اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبرنوری- ۶ آبان ۱۴۰۰
ICOFS 2021
1st Iranian Conference on Optical Fiber Sensors
October 28, 2021
پژوهشکده لیزر و پلاسما

مدل‌سازی آکسون میلین‌دار سلول عصبی مغز بعنوان موجبرنوری

مرضیه امیدی[۱]، محمد اسماعیل زیبائی[۲] ، نصرتا... گرانپایه[۱]

[۱] گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
[۲] پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
m_zibaye@sbu.ac.ir

چکیده: انتقال و پردازش اطلاعات عصبی در سیستم عصبی نقش کلیدی در عملکرد آن دارد که می‌تواند توسط سیگنال الکتروشیمیایی تولید شده در کانال‌های یونی و یا بیوفوتون‌های شناخته شده در سلول عصبی انجام شود. یکی از چالش‌هایی که پژوهشگران با آن روبه رو هستند یافتن مسیر انتقال فوتون‌ها در سلول عصبی است. که آکسون‌های میلین‌دار با توجه به ساختار موجبرگونه آن‌ها نامزد مناسبی برای انتقال سیگنال‌ها و فوتون‌ها است. از طرفی با ظهور بیماری‌های همچون MS و اختلال در تولید و انتقال سیگنال عصبی به دلیل از بین رفتن لایه‌ی میلین، اهمین شناخت موجبری آکسون میلین‌دار را دوچندان می‌کند. در این مقاله، انتقال فوتون و پرتو با در نظر گرفتن ناحیه پارانود، گره رانویه و در شرایط دمیلینه شدن لایه‌ی میلین برای درک بهتر سیگنالینگ عصبی و استفاده از نتایج آن برای بهبوذ روش‌های نوری همچون اپتوژنتیک بررسی شده است.

کلید واژگان: فیبرعصبی، **آکسون** میلین‌دار، انتشار فوتون، موجبر نوری.

Simulation of Myelinated Axons of Brain Nerve Cells as an optical waveguide

Marzieh Omidi[1], Mohammad Ismail Zibaii[2], Nosrat Granpayeh[1]

[1]Telecommunication Dept., Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[2]Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract- Information transmission and processing are playing an essential role in the neural system, which can be done by electrochemical signals produced in ion channels or known biophotons in the nerve cell. One of the challenges that researchers face is finding the path of photon transmission in the nerve cell. Myelinated axons are a good candidate for transmitting signals and photons due to their waveguide structure. On the other hand, with the emergence of diseases such as MS and disorders in the production and transmission of nerve signals due to the demyelination, Understanding the properties of the myelinated axon as a waveguide is getting more important. In this paper, a better understanding of neural signaling in the myelinated axon as a waveguide and use its results to enhance optical methods such as optogenetics, light transmission by considering the paranode region, the Ranvier node, and the demyelination of myelin sheath in nerve fiber are investigated.

Keywords: Nerve fiber, Myelinated axons, Photon transmission, Waveguide.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

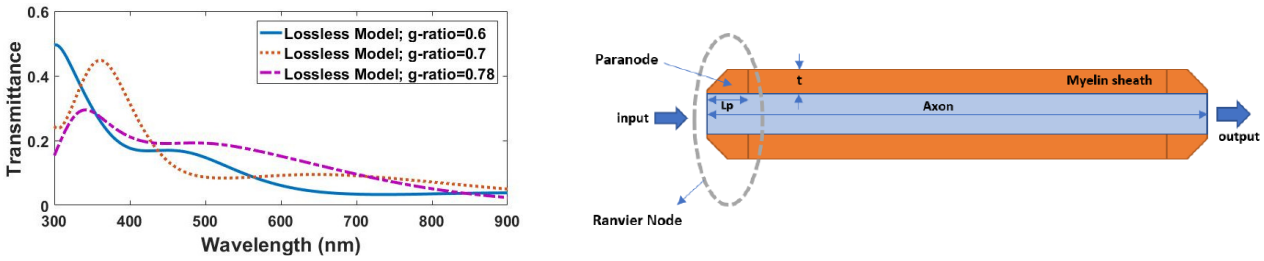
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]

۱- مقدمه

به دلیل ماهیت پیچیده ارتباطات عصبی، همیشه مطالعه‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی ارتباطات سلول‌های عصبی با یکدیگر، با هدف درک بهتر پیام‌رسانی سلولی انجام شده است [۱]. علاوه بر سیگنال عصبی تولید شده توسط کانال‌های یونی [۲] بیوفوتون‌های تولید شده در سلول عصبی توسط فعل و انفعالات شیمیایی نیز در پیام‌رسانی عصبی و انتقال اطلاعات نقش مهمی دارد [۳]. بیوفوتون‌ها در تمام سلول‌های زنده و به خصوص در سلول‌های عصبی تولید می‌شوند[۴]. انتشار فوتون‌های تولید شده توسط نورون یا منابع خارجی باید در مسیر مناسبی انتشار پیدا کنند که آکسون میلین‌دار نامزد مناسبی است. در این مقاله بر روی مدل‌های سه بعدی آکسون میلین‌دار[۱] از نظر مهندسی تمرکز و انتقال فوتون درون آن با در نظر گرفتن تغییر ضخامت لایه‌ی میلین، طول گره رانویه[۲]، و همچنین دمیلینه شدن[۳] این لایه در ضخامت‌های متفاوت به کمک روش انتگرال المان محدود[۴] در نرم افزار CST Studio Suite تجزیه و تحلیل شده است.

۲- بررسی انتشار فوتون در آکسون میلین‌دار

برای بررسی انتشار فوتون مطابق شکل۱(الف)، آکسون میلین‌دار را با ناحیه‌ی پارانود در ابتدا و انتها آن در نظر گرفته شده است. ضریب شکست آکسون، میلین و محیط اطراف به ترتیب ۱/۳۸، ۱/۴۴ و ۱/۳۴ است [۵].



(ب) (الف)

شکل۱- بررسی تاثیر تغییر ضخامت میلین بر انتشار فوتون (الف) آکسون میلین‌دار با حضور ناحیه‌ی پارانود [۳] (ب) طیف انتقال فوتون

ارتباط ضخامت لایه‌ی میلین و شعاع آکسون توسط پارامتری به نام $g-ratio$ تعیین و به کمک رابطه زیر تعریف می‌شود.

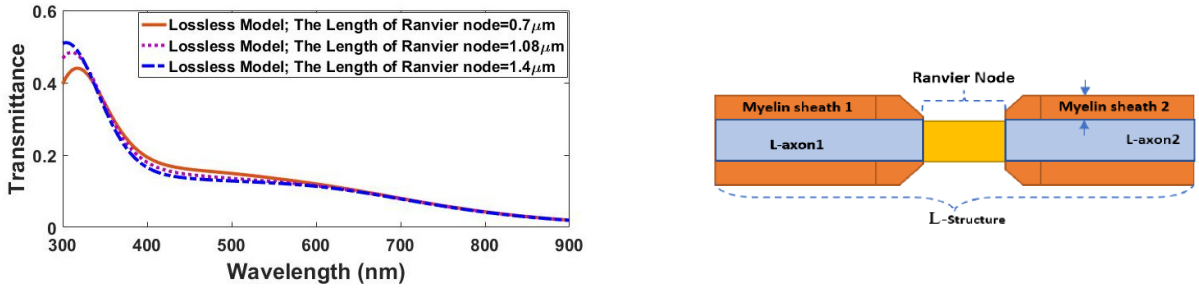
$$g-ratio = 2r_{Axon} \Big/ \left(2r_{Axon} + 2t_{Myelin}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، r_{Axon} و t_{Myelin} به ترتیب شعاع آکسون و ضخامت میلین است. در این مدل‌سازی‌ها، $g-ratio$ را به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۷ و۰/۶، طول و شعاع آکسون را به ترتیب ۲۷میکرومتر و ۰/۴ میکرومتر، ناحیه‌ی پارانود[۵] ۰/۵ میکرومتر و طول گره رانویه را به ترتیب ۰/۷، ۱/۰۴ و۱/۸ در حالت بدون تلفات لایه‌ی میلین در نظر گرفته شده است [۳]. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۱ (ب)، روند نزولی در بازه طول موجی ۳۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد که به دلیل نزدیک شدن به طول موج قطع آکسون میلین‌دار و انتشار تک مد است. در حالی‌که در طول‌موج‌های کمتر انتشار چند مد رخ می‌دهد، با کاهش $g-ratio$ و در نتیجه آن افزایش ضخامت میلین، انتقال فوتون افزایش می‌یابد که این افزایش از هم‌فاز بودن مدهای هدایتی ناشی و باعث تقویت شدت انتشار فوتون‌ها می‌شود یا به عبارتی نشان دهنده ایجاد یک تداخل سازنده است.

[1] Myelinated Axon
[2] Ranvier Node
[3] Demyelination
[4] Finite Integration Technique: FIT
[5] Paranode

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

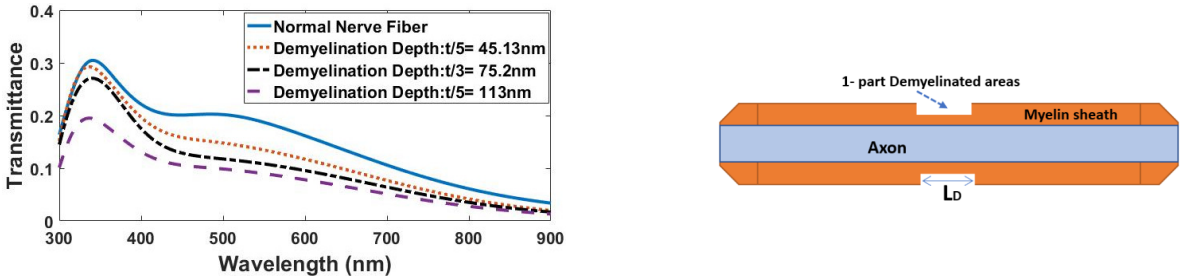
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]



(ب) (الف)

شکل۲- بررسی تاثیر تغییر طول گره رانویه بر انتشار فوتون درآکسون میلین‌دار (الف) آکسون میلین‌دار دارای گره رانویه[۳] (ب) طیف انتقال فوتون

با تغییر طول گره رانویه، تغییراتی در تعداد مدهای هدایتی و تداخل آن‌ها ایجاد می‌شود. افزایش طول گره رانویه در شکل ۲(ب) باعث افزایش انتقال فوتون می‌شود. تفاوت ضریب شکست آکسون جایی‌که گره قرار دارد با محیط اطراف کمتر از تفاوت ضریب‌شکست آکسون با لایه‌ی میلین است در نتیجه پرتوها کمتر دچار شکست و پراکندگی می‌شوند در نتیجه هرچه طول گره بیشتر، شکست و پراکندگی فوتون کمتر و انتقال فوتون بیشتر می‌شود.



(ب) (الف)

شکل۳- بررسی اثر دمیلینه شدن آکسون میلین‌دار (الف) آکسون میلین‌دار دمیلینه شده [۳] (ب) طیف انتقال فوتون

دمیلینه شدن فیبرعصبی عامل ایجاد بیماری‌های مختلفی از جمله MS و اختلال در پیام‌رسانی عصبی است. که در شکل۳ (ب) این اثر با تغییر ضخامت در یک ناحیه بررسی شده است. با افزایش ضخامت، انتقال فوتون کاهش می‌یابد و تعداد فوتون بیشتری دچار بازتاب رو به عقب و پراکندگی در مایع خارج سلولی می‌شود.

به طورخلاصه، در این مقاله ویژگی‌های موجبری آکسون میلین‌دار به عنوان عضو کلیدی در انتقال سیگنال‌های عصبی در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر حضور گره رانویه، تغییر ضخامت و دمیلینه شدن لایه‌ی میلین بررسی شد. شناخت رفتار نوری سلول عصبی در مقیاس میکرومتر می‌تواند در روش‌های تحریکات نوری مبتنی بر تکنیک اپتوژنتیک، مغز بر روی تراشه، و یا مدولاسیون نوری سیستم‌های عصبی مورد استفاده قرار گیرد. خاصیت موجبری سلول‌های عصبی می‌تواند در توسعه تجهیزات نوری مبتنی بر ساختارهای زیستی از قبیل سوئیچ های نوری و لیزرهای زیستی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین اندازه‌گیری خصوصیات نوری سلول‌های عصبی می‌تواند معیار بسیار خوبی در تشخیص‌های زود هنگام بیماری‌های عصبی از قبیل MS باشد.

مراجع

1. A. Zangari, *et. al.* **Scientific Reports 8**(1) 539, (2018).
2. M.S. Gazzaniga, *et. al. Cognitive Neuroscience the Biology of the Mind*, W. W. Norton & Company, Ch. 2, (2014).
3. A. Maghoul, *et. al.* **IEEE Access 9**(1) 35399, (2021).
4. R. Tang, *et. al.* **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 139**(1) 71, (2014).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]