لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹٤، دورهٔ ۱۲، شمارهٔ ٤، صفحات: ۳۳-۲۰ .

مقاله پژوهشی

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 موسوی‌زاده [٤]
محمود بابایی [۳]

۱. *دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکدهٔ 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، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران.*

نویسندهٔ مسئول: کیوان معقولی، تلفن: ۰۲۱۴۴۴۷۴۳۲۲
پست الکترونیک: **k_maghooli@srbiau.ac.ir**

خلاصه

مقدمه: پیش‌بینی اکتازی قرنیه بعد از جراحی رفرکتیو با استفاده ضرایب زرنیک استخراج‌شده از تصاویر توپوگرافی قبل از عمل و ارائهٔ قواعدی جهت کمک به تشخیص صحیح‌تر چشم‌پزشکان دررابطه با انجام جراحی لیزیک.

روش بررسی: افراد بررسی‌شده 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 اندازهٔ 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 رفرکتیو براساس confidence و support و تعداد ویژگی‌های موجود در بخش مقدم قواعد، مرتب شدند. برای گروه‌های اول، دوم، سوم و چهارم به‌ترتیب ۴، ۱۷، ۲۳ و ۱۲ قاعده با confidence بالای ۷۰ درصد به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: ضرایب مرتبهٔ 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 منجربه 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

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

مقدمه

اکتازی قرنیه عبارت اســت از شــیب‌دار و نازک شــدن پیش‌روندهٔ قرنیه. اکتازی پس از لیزیــک، نادر اما یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین موضوعات بالینی است که در میان جراحان رفرکتیو بسیار مورد بحث می‌باشد[۴-۱]. مشخص نمودن بیمارانی 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 آشکارنشده و یا دژنراسیون حاشیه‌ای شفاف[1] است[۵]. مواردی نیز گزارش شده است که بیماران بدون هیچ فاکتور خطری دچار اکتازی پس از تصحیح بینایی با لیزر شــده‌اند[۶و۷]. از طرف دیگر بیمارانی با یک فاکتور خطر یا بیشتر بوده‌اند که پس از تصحیح بینایی دچار اکتازی نشده‌اند[۸]. همچنین آنالیز دادگان بزرگ توســط Binder موفق نشد ارتباط برخی فاکتورهای ازقبل شناخته‌شده را به‌عنوان ریسک‌فاکتور نشان دهد[۹].

توپوگرافــی قرنیه یکی از رایج‌ترین روش‌های تشــخیص نامنظمی قرنیه اســت. توپوگرافی قرنیه که به‌عنوان ویدیوکراتوگرافی یا نقشه‌برداری قرنیه نیز شناخته می‌شود، یک پیشرفت مهم در اندازه‌گیری انحناء قرنیه محسوب می‌گردد. اکثر توپوگراف‌ها چیزی حدود ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ نقطه برروی تمام ســطح 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 افرادی‌که پس از عمل نرمال بوده‌اند، مقایسه می‌کنیم تا بااستفاده از انــدازهٔ ضرایب زرنیک استخراج‌شــده از تصاویــر توپوگرافی قبل از عمل بتوانیم افرادی را که دچار اکتازی پس از عمل خواهند شد، پیش‌بینی کنیم.

روش بررسی

دادگان مورد اســتفاده در این مطالعه، نقشــهٔ محــوری توپوگرافی قبل از عمــل افرادی اســت که همگی تحــت عمل تصحیــح بینایی به روش لیزیک قرار گرفته‌اند. افراد مورد مطالعه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ به کلینیک تخصصی چشم‌پزشــکی بصیر مراجعه کرده‌اند و قبل از جراحی، توپوگرافــی قرنیه با اســتفاده از دســتگاه EyeSys 2000 (EyeSys vision Inc., Houston, TX)، از بیماران گرفته شــد و با اســتفاده از دســتگاه لیزر اگزایمر Nidek EC-5000 (Nidek Inc., Japan) تحت عمل لیزیک قرار گرفتند. محدودهٔ تصحیح ایجادشده برای هر بیمار نیــز به اندازهٔ خطای رفرکتیو آن فرد بوده اســت. مــا این افراد را به چهار گروه تقسیم‌بندی نمودیم:

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

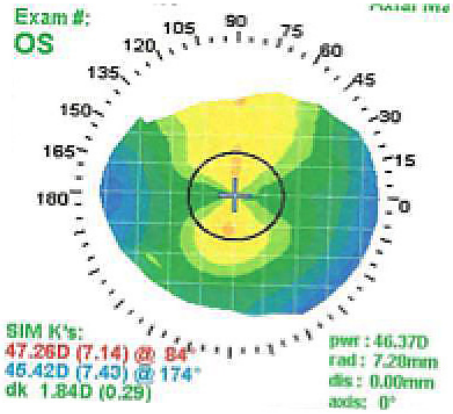
۲. افرادی که قبل از عمل مشکوک به کراتوکونوس اما بعد از آن دچار اکتازی نشده‌اند. (۲۴ چشم از ۱۶ نفر)

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

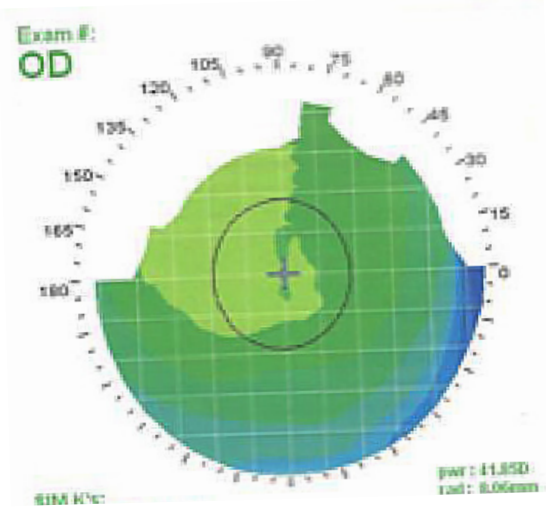
۴. افرادی که قبل از عمل مشــکوک به کراتوکونوس و بعد از آن دچار اکتازی شده‌اند. (۱۷ چشم از ۹ نفر)

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

همان‌طورکــه می‌دانید توپوگرافــی قرنیه یکــی از رایج‌ترین روش‌های تشــخیص نامنظمی‌های قرنیه است. باتوجه به نامشخص بودن زمان آغاز و نحوهٔ ســیر قوز قرنیه، ممکن اســت فردی کــه در معاینات و توپوگرفی اولیــهٔ قرنیه فاقــد علایم بیماری بوده و جراحی بدون عارضه‌ای را پشــت ســر گذاشــته اســت، در هر زمانی علائم قوز قرنیه را بروز دهد[۱۰و۱۱]. به‌همین‌دلیل افراد هر ۴ گروه ذکر شده بین ۶-۳ سال مجدداً تحت معاینه قرار گرفتند و از آن‌ها توپوگرافی مجدد و همچنین ارباســکن گرفته‌شد و مشخص گردید که بعد از گذشت این مدت از جراحی، نرمال هستند یا دچار اکتازی قرنیه شده‌اند.



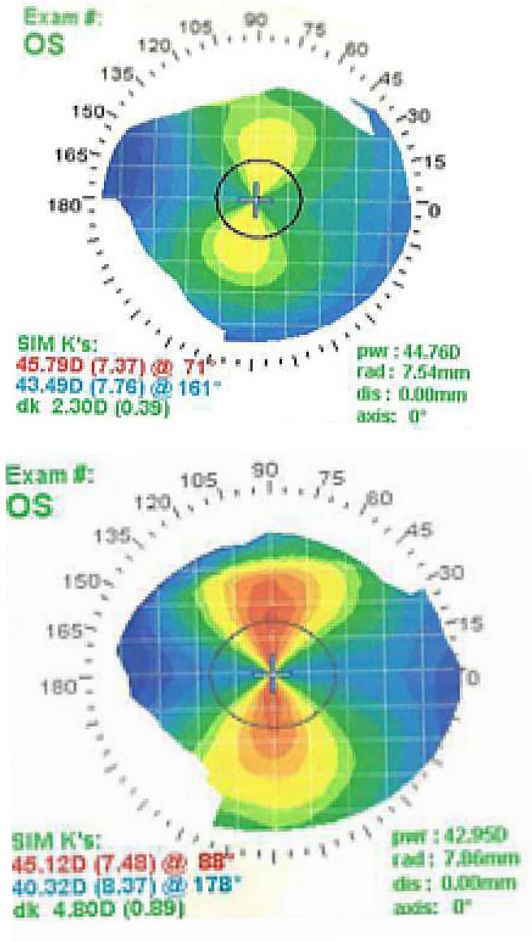
a



b

1. Pellucid Marginal Degeneration

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]



شکل۱: 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 (نمایهٔ SRAX عبارت است از زاویهٔ بین پرشیب‌ترین محور نیمهٔ 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. بدین‌ترتیب وضعیت قبل و بعد از عمل افراد تعیین گردید و چهار گروه مذکور ایجاد شد. چندجمله‌ای‌های زرنیک به‌دست‌آمده از اولین سطح قرنیه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تشخیصی با حساسیت و قطعیت بالا برای آشکار کردن کراتوکونوس تحت بالینی [۱۳] [۲] 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 مرحلهٔ بعد می‌بایست از یک کلاسه‌بند استفاده کرد تا بتوان هر چشم را با ویژگی‌های مذکور درگروه مربوطه به‌درستی طبقه‌بندی کرد. برای این هدف، دادگان به دو دستهٔ 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 ۹۲درصد بوده‌است[۱۷]. ما نیز در مطالعهٔ خود از درخت تصمیم‌گیری به‌عنوان روش طبقه‌بندی استفاده کردیم. الگوریتم به‌کاررفته در مطالعهٔ 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 مجموعهٔ متعامد کاملی داخل دایرهٔ واحد تشکیل می‌دهند. برای تعریف چندجمله‌ای‌های زرنیک، ورژن‌های متعددی ارائه شده است. ما در اینجا از تعریف پیشنهادشده توسط استاندارد ANSI استفاده می‌کنیم[۱۸]. در این تعریف دایرهٔ واحد در مختصات قطبی (ρ,θ) بیان می‌شود که $0\le\rho\le1$ و $0\le\theta\le2\pi$ است. چندجمله‌ای زرنیک به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

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

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

فاکتور نرمالیزاسیون به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

2. Subclinical keratoconus

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

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

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

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

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

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

Schwiegerling و همکاران[۲۰] روشی برای تجزیه‌وتحلیل و استخراج اطلاعات ارتفاع قرنیه ارائه دادند که در آن اطلاعات ارتفاع قرنیه به مجموعهٔ 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 به‌صورت زیر تقریب می‌زند:

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

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 به‌دست خواهد آمد[۱۹]:

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

در محاسبهٔ زرنیک، مرکز تصویر در مرکز دایره قرار می‌گیرد و بقیهٔ 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 تشکیل‌دهندهٔ آن تبدیل می‌کند. با این کار به‌ازای هر کانال تصویری خواهیم داشت و ممان‌ها

جدول۱: چندجمله‌ای‌های زرنیک (تا مرتبهٔ۴)

Order n	Frequency m	$Z_n^m(\rho,\theta)$	meaning
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	$\sqrt{10}\rho^4\cos(4\theta)$	

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

به‌طور جداگانه از تصاویر مربوط به هرکانال به‌دست می‌آیند[۳-۲۱].

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 به‌دست می‌آیند و نتایج به‌دست‌آمده کارآیی بیشتری نسبت به دیگر توصیف‌گرها را گزارش می‌دهد. از این رو ما در مطالعهٔ 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 به‌صورت زیر تجزیه شود[۲۴]:

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

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

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

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

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1$$
$$ij = -ji = k\ ,\ jk = -kj = i\ ,\ ki = -ik = j \quad (9)$$

اندازهٔ یک quaternion از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

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

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

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

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

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

در حالت گسسته برای یک تصویر دیجیتالی رابطهٔ ممان زرنیک چهارگانه به‌صورت زیر خواهد بود:

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

N در رابطهٔ بالا بیانگر تعداد پیکسل‌ها در امتداد هر محور از تصویر است. درنهایت، رابطهٔ بین ممان‌های زرنیک چهارگانه و ممان‌های زرنیک متعارف را می‌توان به‌صورت رابطهٔ زیر بیان کرد:

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

که:

$$b_{n,m} = \frac{-1}{\sqrt{3}}\left[\mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_R)\right) + \mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_G)\right) + \mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_B)\right)\right] \quad (14)$$
$$c_{n,m} = \mathrm{Re}\left(a_{n,m}(f_R)\right) + \frac{1}{\sqrt{3}}\left[\mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_G)\right) - \mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_B)\right)\right] \quad (15)$$
$$d_{n,m} = \mathrm{Re}\left(a_{n,m}(f_G)\right) + \frac{1}{\sqrt{3}}\left[\mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_B)\right) - \mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_R)\right)\right] \quad (16)$$
$$f_{n,m} = \mathrm{Re}\left(a_{n,m}(f_B)\right) + \frac{1}{\sqrt{3}}\left[\mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_R)\right) - \mathrm{Im}\left(a_{n,m}(f_G)\right)\right] \quad (17)$$

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

بنابراین با توجه به روابط ذکرشده می‌توان به ازای مرتبه‌های مختلف چندجمله‌ای زرنیک، ممان‌ها را از تصاویر رنگی استخراج کرد. بدین‌ترتیب این اطمینان وجود خواهد داشت که از حداکثر دانش موجود در تصاویر توپوگرافی رنگی استفاده شده است. در ضمن این ممان‌ها به‌صورت اعداد مختلط هستند که با توجه به رابطهٔ ۱۰ می‌توان اندازهٔ آن‌ها را محاسبه کرد. ازآنجاکه در هر مرتبه از چندجمله‌ای، ضرایب m و $-m$ مزدج مختلط هستند و با توجه به اینکه اندازهٔ دو عدد که مزدج مختلط یکدیگرند، با هم برابر است، می‌توان تنها به محاسبهٔ 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 یک‌سری قوانین اگر/آنگاه توضیح می‌دهد. یکی از خصوصیات این روش فهم آسان مدل ایجادشده توسط آن است. به‌عبارتی 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 دومرحله‌ای انجام می‌شود. در مرحلهٔ اول که به آن مرحلهٔ آموزش گفته می‌شود، مدل براساس یک الگوریتم کلاسه‌بندی با استفاده از مجموعهٔ آموزشی ساخته می‌شود. مجموعهٔ آموزشی به‌صورت تصادفی از پایگاه داده انتخاب می‌شود. در مرحلهٔ 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 مقایسهٔ برچسب واقعی داده‌ها و برچسب‌هایی که مدل برای

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

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

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

الگوریتم C5.0 یکی از الگوریتم‌های درخت تصمیم‌گیری می‌باشد که در این مقاله از آن به‌منظور کشف دانش و قوانین با کیفیت استفاده شده است. این الگوریتم بهبودیافته 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 بهرهٔ اطلاعات را دارد، صورت می‌گیرد. شدت هرس‌شدن 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 برپایهٔ 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. درنهایت، براساس روند رأی‌گیری وزن‌دهی‌شده مدل اصلی از ترکیب تمام مدل‌ها ساخته می‌شود.

با اجرای الگوریتم C5.0، قوانینی به‌شکل 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. ازجمله 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 قوانین یکسان باشد، براساس تعداد ویژگی‌های موجود در مقدم قواعد، مرتب می‌شوند.

تجزیه‌وتحلیل داده

از نرم‌افزار MATLAB *(ver. 7.9.0.529;The MathWorks, Inc.,Natick,MA)* [۲۷] جهت استخراج اندازهٔ 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 به‌همراه رویکرد تقویت برروی دادگان اعمال شد. جهت هرس کردن درخت نیز از تنظیمات پیش‌فرض نرم‌افزار استفاده شد که یک هرس کلی [۸] انجام می‌دهد.

جهت تقسیم دادگان به دو دستهٔ 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 به‌عنوان دادهٔ تست و بقیه به‌عنوان دادهٔ آموزشی به کلاسه‌بند داده‌می‌شود. این کار تازمانی‌که هر کدام از دسته‌های ۱۰ تایی یک‌بار به‌عنوان تست به طبقه‌بند داده شوند، تکرار [۱۰] می‌شود. صحت طبقه‌بند درخت تصمیم‌گیری ایجادشده با تقسیم کل تعداد طبقه‌بندی‌های ناصحیح در ۱۰ بار تکرار، بر کل تعداد نمونه‌ها در مجموعهٔ دادگان به‌دست می‌آید. این رویکرد بخصوص زمانی‌که تعداد داده‌های دردسترس کم است، منجر به استفادهٔ مؤثرتری از آن‌ها می‌شود و تخمین پایداری از نرخ خطا ارائه می‌دهد زیرا طبقه‌بند طراحی‌شده در هر تکرار با داده‌هایی که آن‌ها را ندیده است، تست می‌شود[۲۹و۳۰].

یافته‌ها

چشم‌های بررسی‌شده در این مطالعه به ۴ گروه زیر تقسیم شده‌اند:

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

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

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

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

اندازهٔ ضرایب زرنیک از مرتبهٔ ۱۹ از تصاویر توپوگرافی قبل از عمل ۱۱۹ چشم مورد مطالعه استخراج شد. به‌ازای هر نمونه، ۱۱۰ ویژگی به‌دست آمد که دو ضریب مرتبهٔ پایین $a_{0,0}$ و $a_{1,1}$ از مجموعهٔ ویژگی‌ها حذف شدند. بنابراین نمونه‌ها با ۱۰۸ ویژگی با روش اعتبارسنجی 10-fold هربار به نمونه‌های آموزشی و تست تقسیم شدند و درنهایت به صحت ۹۹/۱۶ درصد برای درخت تصمیم‌گیری ایجادشده دست یافتیم.

3. Overfitting
4. Boosting
5. Confidence Support and size of Antecedent
6. Confidence
7. Support
8. Global
9. 10-fold cross validation
10. Iteration

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

تنهـا یکـی از نمونه‌ها که به گروه d تعلق داشـت به‌طور اشـتباه در گروه a طبقه‌بندی شـد. قوانین اگر/آنگاه استخراج‌شـده برای کلاس‌های a تا d به‌ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۴ قابل مشـاهده هسـتند. این قوانین براساس میـزان اطمینان، حمایـت و تعداد ویژگی‌های مقدم مرتب شـده‌اند. برای کلاس a، ۱۳ کلاس b، ۲۷ کلاس c، ۴۵ و برای کلاس d، ۳۴ قانون ایجاد شـد. برای هر کلاس قوانینی که confidence بالای ۷۰ درصد داشـتند به‌ترتیب آورده‌شـده‌اند. 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. درصورتی‌که فرد براساس معیارهای موجود در توپوگرافی، قبل از عمل نرمال تشخیص داده‌شود و اندازهٔ ضرایب زرنیک مطابق پیش‌شرط‌های این قوانین باشد، می‌توان پیش‌بینی کرد که فرد بعد از عمل نیز نرمال خواهد بود.

بـرای کلاس b، ۱۷ قانـون به‌دسـت آمـد. درصورتی‌کـه فـرد مطابق معیارهای تشـخیصی موجود در توپوگرافی مشکوک به کراتوکونوس باشد و پیش‌شـرط‌های موجود در قوانین مربوط به ایـن 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 درصورتی‌که پیش‌شـرط‌ها برقرار باشند، اکتازی پس از جراحی پیش‌بینی می‌شـود. یعنی فرد با توجه به معیارهای توپوگرافی نرمال اسـت اما بعد از عمل به اکتازی دچار خواهد شـد (کلاس c) یا مشـکوک به کراتوکونوس است و بعد از عمل دچار اکتازی می‌شود (کلاس d).

جدول۲: قواعد استخراج‌شده از درخت تصمیم‌گیری $C_{۵,۰}$ برای کلاس a

NO.	Confidence	Support	Size-of-Antecedent	Rule (for a class)
1	0.889	7	2	If $a_{12,10}$<=182.531 and $a_{7,5}$<=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<$a_{11,5}$<=1156.556 and $a_{14,8}$>148.123 and $a_{16,8}$>167.183 and $a_{17,15}$>68.377 and $a_{4,4}$<=920.924 and $a_{5,1}$>1984.444 and $a_{9,7}$<=624.477 then a
4	0.727	3.504	3	If $a_{10,4}$<=1538.354 and $a_{11,9}$>237.928 and $a_{16,16}$<=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.

جدول۳: قواعد استخراج‌شده از درخت تصمیم‌گیری $C_{۵,۰}$ برای کلاس b

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

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

	2	0.836	20.722	9	If $\mathbf{a_{12,12}}$>78.977 and 148.123<$\mathbf{a_{14,8}}$<=694.721 and $\mathbf{a_{15,1}}$<=1200.798 and $\mathbf{a_{16,0}}$>297.147 and $\mathbf{a_{16,6}}$>221.363 and $\mathbf{a_{18,16}}$<=311.170 and $\mathbf{a_{19,5}}$<=893.973 and$\mathbf{a_{2,0}}$>5579.273 and $\mathbf{a_{8,0}}$>1294.696 then b
	3	0.822	17.462	11	If $\mathbf{a_{12,0}}$>265.732 and $\mathbf{a_{14,8}}$>148.123 and $\mathbf{a_{15,1}}$<=1528.565 and $\mathbf{a_{16,0}}$>283.473 and $\mathbf{a_{17,1}}$<=1345.239 and $\mathbf{a_{17,7}}$<=634.718 and $\mathbf{a_{18,16}}$>132.822 and $\mathbf{a_{18,8}}$>179.895 and $\mathbf{a_{2,0}}$>5579.273 and $\mathbf{a_{8,0}}$>1294.696 and $\mathbf{a_{9,7}}$<=624.477 then b
	4	0.82	6.536	2	If $\mathbf{a_{11,9}}$<=237.928 and $\mathbf{a_{16,16}}$<=120.024 then b
	5	0.8	3	2	If $\mathbf{a_{12,4}}$>1029.723 and $\mathbf{a_{2,0}}$<=5579.273 then b
	6	0.795	21.905	11	If $\mathbf{a_{10,2}}$<=2328.694 and $\mathbf{a_{11,5}}$>121.749 and $\mathbf{a_{13,5}}$<=801.592 and $\mathbf{a_{13,9}}$<=517.517 and $\mathbf{a_{18,16}}$>107.766 and $\mathbf{a_{19,1}}$<=689.828 and $\mathbf{a_{19,5}}$<=893.973 and $\mathbf{a_{2,0}}$>5579.273 and $\mathbf{a_{2,2}}$>1139.025 and A8,2>696.562 and A8,4<=1185.278 then b
	7	0.793	8.082	4	If $\mathbf{a_{12,0}}$>227.249 and 77.300<$\mathbf{a_{17,17}}$<=107.384 and $\mathbf{a_{17,7}}$<=634.718 and $\mathbf{a_{19,11}}$<=420.399 then b
	8	0.793	3.046	2	If $\mathbf{a_{15,11}}$>506.423 and $\mathbf{a_{16,16}}$>120.024 then b
	9	0.786	4.364	3	If $\mathbf{a_{10,4}}$>1241.757 and $\mathbf{a_{12,2}}$>869,825 and $\mathbf{a_{14,8}}$<=694.721 then b
	10	0.781	9.517	2	If $\mathbf{a_{16,16}}$<=120.024 and $\mathbf{a_{5,1}}$<=3012,803 then b
	11	0.778	5.716	4	If $\mathbf{a_{11,3}}$>433,970 and $\mathbf{a_{12,2}}$>869,825 and $\mathbf{a_{2,0}}$>5579,273 and $\mathbf{a_{9,7}}$>434,096 then b
	12	0.775	14.782	2	If $\mathbf{a_{17,15}}$<=68.377 and $\mathbf{a_{19,17}}$>118.737 then b

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

13	0.754	32.499	10	If $\mathbf{a_{10,0}}$>270.266 and A10,2<=2328.694 and A13,11>76.359 and A14,4<=1215.423 and A14,8<=600.571 and A15,7>148.307 and A17,17>39.351 and A19,5<=924.119 and 5579.273<A2,0<=7399.185 and A4,4<=719.414 then b
14	0.738	7.489	3	If $\mathbf{a_{12,0}}$>1070875 and $\mathbf{a_{17,13}}$<=170.204 and $\mathbf{a_{17,17}}$>77.300 then b
15	0.737	4.788	3	If $\mathbf{a_{16,2}}$>1275.035 and $\mathbf{a_{17,13}}$<=170.204 and $\mathbf{a_{17,17}}$>77.300 then b
16	0.713	3.613	3	If $\mathbf{a_{14,8}}$<=694.721 and $\mathbf{a_{16,10}}$<=587.406 and $\mathbf{a_{19,13}}$>413.846 then b
17	0.703	3.691	3	If $\mathbf{a_{14,6}}$>805.170 and $\mathbf{a_{15,1}}$<=1176.904 and $\mathbf{a_{2,0}}$<=6356.373 then b

جدول۴: قواعد استخراج‌شده از درخت تصمیم‌گیری C۵.۰ برای کلاسc

NO.	Confidence	Support	size –of-Antecedent	Rule(for c class)
1	0.838	12.328	4	If $\mathbf{a_{15,1}}$>1176.904 and $\mathbf{a_{16,16}}$>120.024 and $\mathbf{a_{17,3}}$>346.691 and$\mathbf{a_{4,0}}$<=4867.102 then c
2	0.829	4.028	3	If $\mathbf{a_{10,10}}$<=45.755 and $\mathbf{a_{17,15}}$>68.377 and $\mathbf{a_{4,0}}$<=5641.055 then c
3	0.808	20.266	9	If 636.129<$\mathbf{a_{10,2}}$<=2042.288 and $\mathbf{a_{12,2}}$<=869.825 and $\mathbf{a_{14,4}}$<=1492.671 and $\mathbf{a_{16,16}}$>120.024 and $\mathbf{a_{19,13}}$<=413.846 and $\mathbf{a_{2,0}}$>5040.514 and $\mathbf{a_{5,1}}$<=2676.428 and $\mathbf{a_{5,3}}$<=1658.563 and $\mathbf{a_{6,6}}$>111.730 then c
4	0.8	3	3	If $\mathbf{a_{11,11}}$<=67.326 and $\mathbf{a_{19,1}}$<=892.163 and $\mathbf{a_{2,0}}$>5579.273 then c
5	0.8	3	2	If $\mathbf{a_{14,0}}$<=419.258 and $\mathbf{a_{2,0}}$>7884.573 then c
6	0.788	3.075	1	If $\mathbf{a_{16,10}}$>587.406 then c
7	0.783	6.939	3	If $\mathbf{a_{12,0}}$<=265.732 and $\mathbf{a_{17,17}}$<=247,956 and $\mathbf{a_{5,1}}$<=2502.566 then c
8	0.783	5.662	3	If $\mathbf{a_{15,1}}$>1528.565 and $\mathbf{a_{17,17}}$<=247.956 and $\mathbf{a_{8,0}}$<=3203.461 then c

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

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

جدول۵: قواعد استخراج‌شده از درخت تصمیم‌گیری C۵.۰ برای کلاسd

NO.	Confidence	Support	size –of-Antecedent	Rule(for c class)
1	0.838	12.328	4	If $\mathbf{a_{15,1}}$>1176.904 and $\mathbf{a_{16,16}}$>120.024 and $\mathbf{a_{17,3}}$>346.691 and$\mathbf{a_{4,0}}$<=4867.102 then c
2	0.829	4.028	3	If $\mathbf{a_{10,10}}$<=45.755 and $\mathbf{a_{17,15}}$>68.377 and $\mathbf{a_{4,0}}$<=5641.055 then c

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

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

بحث و نتیجه‌گیری

بـا رواج‌یافتـن جراحی‌های کراتورفرکتیو در سـال‌های اخیـر و به‌ویژه عارضه‌دار شـدن ایـن جراحی‌ها در افـراد مبتلا بـه کراتوکونوس (حتی درمواردی‌که دارای شـکل‌های بسـیار خفیف و ثابت بیمـاری بوده‌اند)، اهمیـت تشـخیص به‌موقع و پیـش از اینگونه جراحی‌هـا را در این افراد دوچندان می‌کند[۳۱و۳۲]. یکی از عوارض بسیار مهم بعد از جراحی‌های انکساری، اکتازی قرنیه است که می‌تواند همراه با برگشت عیب انکساری اصلاح‌شـده، آستیگماتیسـم نامنظم و نازک‌شـدگی قرنیه باشد و ممکن است در مواردی جهت بازیابی 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 شـده‌اند[۶و۷] و بیمارانی هم بـا یـک یا چند فاکتـور خطر بوده‌اند کـه پس از جراحی دچـار اکتازی نشده‌اند[۸]. اگرچه لیزیک و تراش سطح هردو بافت قرنیه را با لیزر اگزایمر برمی‌دارند اما، بیشـتر موارد گزارش شده‌است اکتازی پس از لیزیک بوده اسـت[۱]. در این مطالعه نیز افراد تحت عمل لیزیـک قرار گرفته بودند. یکـی از شـایع‌ترین فاکتورهای خطـری که دربارهٔ آن‌ها بحث می‌شـود، توپوگرافی مشـکوک اسـت. مطالعاتی گزارش داده‌اند که تغییرات سطح خلفی قرنیه می‌تواند کلیدی جهت تشـخیص زودهنـگام 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. Rabinowitz و Klyce و همکاران معیارهای ارزیابی برپایهٔ توپوگرافی را مشخص کرده‌اند. این معیارها کمک‌کننده هستند اما، مشخصاً برای ارزیابی توپوگرافی کافی نیستند. هیچ معیار توپوگرافی یک شـاخص کاملاً قابل اطمینان برای خطر اکتازی محسوب نمی‌شود. جالب اسـت که بیمارانی وجود دارند که توپوگرافی اولیهٔ آن‌ها نرمال اسـت اما، بـا یا بدون جراحی لیزر قرنیه دچار اکتازی قرنیه می‌شـوند[۱]. بنابراین، مطالعهٔ حاضر انجام شـد تا معیارهای دیگری از تصاویر توپوگرافی قبل از عمل افرادی که بدون فاکتور خطر دچار اکتازی شـده‌بودند یا افرادی که با وجود چند فاکتور خطر دچار اکتازی نشـده بودند، اسـتخراج شود. این معیارها همان ضرایب زرنیک هستند. ما با استفاده از اندازهٔ ضرایب زرنیک توانسـتیم با صحت بالایی ابتلاء یا عدم ابتلاء فرد به اکتازی پس از عمل را پیش‌بینی کنیم.

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

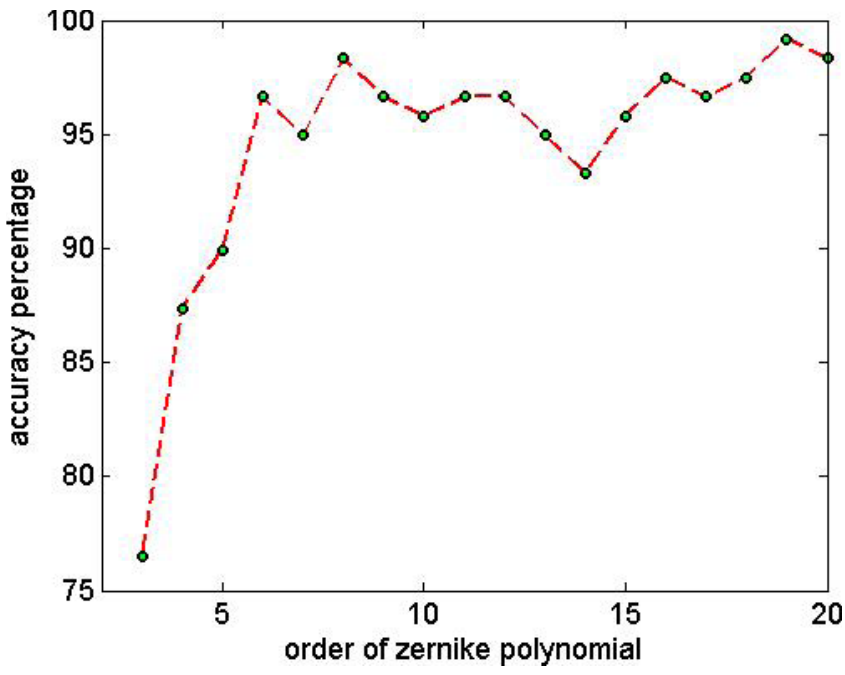
[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

رنگی توپوگرافی اســتخراج شــد به‌گونه‌ای که اطلاعــات رنگی موجود در تصاویــر نیز حفظ شــود. در مطالعاتــی که از ضرایب زرنیــک برای تمایز چشم‌های نرمال و کراتوکونوس اســتفاده شده است، مرتبهٔ چندجمله‌ای حداکثر تا ۱۰ انتخاب شده است[۱۴و۱۷]. اما ازآنجاکه در چشم‌هایی که دارای آستیگماتیســم نامنظم قابل توجهی هســتند بیراهه‌های مرتبهٔ بالا درصد بزرگی از اعوجاجات چشم را تشکیل می‌دهند[۳۴]، در این مطالعه ضرایب مرتبهٔ بالاتر زرنیک تا مرتبهٔ ۱۹ اســتخراج شــدند. بدین‌ترتیب از ویژگی‌های بیشــتر و درجات بالاتری از زرنیک که اعوجاجات مرتبهٔ بالاتر و پیچیده‌تری را نشان می‌دهند، استفاده شد. در شکل ۲، صحت طبقه‌بند به‌ازای مرتبه‌های مختلف چندجمله‌ای زرنیک رســم شده‌است. بیشترین صحت کلاسه‌بند با استفاده از ضرایب زرنیک مرتبهٔ ۱۹حاصل شد.

دادگان با تکنیک اعتبارســنجی 10-fold به دو دستهٔ آموزش و تست تقســیم شــدند تا طبقه‌بند با اســتفاده از دادگان آموزشــی، تعلیم یابد و سپس برچسب دادگان تست که قبلاً آن‌ها را ندیده است، پیش‌بینی کند. اســتفاده از درخــت تصمیم‌گیری C5.0 که نســخهٔ بهبودیافتهٔ الگوریتم C4.5 اســت با صحت ۹۹/۱۶ درصــد دادگان را تفکیک کرد. ما قوانین 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 به‌دســت‌آمده در تفکیــک ۴ گروه مورد مطالعه، مشــخص می‌شــود که انــدازهٔ ضرایب زرنیــک استخراج‌شــده از تصاویر توپوگرافی، پتانســیل بالایــی برای پیش‌بینی ابتلاء یا عــدم ابتلاء فرد به اکتازی پس از جراحی انکســاری لیزیک دارد. قوانین ارائه‌شــده با میزان اطمینان و حمایت بالا می‌توانند به چشم‌پزشک برای تشخیص دقیق‌تر و جلوگیــری از ایجاد عارضهٔ مهم اکتــازی پس از جراحی درکنار معیارهای تشخیصی موجود کمک کنند.

پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی علاوه بر ضرایب زرنیک به‌دست‌آمده از نقشــهٔ توپوگرافی، از دیگر فاکتورهای دخیل در تشخیص اکتازی قرنیه ماننــد معیارهایــی که توپوگرافی در اختیار چشم‌پزشــک قــرار می‌دهد، اســتفاده شود و سیستم کامل‌تری را برای پیش‌بینی وضعیت افراد پس از عمل طراحی نمود.



شکل۲: نمودار مرتبهٔ چندجمله‌ای زرنیک برحسب صحت طبقه‌بند

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

References:

1. Caster AI, Trattler W. Cornael 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, Feelor RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflamatory corneal thining 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. Noninflamatory Ectasia Disorder. In: Krachemer JH, Mannis MJ, Holland EJ. Cornea fundamentals diagnosis and managemenet .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, Ku¨hne 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.

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

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 JI, 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.

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]