

## Mechanical Modeling and Studying on Intraocular Pressure of Eye

## مدلسازی مکانیکی چشم و بررسی فشار داخلی آن

H. Ameri<sup>1\*</sup>, A. Esteki<sup>2</sup>, A. Ameri<sup>3</sup>

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

2. Professor, Department of Biomedical Engineering and Physics Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3. Assistant professor, Department of Ophthalmology, School of Medicine, Medical Sciences, Tehran University, Tehran, Iran

(Received: Mar. 18, 2014; Accepted: May. 18, 2014)

حامد عامری<sup>۱\*</sup>، علی استکی<sup>۲</sup>، احمد عامری<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه بیومکانیک دانشکده مهندسی پزشکی واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

۲. استاد گروه مهندسی و فیزیک پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

۳. دانشیار گروه چشم پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران (تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۷، تاریخ تصویب: ۹۳/۲/۲۸)

### چکیده

هدف از این پروژه مطالعه اثر فشار داخل چشم (IOP) بر تنش وارده به سطح مقطع عصب بینایی است. مشخصات ابعادی مدل بر اساس تصویر دیجیتالی از چشم یک فرد به شعاع داخلی کره چشم: ۱۲mm، ضخامت صلبیه ۰/۸ mm و سطح مقطع عصب بینایی: دایره‌ای به شعاع ۱/۷۵ mm صورت گرفته و فشار داخلی چشم برابر ۱۵ mm Hg یا ۲Kpa در نظر گرفته شد. به کمک این مدل می‌توان اثرات تنش بر عصب بینایی را در شرایط دلخواه و متفاوت مورد بررسی قرار داد. در این مدل دو جنس متفاوت یکی صلبیه و دیگری عصب در نظر گرفته شده‌اند که خواص مربوط به هر کدام در تحلیل نرم‌افزاری لحاظ گردیده است. نرم‌افزار استفاده شده برای این تحلیل ANSYS می‌باشد که با استفاده از المان solid 95 کل مدل شبکه‌بندی و تحلیل شده و مدل تماماً یک مدل ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. نتایج مدل نشان داد که اثر فشار داخلی چشم و مقادیر تنش در محدوده مرکزی صلبیه و در قسمت پیرامونی دور عصب بیشتر و در محدوده سطح عصب کمتر است. آسیب‌هایی که در چشم بر اثر فشار بالا ایجاد می‌شوند، ابتدا از قسمت‌های پیرامونی شروع می‌شود و به تدریج کار عصب را مختل می‌کند و چون این مناطق، مناطق حساسی هستند دانستن مقدار تغییرات تنش، بسیار حائز اهمیت است. چون حتی در فشار کم می‌تواند باعث اعمال تنش بر محیط عصب بینایی شود که منجر به وارد آمدن صدمات جبران‌ناپذیری به عصب شود.

**واژه‌های کلیدی:** فشار داخلی چشم، عصب بینایی، مدل سه بعدی فشار داخلی چشم.

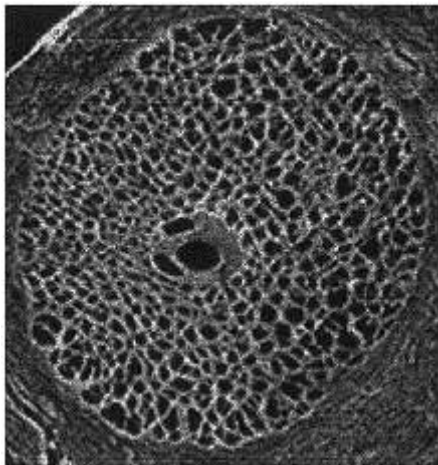
### Abstract

The purpose of this project was to study the effect of intraocular pressure (IOP) stress on the cross section of the optic nerve. Specifications for the dimensional model based on a digital image of a person's eyes to the inner radius of the eye: 12 mm, sclera thickness 0.8 mm and cross section optic nerve: a circle of radius of 1.75 mm was done by the intraocular pressure to 15 mm Hg or 2 Kpa was considered. Using this model considers stress as a side effect placed on the optic nerve in an arbitrary and disparate examination. Within the two different kinds of models, both sclera and nerve, are considered. The properties of each one, is incorporated from the analysis software. Utilizing software with element solid 95 for the analysis can create a whole model grid analysis, and the model is intended to be an isotropic model. The model results showed the effects of intraocular pressure and stress levels in the central area of the sclera. The surrounding area around the nerve is greater and the surrounding area of the nerve level is lower than the range. The damages created the eyes as a result of the upward pressure first started from the surrounding area of the eye and eventually, the function of the nerve is destroyed. Since these areas are very sensitive, to have knowledge of the change in tension is very important for us. Even slight pressure can cause applied tension to the optic nerve, leading to nerve damage that becomes irreparable.

**Keywords:** Intraocular Pressure, Optic Nerve, Dimensional Model.

## مقدمه

یعنی منطقه‌ای از صلبیه در پشت کره چشم به صورت شبکه یا سوراخ سوراخ است که رشته‌های عصبی به آن وارد شده و در داخل صلبیه و در نهایت شبکه پخش می‌شوند (Britton *et al.*, 1987). عکسی از این منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. سطح مشبک صلبیه که محل ورود عصب بینایی به چشم می‌باشد.

در این مدل، تنش‌ها در سطح مقطعی از عصب که به چشم متصل شده است مورد بررسی قرار گرفته و دو جنس متفاوت، یعنی عصب و صلبیه در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای مشاهده بهتر داخل کره چشم و کانتورهای تنش، بررسی‌ها روی یک نیمکره انجام می‌شود. باید توجه داشت که به لحاظ شکل فیزیکی مسأله، در محل سطح مقطع عصبی که به چشم وارد می‌شود فقط یک ردیف المان با خصوصیات عصب وجود دارد و در ردیف بعدی، بقیه المان‌ها با خصوصیات صلبیه قرار خواهند گرفت. یعنی اگر به داخل مدل نگاه شود تمام سطح داخلی از المان‌هایی با خصوصیات صلبیه پوشانیده شده است و تنها در پشت نیمکره المان‌هایی با خصوصیات عصب را مشاهده خواهیم کرد. چون در سطح مقطعی که رشته‌های عصبی وارد می‌شوند، شکل هندسی موجود تقریباً نامنظم است (شکل ۱)، برای این که بتوانیم

چشم انسان به صورت پوسته‌ای کروی از جنس لایه‌ای سخت به نام صلبیه تشکیل شده است. چشم شامل یک قطب قدامی شفاف به نام قرنیه و یک قطب خلفی که محل خروج عصب بینایی است، می‌باشد. چشم از تعدادی لایه تشکیل شده است. لایه خارجی صلبیه، لایه لیفی سفید رنگی است، که عضلات محرکه چشم به این لایه می‌چسبند. بخش کوچکی از این لایه در جلو، تحدد بیشتری پیدا کرده و ضمن این که از ضخامت آن کاسته شده، کاملاً شفاف است و قرنیه نام دارد.

لایه داخلی چشم، شبکه نام دارد که بخش اعظم آن به عنوان شبکه بینا از چندین لایه سلول تشکیل شده است و ماهیت عصبی دارند. داخلی‌ترین این لایه‌ها عبارتند از: سلول‌های میله‌ای و مخروطی که به عنوان گیرنده‌های نوری تحریک را دریافت می‌کنند. در قطب خلفی بر روی این لایه، لکه زرد و نقطه کور دیده می‌شود که اولی محل دید دقیق و دومی محل تشکیل عصب بینایی است.

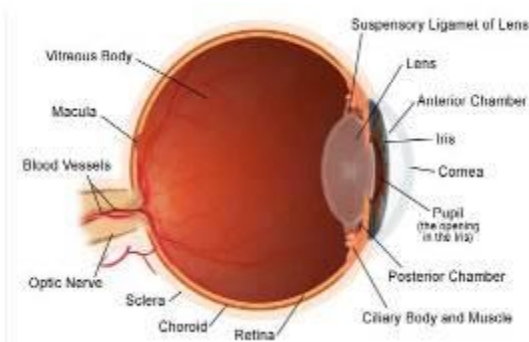
یکی از عناصر داخلی، عدسی چشم است. فاصله بین سطح عدسی و عنبیه را اتاق خلفی و فاصله بین عنبیه و قرنیه را اتاق قدامی چشم می‌گویند که از طریق مردمک به هم راه دارند. مایع زلالیه از زاویه اتاق خلفی ترشح می‌شود و ضمن پر کردن این دو فضا، مازاد آن از زاویه اتاق قدامی جذب می‌شود. اختلال در جذب و بالا رفتن فشار داخلی کره چشم و فشار بر عصب بینایی (Yablonski & Asamoto, 1993) می‌تواند منجر به عارضه آب سیاه (گلوکوم) گردد.

این بیماری با افزایش فشار داخل چشم، بزرگ شدن قطر قرنیه، ادم و بزرگ شدن کاپ عصب بینایی مشخص می‌شود (Abert & Jakobeic, 2000).

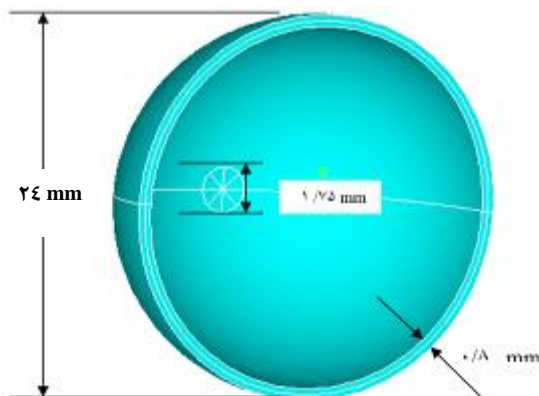
## مواد و روش‌ها

### بررسی و امکان مدل‌سازی

عصب بینایی از پشت کره چشم به آن وارد می‌شود



شکل ۲. شکل و ابعاد مدل شبیه‌سازی شده



شکل ۳. شکل و ابعاد مدل شبیه‌سازی شده

### مدل المان محدود

بر اساس تصاویر گرفته شده از بیمار و اندازه‌گیری ابعادی (Jonas *et al.*, 1988)، مدل چشمی مورد نظر با قطر ۲۴mm و ضخامت ۰/۸mm که سطح مقطع عصب ورودی به آن دایره‌ای به قطر ۱/۷۵mm باشد، ایجاد گردید (شکل ۳).

جدول ۱. جنس مواد تعریف شده در مدل المان محدود		
نوع	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون
صلبیه	۵۵۰۰	۰/۳۹
عصب	۵۵	۰/۴

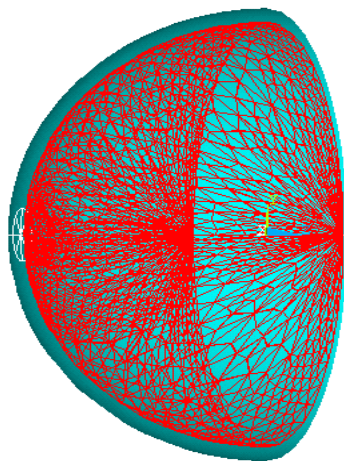
با توجه به تمرکز تأثیر فشار بر روی عصب بینایی، کافی است نیم‌کره‌ای با ضخامت ۰/۸mm که محل ورودی عصب را شامل می‌شود در نظر گرفته شود. مدل شبکیه چشم به صورت استوانه‌ای با قطاع‌های ۴۵° از یک دایره با عمق ۶ mm است.

این سطح مقطع را مدل کنیم خواص نیمی از این سطح را خواص صلبیه و خواص نیم دیگر را خواص عصب در نظر می‌گیریم و آنها را به صورت سطوحی متقارن مدل می‌کنیم. البته این روش مدل کردن در عمل هم صحیح است، چون در این سطح مقطع نسبت صلبیه و عصب تقریباً با هم برابر است. بنابراین خطای قابل ملاحظه‌ای ایجاد نخواهد شد.

اهمیت این بررسی از این جهت است که چون سطح مقطع عصب ورودی، شکل و جنس خاصی دارد، هر مقدار فشار داخلی چشم می‌تواند آن را متأثر سازد. پس فشار داخل چشم در همه حالات مهم است، مخصوصاً در زمانی که این فشار بالاتر از حد طبیعی برود، زیرا فشار بیش از حد در داخل چشم و در نتیجه تنش اضافی بر سطح مقطع عصب باعث خواهد شد خون‌رسانی عصب مختل شود و به عصب آسیب وارد شود که در نهایی‌ترین حالت آن منجر به نابینایی خواهد شد. همچنین روش کلینیکی مشخصی برای تعیین حساسیت عصب بینایی به فشارهای مختلف وجود ندارد و این امکان برای تعیین مقدار فشار چشم هر شخص بر عصب بینایی ضایعه‌ای که ایجاد می‌کند یا نه، وجود دارد تا ۲۴ ساعت چشم او دارای همان فشار باشد و مجدداً سلامت که عصب چشم بررسی شود. البته این نکته را هم باید خاطر نشان کرد که اختلال در کار عصب بینایی برای هر چشمی با هر فشاری ممکن است فرق کند. یعنی فشاری که در یک چشم ممکن است در کار عصب آن ایجاد اختلال کند، در چشم دیگر طبیعی باشد یا اینکه حداقل در کار عصب آن ایجاد اختلال نکند.

سطح مقطع‌های عصب (Quigley *et al.*, 1990) از لحاظ شکل هندسی نیز مهم هستند. در این مقاله یک عصب با سطح مقطع دایره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

یک شکل آناتومیکی از چشم به همراه نامگذاری اجزای آن در زیر نشان داده شده است.



شکل ۶. اعمال شرایط مرزی بر روی سطح داخلی نیمکره

به دلیل مشبک بودن محل ورود عصب توزیع قطاعی برای ناحیه اتصال عصب به صلبیه پیشنهاد گردیده است. این مدل قادر است تقریب خوبی از واقعیت را ایجاد کند که با بررسی بیشتر نتایج به این مهم پرداخته خواهد شد.

### نتایج

برای بررسی میزان تنش محاسبه شده، چشم به صورت یک کره یا مخزن تحت فشار (Timoshenko & Goodier, 1970) در نظر گرفته می‌شود. برای تنش در کره داریم:

$$\sigma = \frac{PR}{2t} \quad (\text{رابطه ۱})$$

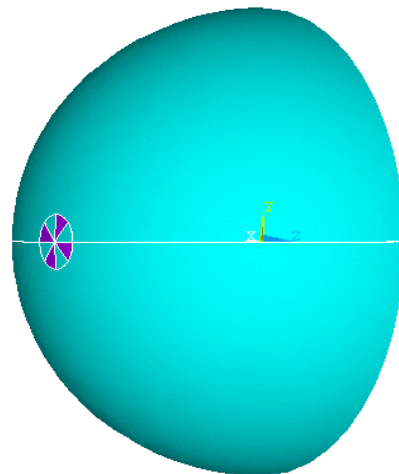
که  $\sigma$  تنش،  $P$  فشار داخل کره،  $R$  شعاع کره و  $t$  ضخامت دیواره کره می‌باشد. پس میزان تنش در صلبیه با افزایش فشار داخل چشم و شعاع کره چشم و کاهش ضخامت صلبیه افزایش می‌یابد. اگر ابعاد چشم مورد نظر در این فرمول جای‌گذاری شود، خواهیم داشت:

$$\sigma = \frac{(2\text{KPa})(12\text{mm})}{2(0.8\text{mm})} = 15\text{KPa} \quad (\text{رابطه ۲})$$

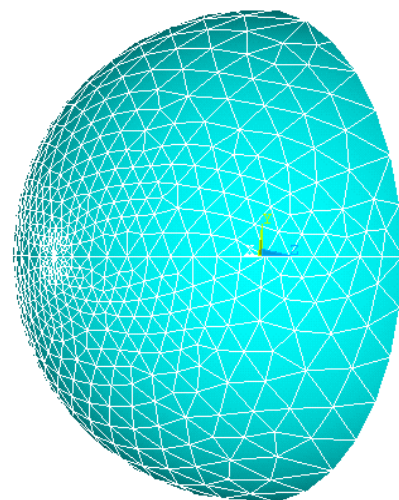
اما در کره دو تنش اصلی در پوسته کره وجود دارد (شکل ۷) و سومین تنش که شعاعی است دارای کمترین مقدار می‌باشد. نمای شماتیکی از تنش‌های

تمام سطح داخل صلبیه فرض شده و خواص صلبیه برای آن تعریف می‌شود (Dongqi & Zeqin, 1999). در پشت نیمکره هم قطاع‌ها به صورت یکی در میان صلبیه و عصب فرض شده و پشت نیمکره هم صلبیه در نظر گرفته شده است (شکل ۴).

با استفاده از المان solid 95 مش‌بندی مدل انجام شد (شکل ۵). شرایط مرزی بر سطح داخل نیمکره فشار  $2000\text{ Pa}$  اعمال شده است. برای اعمال قیدهای تکیه‌گاهی لبه نیمکره در جهت محور  $Z$  و یا به عبارتی در راستای عمود بر سطح دایره عظیمه نیمکره مقید گردیده است (شکل ۶).

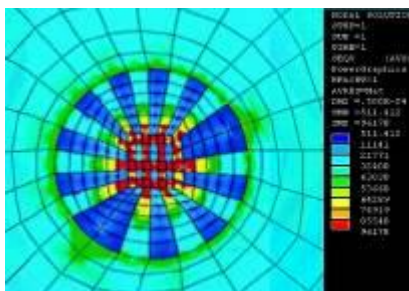


شکل ۴. محل اتصال عصب به صلبیه چشم



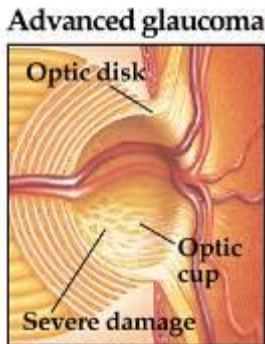
شکل ۵. نیمکره که با المان مفروض مش‌بندی گردیده است (solid 95).

پاتولوژیک، این منطقه زودتر تغییر شکل داده و سبب بروز عارضه‌های بینایی می‌شود. در این مقاله در محدوده محیط سطح مقطع عصب نیز تنش بالایی به میزان ۳۲/۴۰۰ Kpa مشاهده می‌شود که در کانتور تنش ارائه شده توسط Bellezza در حدود ۳۵/۶۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. قطع‌های تیره‌رنگ از جنس عصب و بقیه صلبیه می‌باشند (شکل ۹).



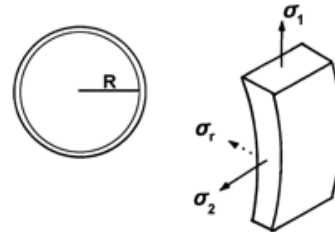
شکل ۹. توزیع تنش وون مایرز در شبکه عصبی چشم

وقتی تنش در پیرامون عصب بالا رود، رگ‌های خون رسان به عصب که عموماً از این منطقه می‌گذرند تنگ یا بسته شده، منجر به اختلال در کار عصب بینایی می‌شوند. شکل زیر تصویری از سطح مقطع عصب بینایی در یک بیماری گلوکوم پیشرفته را نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌کنید تنش در حاشیه دیسک اپتیک (Hayreh, 1974) و مرکز آن در خون‌رسانی به عصب، ایجاد اختلال می‌کند.



شکل ۱۰. مقطع عصب بینایی در یک بیماری گلوکوم پیشرفته

اصلی در پوسته کره در شکل زیر نشان داده شده است.



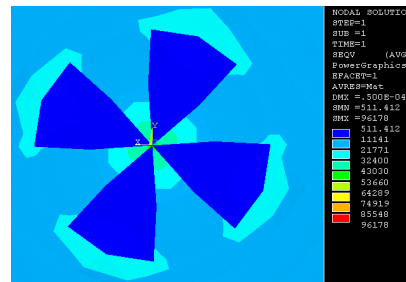
شکل ۷. تنش‌های اصلی در کره

ترکیب این دو تنش اصلی، تنش کل در دیواره کره یا صلبیه را می‌دهد بنابراین خواهیم داشت: (رابطه ۳)

$$\sigma_{sclera} = \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2}$$

$$\Rightarrow \sigma_{sclera} = \sqrt{(15)^2 + (15)^2} = 21.21 KPa$$

این مقدار، میزان تنش در صلبیه را به ما نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده از فرمول‌ها، مقدار تنش در لایه صلبیه چشمی با ابعاد ذکر شده برابر ۲۱/۲۱ Kpa بود که همانطور که در نتیجه المان محدود به دست آمده مقدار آن ۲۱/۷۷۱ Kpa می‌باشد بیشترین میزان تنش در منطقه مرکزی مشاهده می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸. کانتور تنش وون مایرز و توزیع آن در محل اتصال عصب

مقدار محاسبه شده در این مقاله ۶۴۲۸۹ Pa است که در کانتور تنش ارائه شده توسط Bellezza (Anthony et al., ۲۰۰۰ تا ۷۱۱۰۰ پاسکال) به دست آمده است. بدیهی است در فشارهای (2000

### بحث و پیشنهاد و کار آینده

در این پروژه به بررسی اثرات فشار داخلی چشم بر عصب بینایی پرداخته شد و ملاحظه شد که به سبب ابعاد و جنس سطح مقطع عصب و همچنین فشار داخل چشم، میزان تنش نسبتاً زیادتری در محدوده مرکز و محیط سطح مقطع عصب مشاهده می‌شود که این مقدار زیاد تنش ممکن است سبب آسیب به عصب بینایی شود. مقادیر تنش با استفاده از ابعاد چشم و عصب محاسبه شده است و تشخیص این که آیا این فشارها و تنش‌ها پاتولوژیک هستند یا نه موضوع دیگری است. زیرا یک فشار یا یک تنش ممکن است در چشم فردی منجر به ضایعه عصبی شود، حال آن که برای فرد دیگری طبیعی باشد که این جزو بحث‌های مهم چشم پزشکی است که هنوز هم تحقیقات روی آن ادامه دارد.

منحصر به فرد بودن ضایعات عصب بینایی برای هر فرد ناشی از خصوصیات فیزیکی بافت‌های فرد نیز می‌باشد. به عنوان مثال صلبیه می‌تواند در برخی افراد از سختی بیشتر برخوردار باشد و در برخی دیگر دارای سختی کمتری باشد که این امر خواص متفاوت ماده را سبب خواهد شد پس راهکار پیشنهادی اندازه‌گیری

دقیق خصوصیات بافت هر فرد با توجه به دیگر عوامل مثلاً سن فرد، عوامل هورمونی و ... می‌باشد. همچنین باید به خصوصیات و ابعاد مواد دیگر مرتبط با این تنش‌ها مثلاً مویرگ‌ها توجه نمود. اما در بررسی انجام شده بافت‌ها ایزوتروپیک فرض شدند، حال آن که در شرایط واقعی بافت ایزوتروپیک نیست و رفتار غیرخطی دارد. بنابراین انجام این محاسبه در شرایط غیرخطی و غیر ایزوتروپیک می‌تواند هرچه بیشتر ما را به واقعیت نزدیک سازد. نکته دیگر این که در این مقاله خصوصیات بافت‌های دیگر نظیر مشیمیه و زجاجیه در نظر گرفته نشده‌اند که لحاظ نمودن آنها نیز می‌تواند ما را به شرایط طبیعی نزدیک‌تر سازد.

### سپاسگزاری

بدینوسیله مراتب قدردانی و سپاس نویسنده از آقای مهندس حسن خنیفه، سرکارخانم دکتر سیده زهرا حسینی‌نژاد، آقای دکتر ابراهیم روغنی‌زاد، آقای مهندس فردین قویدل، آقای مهندس نوید رسالت و آقای مهندس سید حمیدرضا کسای‌زادگان که در مراحل مختلف انجام این پروژه، اینجانب را یاری نمودند و متحمل زحمات زیادی شدند، اعلام می‌گردد.

### REFERENCES

- Abert & Jakobeic.; (2000) Principles and practice of ophthalmology, Forth edition, Philadelphia, Pensilvania, Saunders, 2663-2676.
- Anthony, J.; Bellezza Richard T.; Hart Claude, F.; (2000) Burgoyne The Optic Nerve Head as a Biomechanical Structure: Initial Finite Element Modeling Investigative Ophthalmology & Visual Science, 41(10). Copyright © Association for Research in Vision and Ophthalmology 2991.
- Britton, RJ.; Drance, SM.; Schulzer, M.; Douglas, GR.; Mawson, DK.; (1987) The area of the neuroretinal rim of the optic nerve in normal eyes. Am J Ophthalmol, 103: 497-504.
- Dongqi, H.; Zeqin, R.; (1999) A biomathematical model for pressure-dependent lamina cribrosa behavior. J Biomech, 32: 579-584.
- Hayreh, SS.; (1974) Pathogenesis of cupping of the optic disc. Br J Ophthalmol, 58: 863-76.
- Jonas, JB.; Gusek, GC.; Guggenmoos-Holzmann, I.; Naumann, GOH.; (1988) Size of the optic nerve scleral canal and comparison with intravital determination of optic disc dimensions. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 226: 213-215.
- Quigley, HA.; Brown, AE.; Morrison, JD.; Drance, SM.; (1990) The size and shape of the optic disc in normal human eyes. Arch Ophthalmol, 108: 51-57.

Timoshenko, SP.; Goodier, JN.; (1970)  
Theory of Elasticity. 3<sup>rd</sup>ed. New York:  
McGraw-Hill.  
Yablonski, ME.; Asamoto, A.; (1993) Basic

sciences in clinical glaucoma: hypothesis  
concerning the pathophysiology of optic  
nerve damage in open angle glaucoma. J  
Glaucoma, 2: 119-127.