600.571$ and $A_{15,7} > 148.307$ and $A_{17,17} > 39.351$ and $A_{19,5} \leq 924.119$ and $5579.273 < A_{2,0} \leq 7399.185$ and $A_{4,4} \leq 719.414$ then b
14	0.738	7.489	3	If $a_{12,0} > 1070875$ and $a_{17,13} \leq 170.204$ and $a_{17,17} > 77.300$ then b
15	0.737	4.788	3	If $a_{16,2} > 1275.035$ and $a_{17,13} \leq 170.204$ and $a_{17,17} > 77.300$ then b
16	0.713	3.613	3	If $a_{14,8} \leq 694.721$ and $a_{16,10} \leq 587.406$ and $a_{19,13} > 413.846$ then b
17	0.703	3.691	3	If $a_{14,6} > 805.170$ and $a_{15,1} \leq 1176.904$ and $a_{2,0} \leq 6356.373$ then b

جدول ۴: قواعد استخراج شده از درخت تصمیم‌گیری C5.0 برای کلاس c

N O.	Confidence	Support	size -of- Antecedent	Rule(for c class)
1	0.838	12.328	4	If $a_{15,1} > 1176.904$ and $a_{16,16} > 120.024$ and $a_{17,3} > 346.691$ and $a_{4,0} \leq 4867.102$ then c
2	0.829	4.028	3	If $a_{10,10} \leq 45.755$ and $a_{17,15} > 68.377$ and $a_{4,0} \leq 5641.055$ then c
3	0.808	20.266	9	If $636.129 < a_{10,2} \leq 2042.288$ and $a_{12,2} \leq 869.825$ and $a_{14,4} \leq 1492.671$ and $a_{16,16} > 120.024$ and $a_{19,13} \leq 413.846$ and $a_{2,0} > 5040.514$ and $a_{5,1} \leq 2676.428$ and $a_{5,3} \leq 1658.563$ and $a_{6,6} > 111.730$ then c
4	0.8	3	3	If $a_{11,11} \leq 67.326$ and $a_{19,1} \leq 892.163$ and $a_{2,0} > 5579.273$ then c
5	0.8	3	2	If $a_{14,0} \leq 419.258$ and $a_{2,0} > 7884.573$ then c
6	0.788	3.075	1	If $a_{16,10} > 587.406$ then c
7	0.783	6.939	3	If $a_{12,0} \leq 265.732$ and $a_{17,17} \leq 247.956$ and $a_{5,1} \leq 2502.566$ then c
8	0.783	5.662	3	If $a_{15,1} > 1528.565$ and $a_{17,17} \leq 247.956$ and $a_{8,0} \leq 3203.461$ then c

9	0.771	4.481	4	If $a_{13,13} > 133.330$ and $a_{17,7} > 634.718$ and $a_{19,13} \leq 413.846$ and $a_{2,0} > 5579.273$ then c
10	0.756	3.294	4	If $a_{12,0} \leq 227.249$ and $a_{16,6} \leq 1239.477$ and $a_{17,17} > 77.300$ and $a_{2,0} > 5579.273$ then c
11	0.75	6	2	If $a_{11,11} > 67.326$ and $a_{14,8} \leq 148.123$ then c
12	0.75	4.668	3	If $a_{10,10} > 45.755$ and $a_{14,8} \leq 148.123$ and $a_{4,0} \leq 5641.055$ then c
13	0.75	2	1	If $a_{7,7} > 467.786$ then c
14	0.749	3.338	3	If $a_{11,11} \leq 67.326$ and $a_{15,1} \leq 1528.565$ and $a_{2,0} > 5579.273$ then c
15	0.747	8.708	4	If $a_{11,11} \leq 167.998$ and $a_{14,8} > 148.123$ and $a_{15,1} > 1200.798$ and $a_{4,0} \leq 5641.055$ then c
16	0.738	4.772	2	If $a_{14,8} \leq 148.123$ and $a_{15,1} \leq 1176.904$ then c
17	0.728	3.491	4	If $a_{12,1} > 869.825$ and $a_{14,0} > 446.942$ and $a_{18,2} \leq 1295.534$ and $a_{19,11} \leq 120.204$ then c
18	0.727	6.251	2	If $a_{12,12} \leq 78.977$ and $a_{2,0} > 5579.273$ then c
19	0.721	9.093	5	If $a_{11,5} > 160.178$ and $a_{16,8} > 167.183$ and $a_{17,15} > 68.377$ and $a_{3,3} \leq 621.940$ and $a_{5,1} \leq 1984.444$ then c
20	0.716	4.983	2	If $a_{14,14} > 204.789$ and $a_{14,8} \leq 694.721$ then c
21	0.714	3.601	3	If $a_{14,8} \leq 694.721$ and $a_{18,12} > 119.817$ and $a_{4,4} > 920.924$ then c
22	0.71	6.452	3	If $a_{17,17} \leq 39.351$ and $a_{2,0} > 4533.102$ and $a_{4,0} \leq 5641.055$ then c
23	0.704	10.783	4	If $a_{10,4} \leq 935.406$ and $a_{17,17} \leq 77.300$ and $a_{19,11} \leq 420.399$ and $a_{2,0} > 5579.273$ then c

جدول ۵: قواعد استخراج شده از درخت تصمیم گیری C5.۰ برای کلاس d

N O.	Confidence	Support	size -of- Antecedent	Rule(for c class)
1	0.838	12.328	4	If $a_{15,1} > 1176.904$ and $a_{16,16} > 120.024$ and $a_{17,3} > 346.691$ and $a_{4,0} \leq 4867.102$ then c
2	0.829	4.028	3	If $a_{10,10} \leq 45.755$ and $a_{17,15} > 68.377$ and $a_{4,0} \leq 5641.055$ then c

3	0.801	7.986	5	If $a_{13,13} \leq 171.642$ and $a_{15,1} \leq 1528.565$ and $a_{2,0} \leq 5579.273$ and $a_{5,5} \leq 560.904$ and $a_{8,4} \leq 1280.293$ then d
4	0.8	13	3	If $a_{12,4} \leq 1029.723$ and $a_{2,0} \leq 5579.273$ and $a_{7,7} \leq 467.786$ then d
5	0.792	11.893	3	If $a_{12,4} \leq 1029.723$ and $a_{13,9} \leq 517.517$ and $a_{2,0} \leq 5579.273$ then d
6	0.758	3.276	2	If $a_{15,1} \leq 697.056$ and $a_{18,16} > 311.170$ then d
7	0.75	2	2	If $a_{11,11} \leq 67.326$ and $a_{19,1} > 892.163$ then d
8	0.739	2.062	2	If $a_{15,1} > 1176.904$ and $a_{4,0} > 4867.102$ then d
9	0.72	3.557	2	If $a_{14,4} > 1215.423$ and $a_{16,12} > 302.042$ then d
10	0.709	2.229	2	If $a_{15,1} > 1528.565$ and $a_{8,0} > 3203.461$ then d
11	0.707	3.655	2	If $a_{10,4} > 1538.354$ and $a_{12,4} \leq 933.827$ then d
12	0.704	9.357	5	If $a_{15,1} \leq 1528.565$ and $a_{17,17} \leq 247.956$ and $a_{19,13} \leq 413.846$ and $a_{2,0} \leq 5579.273$ and $a_{4,4} \leq 920.924$ then d

بحث و نتیجه‌گیری

توپوگرافی مشکوک است. مطالعاتی گزارش داده‌اند که تغییرات سطح خلفی قرنیه می‌تواند کلیدی جهت تشخیص زود هنگام اکتازی پس از جراحی‌های انکساری قرنیه باشد [۳۳] اما زمان جراحی چشم‌های موجود در این مطالعه، دستگاه‌های تشخیصی دقیق‌تری مانند ارباسکن و پنتاکم موجود نبوده است. Klyce و Rabinowitz و همکاران معیارهای ارزیابی برپایه توپوگرافی را مشخص کرده‌اند. این معیارها کمک‌کننده هستند اما، مشخصاً برای ارزیابی توپوگرافی کافی نیستند. هیچ معیار توپوگرافی یک شاخص کاملاً قابل اطمینان برای خطر اکتازی محسوب نمی‌شود. جالب است که بیمارانی وجود دارند که توپوگرافی اولیه آن‌ها نرمال است اما، با یا بدون جراحی لیزر قرنیه دچار اکتازی قرنیه می‌شوند [۱]. بنابراین، مطالعه حاضر انجام شد تا معیارهای دیگری از تصاویر توپوگرافی قبل از عمل افرادی که بدون فاکتور خطر دچار اکتازی شده‌بودند یا افرادی که با وجود چند فاکتور خطر دچار اکتازی نشده‌بودند، استخراج شود. این معیارها همان ضرایب زرنیک هستند. ما با استفاده از اندازه ضرایب زرنیک توانستیم با صحت بالایی ابتلاء یا عدم ابتلاء فرد به اکتازی پس از عمل را پیش‌بینی کنیم.

اندازه ضرایب زرنیک با روش ممان‌های زرنیک چهارگانه [۲۴] از تصاویر

با رواج یافتن جراحی‌های کراتورفکتیو در سال‌های اخیر و به‌ویژه عارضه‌دار شدن این جراحی‌ها در افراد مبتلا به کراتوکونوس (حتی در مواردی که دارای شکل‌های بسیار خفیف و ثابت بیماری بوده‌اند)، اهمیت تشخیص به‌موقع و پیش از اینگونه جراحی‌ها را در این افراد دوچندان می‌کند [۳۱ و ۳۲]. یکی از عوارض بسیار مهم بعد از جراحی‌های انکساری، اکتازی قرنیه است که می‌تواند همراه با برگشت عیب انکساری اصلاح‌شده، آستیگماتیسم نامنظم و نازک‌شدگی قرنیه باشد و ممکن است در مواردی جهت بازبازی بینایی نیاز به پیوند قرنیه روشی گریزناپذیر باشد [۳۳]. مشخص نمودن بیمارانی که در خطر اکتازی پس از عمل قرار دارند یک چالش اساسی است و هنوز هم در حال بحث و بررسی است [۱]. در مطالعات، مواردی گزارش شده‌اند که بیماران بدون هیچ فاکتور خطری دچار اکتازی پس از تصحیح بینایی با لیزر شده‌اند [۶ و ۷] و بیمارانی هم با یک یا چند فاکتور خطر بوده‌اند که پس از جراحی دچار اکتازی نشده‌اند [۸]. اگرچه لیزیک و تراش سطح هردو بافت قرنیه را با لیزر اگزایمر برمی‌دارند اما، بیشتر موارد گزارش شده‌است اکتازی پس از لیزیک بوده است [۱]. در این مطالعه نیز افراد تحت عمل لیزیک قرار گرفته بودند. یکی از شایع‌ترین فاکتورهای خطری که درباره آن‌ها بحث می‌شود،

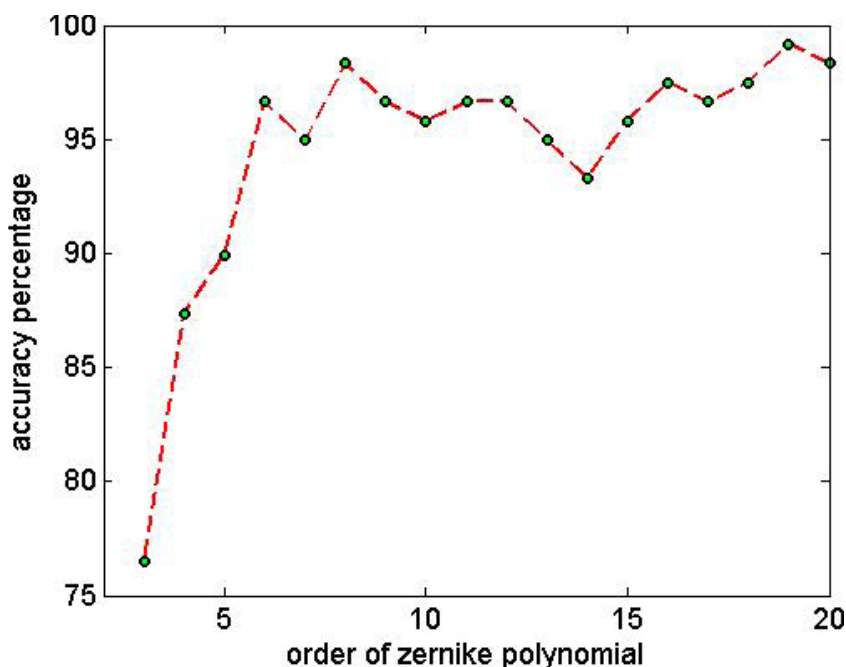
حاصل از درخت تصمیم‌گیری C5.0 را براساس میزان اطمینان، حمایت و تعداد ویژگی‌های موجود در قسمت مقدم آن‌ها مرتب کردیم تا بهترین قوانین برای هر کلاس ارائه شود.

باتوجه به صحت بالای به‌دست‌آمده در تفکیک ۴ گروه مورد مطالعه، مشخص می‌شود که اندازه ضرایب زرنیک استخراج‌شده از تصاویر توپوگرافی، پتانسیل بالایی برای پیش‌بینی ابتلاء یا عدم ابتلاء فرد به اکتازی پس از جراحی انکساری لیزیک دارد. قوانین ارائه‌شده با میزان اطمینان و حمایت بالا می‌توانند به چشم‌پزشک برای تشخیص دقیق‌تر و جلوگیری از ایجاد عارضه مهم اکتازی پس از جراحی در کنار معیارهای تشخیصی موجود کمک کنند.

پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی علاوه بر ضرایب زرنیک به‌دست‌آمده از نقشه توپوگرافی، از دیگر فاکتورهای دخیل در تشخیص اکتازی قرنیه مانند معیارهایی که توپوگرافی در اختیار چشم‌پزشک قرار می‌دهد، استفاده شود و سیستم کامل‌تری را برای پیش‌بینی وضعیت افراد پس از عمل طراحی نمود.

رنگی توپوگرافی استخراج شد به‌گونه‌ای که اطلاعات رنگی موجود در تصاویر نیز حفظ شود. در مطالعاتی که از ضرایب زرنیک برای تمایز چشم‌های نرمال و کراتوکونوس استفاده شده است، مرتبه چندجمله‌ای حداکثر تا ۱۰ انتخاب شده است [۱۷ و ۱۴]. اما از آنجاکه در چشم‌هایی که دارای آستیگماتیسم نامنظم قابل توجهی هستند بیراهه‌های مرتبه بالا درصد بزرگی از اعوجاجات چشم را تشکیل می‌دهند [۳۴]، در این مطالعه ضرایب مرتبه بالاتر زرنیک تا مرتبه ۱۹ استخراج شدند. بدین ترتیب از ویژگی‌های بیشتر و درجات بالاتری از زرنیک که اعوجاجات مرتبه بالاتر و پیچیده‌تری را نشان می‌دهند، استفاده شد. در شکل ۲، صحت طبقه‌بند به‌ازای مرتبه‌های مختلف چندجمله‌ای زرنیک رسم شده است. بیشترین صحت کلاسه‌بند با استفاده از ضرایب زرنیک مرتبه ۱۹ حاصل شد.

دادگان با تکنیک اعتبارسنجی 10-fold به دو دسته آموزش و تست تقسیم شدند تا طبقه‌بند با استفاده از دادگان آموزشی، تعلیم یابد و سپس برچسب دادگان تست که قبلاً آن‌ها را ندیده است، پیش‌بینی کند. استفاده از درخت تصمیم‌گیری C5.0 که نسخه بهبودیافته الگوریتم C4.5 است با صحت ۹۹/۱۶ درصد دادگان را تفکیک کرد. ما قوانین



شکل ۲: نمودار مرتبه چندجمله‌ای زرنیک برحسب صحت طبقه‌بند

References:

1. Caster AI, Trattler W. Corneal ectasia after laser vision correction. *International Ophthalmology Clinics* 2008; 48: 73-81.
2. Seiler T, Koufala K, Richter G. Iatrogenic keratectasia after laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg* 1998; 14: 312-7.
3. Seiler T, Quurke AW. Iatrogenic keratectasia after LASIK in a case of forme fruste keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 1998; 24: 1007-9.
4. Amoils SP, Deist MB, Gous P, Amoils PM. Iatrogenic keratectasia after laser in situ keratomileusis for less than -4.0 to -7.0 diopters of myopia. *J Cataract Refract Surg* 2000; 26: 967-77.
5. Bühren J, Kook D, Yoon G, Kohnen T. Detection of subclinical keratoconus by using corneal anterior and posterior surface aberrations and thickness spatial profiles. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2010; 51: 3424-32.
6. Klein SR, Epstein RJ, Randleman JB, Stulting RD. Corneal ectasia after laser in situ keratomileusis in patients without apparent preoperative risk factors. *Cornea* 2006; 25: 338-403.
7. Tuli SS, Iyer S. Delayed ectasia following LASIK with no risk factors: Is a 300-micron stromal bed enough? *J Refract Surg* 2007; 23: 620-2.
8. Binder PS. Poster presented at: American Academy of Ophthalmology Annual Meeting, 2006.
9. Binder PS. Evaluation of suspected risk factors for ectasia after refractive surgery. Paper presented at: American Society of Cataract and Refractive Surgery Annual Meeting, April, 2007.
10. Krachmer JH, Feeler RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol* 1984; 28: 293-322.
11. Maeda N, Klyce SD, Smolek MK, Thompson HW. Automated keratoconus screening with corneal topography analysis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1994; 35: 2749-57.
12. Feder RS, Gan TJ. Noninflammatory Ectasia Disorder. In: Krachmer JH, Mannis MJ, Holland EJ. *Cornea fundamentals diagnosis and management*. 3rd ed. China. Mosby Elsevier 2011: 865-87.
13. Bühren J, Kühne C, Kohnen T. Defining subclinical keratoconus using corneal first-surface higher-order aberrations. *Am J Ophthalmol* 2007; 143: 381-9.
14. Langenbucher A, Gusek-Schneider GC, Kus MM, Huber D, Seitz B. Keratoconus screening with wave-front parameters based on topography height data (in German). *Klin Monatsbl Augenheilkd* 1999; 214: 217-23.
15. Gobbe M, Guillon M. Corneal wavefront aberration measurements to detect keratoconus patients. *Cont Lens Anterior Eye* 2005; 28: 57-66.
16. Bühren J, Kühne C, Kohnen T. Wavefront analysis for the diagnosis of subclinical keratoconus (in German). *Ophthalmologe* 2006; 103: 783-90.
17. Twa MD, Parthasarathy S, Roberts C. Automated decision tree classification of corneal shape. *Optom Vis Sci* 2005; 82: 1038-46.

18. Thibos, L, Applegate RA, Schweigerling JT, Webb R. VSIA Standards Taskforce Members . Standards for Reporting the Optical Aberrations of Eyes. OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 35, Vision Science and its Applications, Lakshminarayanan,V. (ed) (Optical Society of America, Washington, DC), 2000; 232-44.
19. Khotanzad A, Hong YH. Invariant image recognition by Zernike moments. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1990; 12: 489-97.
20. Schwiegerling J, Greivenkamp JE, Miller JM. Representation of videokeratoscopic height data with Zernike polynomials. J Opt Soc Am (A) 1995; 12: 2105-13.
21. Mindru F, Tuytelaars T, Gool LV, Moons T. Moment invariants for recognition under changing viewpoint and illumination. Computer Vision and Image Understanding 2004; 94: 3-27.
22. Suk T, Flusser J. Affine moment invariant of color images. Proceedings of the 13th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns Proc CAIP 2009; 334-41.
23. Chan YK, Chang CC. A color image retrieval method based on color moment and color variance of adjacent pixels. Int J Pattern Recognit Artif Intell 2002; 16: 113-25.
24. Chen B, Shu H, Zhang H. Color image analysis by quaternion Zernike moments. International Conference on Pattern Recognition 2010; 625-8.
25. Quinlan JR. Data mining tools C5.0 1998. Available at: <http://www.rulequest.com/see5-info.html>. Last updated February 2012.
26. Wang YJ, Xin Q, Coenen F. Hybrid Rule Ordering in Classification Association Rule Mining. Transactions on Machine Learning and Data Mining 2008; 1: 1-15.
27. MATLAB. Version 7.9.0.529 (R2009b). Natick, MA: The MathWorks Inc; 2009.
28. SPSS Clementine. Version 11.1. Chicago, IL: SPSS Inc.
29. Hastie T, Tibshirani R, Friedman JH. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. New York: Springer 2001.
30. Kohavi R. A Study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Mateo Kaufmann 1995; 2: 1137-45.
31. Wang Y, Rabinowits YS, Rotter JJ, Yang H. Genetic epidemiological study of keratoconus: evidence for major gene determination. Am J Med Genet 2000; 93: 403-9.
32. Wilson SE, Klyce SD. Screening for corneal topographic abnormalities before refractive surgery. Ophthalmology 1994; 101: 147-52.
33. Ciolino J, Belin M. Changes in the posterior cornea after laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy. J Catatact Refract Surg. 2006; 32: 1426-31.
34. Krachmer JH, Mannis MJ, Holland EJ. Cornea. 2nd ed. Philadelphia: Mosby; 2005.