



ردیابی سه بعدی اسپرم گاوی با میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی

نگار عزیزی^۱، اکرم نجفلو^۱، محمد اولین چهارسوقی^{۲،۱}، رسول کوثر^۳، رضا معصومی^۴، احسان احدی اخلاقی^{۲،۱}

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱

^۲مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱

^۳گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان کد پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

^۴گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۳۷۱-۳۸۷۹۱

چکیده - دستیابی به مشخصه‌های دینامیکی ذرات در حوزه‌های فیزیک زیستی و فیزیک مواد نرم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله روشی تجربی برای ردیابی سه بعدی اسپرم گاوی به عنوان یک نمونه زیستی متحرک با استفاده از میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی ارائه شده است. اساس این کار بر پایه‌ی پردازش تصویر و همچنین بهره‌گیری از اطلاعات بازیابی شده از طریق ثبت تمام نگاشت است. میکروسکوپ تمام نگاری دیجیتالی پیاده سازی شده دارای اندازه پیکسل معادل با ۱۷۵ نانومتر و توان تفکیک بهتر از ۲/۱۹ میکرومتر است. با استفاده از این میکروسکوپ مسیر حرکت سه بعدی نمونه‌ها در فضا و زمان تعیین و میانگین سرعت حرکت نمونه‌ها ۱۲۷/۵۱ میکرومتر بر ثانیه اندازه گیری شد.

کلید واژه - اسپرم، تحرک پذیری، ردیابی سه بعدی، میکروسکوپی تمام نگار دیجیتالی.

Three-dimensional tracking of bovine sperm by digital holographic microscopy

Negar Azizi¹, Akram Najafloo¹, Mohammad A. Charsooghi^{1,2},
Rasoul Kowsar³, Reza Masoumi⁴, Ehsan A. Akhlaghi^{1,2}

¹Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran

²Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran

³Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran

⁴Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, 45371-38791, Iran

Abstract- Finding dynamical characteristics of particles has an especial importance in the area of soft and biological physics. This work introduces an experimental method to track bovine sperm in three dimension as movable bio particles by applying digital holographic microscopy. The work is based on applying image-processing methods and using the obtained information from the hologram record. Pixel

size and Resolution of this microscope measured 175 nanometer and better than 2.19 micrometer respectively. We found the coordinates of the particles in three dimension. The average speed of the samples measured 127.51 micrometer per second.

Keywords: 3D Particle Tracking, Digital Holographic Microscopy, Motility, Sperm.

تمام‌نگاری دیجیتالی به دو روش روی محور و خارج محور انجام می‌گیرد. در روش روی محور، دو باریکه شیء و مرجع در یک راستا با هم تداخل می‌کنند و طرح تداخلی حاصل روی صفحه آشکارساز ثبت می‌شود. اما در روش خارج از محور، دو باریکه شیء و مرجع به صورت زاویه‌دار با هم تداخل می‌کنند. در این مقاله از روش میکروسکوپی تمام‌نگاری دیجیتالی روی محور برای ردیابی سه‌بعدی اسپرم‌های گاوی و محاسبه پارامترهای حرکتی آن‌ها استفاده شده است.

۲- مبانی نظری

میکروسکوپی تمام‌نگاری دیجیتالی یک روش غیرتماسی، غیرمخرب و پرکاربرد برای تصویربرداری سه‌بعدی است. این روش شامل دو مرحله ثبت و بازسازی است. ابتدا طرح تداخلی ناشی از نور مربوط به جسم و مرجع که حاوی اطلاعات دامنه‌ای و فازای آن است به صورت تمام‌نگاشت ثبت می‌شود. تمام‌نگاشت به عنوان تصویر دیجیتال در کامپیوتر ذخیره می‌شود. و سپس با استفاده از روش‌های عددی، اطلاعات بعد سوم استخراج می‌شود. در این مرحله به یک ساختار سه‌بعدی از شیء با استفاده از تمام‌نگاشت دو بعدی آن روی پرده (دوربین) دست می‌یابیم. به عبارتی دیگر جبهه موج شیء را بازسازی می‌کنیم. یکی از روش‌های بازسازی عددی، رهیافت انتشار طیف زاویه‌ای است. که در این مقاله نیز از این روش استفاده شده است. در این روش به صورت عددی فرض می‌شود که یک موج مرجع $U(x, y, 0)$ تمام‌نگاشت را روشن کرده و موج پراشیده از آن با استفاده از تبدیل فوری به جبهه موج‌های تخت تشکیل‌دهنده آن تجزیه می‌شود و با رابطه زیر بیان می‌شود:

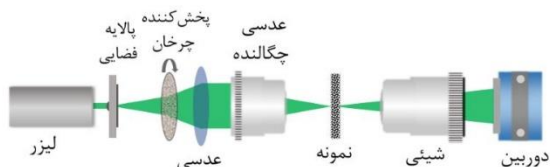
$$A_0(f_x, f_y, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (1)$$

f_x و f_y فرکانس‌های فضایی در امتداد محورهای x و y هستند. پس مطابق با رابطه (۲) هر جبهه موج تخت به صورت عددی به اندازه d_z در فضا منتشر می‌شود. سپس با فیلتر مناسب مرتبه‌های اضافی حذف می‌شوند و با اعمال تبدیل فوری معکوس، موج پراشیده شده در فاصله d_z از تمام‌نگاشت تشکیل می‌شود [۴].

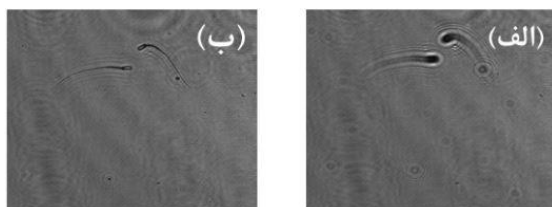
۱- مقدمه

تکنیک ردیابی ذرات، امکان دستیابی به مشخصات دینامیکی آن‌ها را با دقت قابل ملاحظه‌ای در بازه‌های فضایی میکرومتری و حتی نانومتری فراهم می‌کند. از این رو در حوزه‌هایی چون، فیزیک زیستی و فیزیک مواد نرم برای مطالعه مواردی از قبیل فرآیند انتقال در سلول‌ها و باکتری‌ها و برهمکنش بین ذرات کلوئیدی مورد توجه قرار گرفته است. ردیابی ذره در صفحه نسبتاً ساده است. متداول‌ترین روش برای ردیابی دو بعدی، پیدا کردن مرکز شدت ذره برای هر تصویر از فیلم‌های ویدیویی است [۱]. اما میکروسکوپ‌های رایج قادر به مشخص کردن مسیر حرکت سه‌بعدی ذره در طول زمان نیستند. در صورتی که دستیابی به اطلاعات دقیق از موقعیت ذره و نزدیک‌تر شدن هرچه بیشتر به آن چه در واقعیت و در طی فرآیندهای زیستی رخ می‌دهد، مستلزم پیدا کردن راه حلی برای ردیابی سه‌بعدی ذرات میکرونی است. طی دو دهه اخیر روش‌های مختلفی برای حل مشکلات مرتبط با سنجش موقعیت ذره در عمق پیشنهاد شده است، که تمام‌نگاری دیجیتالی و ردیابی ذرات فلورسانسی از جمله روش‌های سرآمد در این زمینه هستند [۲ و ۳]. سلامت باروری در گونه مذکر، چه در انسان‌ها و چه در حیوانات یک زمینه تحقیقاتی مهم در مطالعات زیستی است. همچنین تلقیح مصنوعی یک کار مهم در گسترش گله‌ای با ارزش اصلاحی بالا است. وقتی که دام‌ها به این شیوه آبستن می‌شوند، از جهات بسیاری به آینده‌ی گله و اقتصاد حاصل از آن کمک می‌شود. هرچند تلقیح مصنوعی هزینه‌ای به مراتب کمتر نسبت به تلقیح طبیعی دارد، اما در نتیجه بهتر و در آینده مقرون به صرفه تر است. بنابراین ردیابی سه‌بعدی و تعیین الگوی حرکتی اسپرم‌های گاوی برای تعیین مناسب‌ترین الگو به منظور افزایش احتمال باروری در گاوهای ماده، هدف این مقاله است. از این رو ریخت‌شناسی، میزان تحرک‌پذیری و غلظت سلول‌های اسپرم در یک واحد حجم مشخص، پارامترهای تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به این مهم هستند. روش تمام‌نگاری دیجیتالی یک روش به روز و جذاب در این حوزه است. تصویربرداری تمام‌نگاری دیجیتال از سلول‌های زنده در حوزه‌ی زیست‌پزشکی به سرعت در حال پیشرفت است [۶].

نمونه و باریکه مرجع بعد از عبور از عدسی شیئی (NA=0.25) با هم تداخل کرده و طرح تداخلی حاصل بر روی صفحه‌ی (10x) مشاهده (Thorlabs, DCC 1545M) ثبت و برای تحلیل به رایانه منتقل می‌شود. استفاده از پخش‌کننده چرخان و در نتیجه کاهش همدوسی نور فرودی از ایجاد بسیاری از تداخل-های ناخواسته جلوگیری کرده و منجر به ثبت تمام‌نگاشت‌هایی با کیفیت بهتر می‌شود. شکل ۲(الف) تصویر یک تمام‌نگاشت ثبت شده نوعی را در حالت قبل از انتشار و شکل ۲(ب) همان تصویر را در حالت بعد از انتشار نمایش می‌دهد.



شکل ۲: طرح کلی چیدمان میکروسکوپی تمام‌نگاری دیجیتال.



شکل ۳: تمام‌نگاشت‌های ثبت شده از اسپرم‌های گاوی: (الف) قبل از انتشار عددی و (ب) بعد از انتشار عددی.

۳-۲- آماده سازی نمونه

در این مرحله، باید اسپرم‌های گاوی منجمد، طی فرآیندی، یخ-زدایی، رقیق و برای تصویربرداری در دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد آماده می‌شدند. ابتدا، برای این منظور حجم نهایی رقیق‌کننده ۱۰۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شد. ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر داخل بشر ریخته شد و سپس ۳/۶۳۴ گرم تریس و ۱/۹۹ گرم اسید سیتریک به آن اضافه و بر روی هات پلیت استیرر قرار داده شد تا به خوبی حل شوند. پس از آن ۰/۵ گرم فروکتوز هم اضافه و حجم نهایی با اضافه کردن مجدد آب مقطر به ۱۰۰ میلی‌لیتر افزایش داده شد. سپس پایوت حاوی اسپرم‌های فریز شده که در تانک ازت در دمای ۱۹۶- درجه‌ی سانتیگراد قرار داشتند توسط حمام بن‌ماری یخ‌زدایی و با استفاده از رقیق‌کننده به نسبت ۱ به ۱۰۰ رقیق شد. در ادامه مقداری از آن به داخل محفظه‌ای مخصوص در محل نمونه قرار گرفته بر گرم‌کن الکتریکی در چیدمان آزمایش تزریق شد.

$$U(x, y, d_z) = F^{-1} \text{filt}[FU(x, y, d_z)] \times \exp[ik\sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2} d_z] \quad (2)$$

توزیع شدت و فاز موج ناشی از جسم به ترتیب از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آیند:

$$I(x, y, d_z) = |U(x, y, d_z)|^2 \quad (3)$$

$$\varphi(x, y, d_z) = \arctan \frac{\text{Im}[U(x, y, d_z)]}{\text{Re}[U(x, y, d_z)]} \quad (4)$$

به این ترتیب، شدت و فاز نمونه در فاصله d_z برای هر تصویر محاسبه می‌شوند. با بررسی تباین شدت برای تصاویر به دست آمده در گام‌های d_z متفاوت و نسبت دادن عمق مربوط به بیشینه تباین به حالت فوکوس، محل ذره تعیین می‌شود. برای محاسبه تباین شدت از روابط (۵) و (۶) استفاده می‌شود:

$$C_0 = \frac{I_{\text{Max}}(x, y, d_z) - I_{\text{Min}}(x, y, d_z)}{I_{\text{Max}}(x, y, d_z) + I_{\text{Min}}(x, y, d_z)} \quad (5)$$

$$C = \frac{C_0}{d_{\text{Min}}} \quad (6)$$

که $I_{\text{Max}}(x, y, d_z)$ و $I_{\text{Min}}(x, y, d_z)$ به ترتیب شدت بیشینه و شدت کمینه برای هر تصویر و همچنین d_{Min} نیز فاصله کمینه بین شدت بیشینه و شدت کمینه بر حسب پیکسل در هر تصویر است. به این ترتیب d_z محل بیشینه تباین برای هر تصویر را به دست می‌دهد، که عمق نمونه یا همان بعد سوم خواهد بود.

۳- شرح آزمایش و نتایج تجربی

۳-۱- چیدمان آزمایش

در این پژوهش از هندسه تمام‌نگاری روی محور استفاده شده است. شکل ۱ طرح کلی چیدمان میکروسکوپی تمام‌نگاری دیجیتال را نمایش می‌دهد. باریکه‌ی نور همدوس لیزر ($\lambda = 532 \text{ nm}$, 10 mW) پس از عبور از پالایه‌ی فضایی به صورت واگرا از یک پخش‌کننده چرخان عبور می‌کند و در ادامه وارد یک عدسی شده و به صورت موازی از آن خارج می‌شود. سپس نور موازی وارد یک عدسی چگالنده شده و پس از خروج از آن سطح نمونه را روشن می‌کند. نمونه مورد بررسی درون محفظه‌ای متشکل از یک لام و لامل قرار دارد که با استفاده از چسب دو طرفه تهیه شده است. محفظه حاوی نمونه بر روی دستگاه گرم‌کن الکتریکی با قابلیت تنظیم دمای نمونه در ۳۸ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. باریکه پراکنده شده از

۳-۳- نتایج تجربی

حرکتی میانگین اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش آمده است که به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: سرعت در مسیرهای واقعی (Curvilinear ar Velocity)، سرعت در مسیر مستقیم (Straight line Velocity)، سرعت میانگین (Average pass Velocity)، درصد خطی بودن حرکت (Linearity)، درصد مستقیم الخط بودن حرکت (Straightness) و میزان تحرک اسپرم‌ها (Wobble) [۷]. این روش قادر به اندازه‌گیری پارامترهایی مثل، تحرک‌پذیری، سرعت و ضریب پخش در شرایط مختلف خواهد بود که در آینده به آن‌ها خواهیم پرداخت.

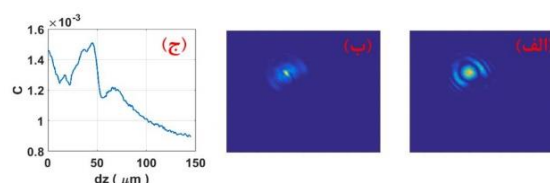
جدول ۱: انواع پارامترهای حرکتی میانگین اسپرم‌های گاوی.

VCL ($\frac{\mu m}{s}$)	VSL ($\frac{\mu m}{s}$)	VAP ($\frac{\mu m}{s}$)	LIM (%)	STR (%)	WOB (%)
۲۶۹٫۱۵	۷۹٫۹۴	۱۲۷٫۵۱	۲۹٫۷	۶۲٫۶۹	۴۷٫۳۷

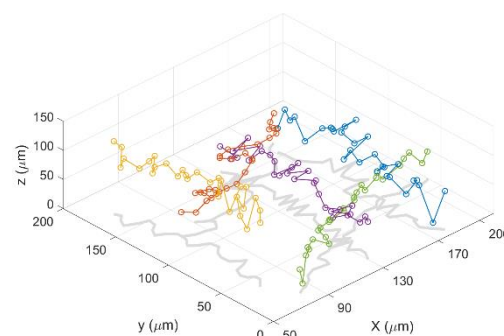
مراجع

- [1] M. J. Saxton and K. Jacobson. "Single-particle tracking: applications to membrane dynamics" Annual review of biophysics and biomolecular structure, 1997.
- [2] Lee, Sang-Hyuk, et al. "Characterizing and tracking single colloidal particles with video holographic microscopy" Optics Express, 2007.
- [3] Speidel, Michael, et al. "Three-dimensional tracking of fluorescent nanoparticles with subnanometer precision by use of off-focus imaging" Optics Letters, 2003.
- [4] T-C. Poon, J-P. Liu. "Introduction to modern digital holography: with MATLAB" Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2014.
- [5] P. Taghilou, B. Rostami, et al. "Effects of supplementation of the Tris-egg yolk extender with n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs) on frozen-thawed ram semen characteristics" Small Ruminant Research, 2017.
- [6] G. Di Caprio, M. A. Ferrara, et al. "Holographic imaging of unlabelled sperm cells for semen analysis: a review" Journal of biophotonics, 2015.
- [7] Mortimer, Sharon. T. "CASA-practical aspect" Journal of andrology, 2000.

با تحلیل تمام‌نگاشت‌های ثبت شده، تصاویر فوکوس از آن‌ها به‌دست آمد که با استفاده از روش‌های پردازش تصویر مکان دو بعدی و با معین بودن میزان انتشار برای رسیدن به تصویر فوکوس، مکان نمونه‌ها در عمق نیز به دست آمد. که بر اساس آن‌ها دینامیک حرکتی ذرات و مسیر حرکت اسپرم‌های گاوی تعیین شد. شکل ۳ فرآیند تحلیل تمام‌نگاشت را نشان می‌دهد. به‌طوری که شکل ۳(الف) نشان‌دهنده نمونه در حالت غیر فوکوس و قبل از انتشار عددی، شکل ۳(ب) نشان‌دهنده نمونه در حالت فوکوس و بعد از انتشار عددی است و شکل ۳(ج) نمودار تباین شدت بر حسب گام‌های انتشار را نمایش می‌دهد که تعیین‌کننده عمق نمونه در حالت بیشینه تباین شدت است. شکل ۴ نیز به عنوان نمونه، مسیر حرکت پنج اسپرم را برای غلظت ۱۲۵۰ اسپرم بر میکرولیتر در سه‌بعد نمایش می‌دهد.



شکل ۳: فرآیند تحلیل تمام‌نگاشت: (الف) نمونه در حالت غیر فوکوس و قبل از انتشار عددی، (ب) نمونه در حالت فوکوس و بعد از انتشار عددی، (ج) نمودار تباین شدت بر حسب گام‌های انتشار.



شکل ۴: مسیر حرکت سه‌بعدی مربوط به پنج اسپرم متفاوت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر میکروسکوپی تمام‌نگاری دیجیتال برای ردیابی سه‌بعدی اسپرم‌های گاوی ارائه شد. که با استفاده از میکروسکوپی تمام‌نگاری دیجیتال روی محور و با بهره‌گیری از منبع نور همدوس این امکان را فراهم می‌کند که مسیر سه‌بعدی اسپرم‌های گاوی تعیین شوند. در جدول ۱ پارامترهای