

**Applied molecular biology**

Vol.4, issu.6, Spring. 2025

P.P 53-69

## **Cancer cell division arrest in an electromagnetic field gradient simulated by COMSOL modeling software**

**Sajede Ebrahim Damavandi<sup>\*1</sup>, Leyla Sadat Miri<sup>2</sup>, Kimiya Gharagozlo<sup>3</sup>**

1. Biology Department, Farhangian university, Tehran, Iran. (Corresponding Author: sajede6363@gmail.com, e.damavandi@ut.ac.ir, orcid: 0000-0001-5738-6440)

2. Farzanegan High School, Tehran, Iran

3. Farzanegan High School, Tehran, Iran

Article history:

Received:13/05/2025    Revised:26/05/2025    Accepted:11/06/2025

### **Abstract**

**Objective:** Cancer is considered as one of the leading causes of death worldwide. Among them, metastasis is the most common cause of cancer death. Metastasis means the growth, spread and invasion of tumor cells to different parts of the body. The reason for cancer metastasis and spread throughout the body is the presence of tumor cells in the bloodstream. There are many methods to detect and kill these cells. In this study, COMSOL software was used to simulate the cessation of division of cancer cells after they were captured in magnetic traps under the influence of an electromagnetic field. **Materials and Methods:** In this project, high electric charge is applied to dividing cells by applying an electromagnetic field. As the division time increases, the cell automatically gives a programmed death command and the dividing cells are destroyed. **Results:** After COMSOL simulation, it was found that exposure to a magnetic field with an intensity of 50 kHz can trap the cells trapped in magnetic traps during the division phase. This effect occurs due to the phenomenon of electrophoresis and at the junction of cells during their division. **Conclusion:** According to the results obtained from the simulation, it is hoped that the growth and spread of cancer in the body can be prevented by using magnetic implants implanted inside the body of a living being and near the tumor, capturing cancer cells.

**Keywords:** Cancer cells, electromagnetic field, COMSOL software, magnetic trap



## توقف تقسیم سلول‌های سرطانی در گرادیان میدان الکترومغناطیسی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار مدل‌سازی کامسول

ساجده ابراهیم دماوندی<sup>۱\*</sup>، لیلا سادات میری<sup>۲</sup>، کیمیا قراگزلو<sup>۳</sup>

۱. گروه زیست‌شناسی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران.

(نویسنده مسئول: sajedeh6363@gmail.com orcid: 0000-0001-5738-6440)

۲. دبیرستان فرزنانگان، تهران، ایران.

۳. دبیرستان فرزنانگان، تهران، ایران.

تاریخ بارگزاری: ۱۴۰۴/۰۲۸/۲۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

### چکیده

هدف مطالعه: سرطان در شاخص‌های جهانی از عوامل اصلی مرگ محسوب می‌شود. در این میان بیشترین علت مرگ به سبب سرطان ناشی از متاستاز است. متاستاز به مفهوم رشد، تکثیر و مهاجم سلول‌های توموری در مکان‌های متفاوت بدن می‌باشد. علت متاستاز و گسترش سرطان در بدن سلول‌های توموری در گردش خون هستند. روش‌های فراوانی برای یافتن و از میان بردن این سلول‌ها وجود دارد. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار کامسول استفاده شد تا توقف تقسیم سلول‌های سرطانی پس از گیر افتادن در تله‌های مغناطیسی تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی شبیه‌سازی شود.

در این پروژه با اعمال میدان الکترومغناطیسی سلول‌های در حال تقسیم با بار الکتریکی زیاد را تحت تأثیر قرار داده، و با طولانی شدن زمان تقسیم آن‌ها، سلول به صورت خودکار دستور مرگ برنامه‌ریزی شده را می‌دهد و سلول‌های در حال تقسیم از بین می‌روند. پس از انجام مدل‌سازی با کامسول مشخص شد، تأثیر میدان مغناطیسی با شدت ۵۰ کیلو هرتز می‌تواند سلول‌هایی را که در تله‌های مغناطیسی گیر کرده‌اند در

مرحله تقسیم متوقف کنند. این اثر به علت پدیده الکتروفورزیس و در محل اتصال در سلول در حین تقسیم سلولی رخ می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی می‌توان امیدوار بود که بتوان با استفاده از ایمپلنت‌های مغناطیسی که درون بدن موجود زنده و در نزدیکی تومور کاشته می‌شود با گیر انداختن سلول‌های سرطانی از رشد و گسترش سرطان در بدن جلوگیری کرد.

**کلمات کلیدی:** سلول‌های سرطانی، میدان الکترومغناطیسی، نرم‌افزار کامسول، تله مغناطیسی.

#### مقدمه

سرطان یکی از دلایل اصلی مرگ‌ومیر در دنیا است و ۶۶٫۷٪ مرگ‌ومیرهای سرطانی ناشی از تومورها به دلیل متاستاز رخ می‌دهند [۱]. متاستاز به مفهوم رشد، تکثیر و مهاجم سلول‌های توموری در مکان‌های متفاوت بدن می‌باشد. تومورهای اولیه می‌توانند توسط جراحی یا درمان‌های مکمل شیمیایی به خوبی درمان شوند، اما سرطان‌هایی که به مرحله متاستاز رسیده‌اند به درمان مقاوم‌اند. این خصوصیت مقاومت، دلیل فراوانی مرگ را در میان افراد دارای متاستاز را نشان می‌دهد؛ بنابراین درمان مؤثر سرطان وابستگی زیادی به شناخت کامل فرایندهای ایجادکننده متاستاز و فراهم کردن راهکارهایی برای مقابله با این پدیده دارد [۲]. سلول‌های تومور در گردش (CTCs) اولین بار سال ۱۸۶۹ در کالبدشکافی یک بیمار مبتلا به سرطان متاستاتیک توسط توماس اشورث کشف شد که تعداد کمی سلول را در خون بیمار مشاهده کرد که شبیه سلول‌های تومور اولیه بود [۳]. لنف مایع بیولوژیکی است که از ترکیب مایع بینابینی با محصولات متابولیسم بافتی و کاتابولیسم، سلول‌های آپوپتوز، بقایای سلولی و سلول‌های ایمنی در گردش به دست می‌آید [۴]. مکانیسم‌هایی که توسط آن تومورهای بدخیم محل تومور اولیه را ترک می‌کنند و به غدد لنفاوی منطقه‌ای متاستاز می‌دهند، پیچیده و مرتبط با یکدیگر هستند. اگرچه پدیده متاستاز به غدد لنفاوی بیش از ۲۰۰ سال است شناخته شده است، اما اخیراً مکانیسم‌های دقیق آن مورد توجه و آزمایش قرار گرفته

است. بیوپسی غدد لنفاوی به سرعت وارد جریان اصلی بالینی ملانوما و کارسینوم پستان می‌شود [۵]؛ بنابراین جداسازی و توقف تقسیم سلولی CTC از خون و نیز مجاری لنف نقش مهمی را در غربالگری غیرتهاجمی گسترش سرطان ایفا می‌کند [۶].

### روش‌های جداسازی سلول‌های سرطانی در گردش خون

روش‌های جداسازی و دسته‌بندی CTC‌ها به دو گروه فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. روش‌های فعال با استفاده از نیروهای خارجی عمل جداسازی را انجام می‌دهند. در این روش‌ها از نیروهایی مانند نیروی گرانش، نیروی حاصل از تأثیر صوت و نیروی اینرسی استفاده می‌شود؛ در حالی که در روش‌های غیرفعال بدون استفاده از نیروهای خارجی و تنها با بهره‌گیری از ویژگی‌های فیزیکی و ابعاد ذرات، آن‌ها را از یکدیگر جدا می‌کنند. میکروفلوئیدها بسته به انتخاب روش فعال معمولاً به چهار دسته تقسیم می‌شود:

- ۱- جداسازی به کمک میدان الکتریکی (دی‌الکتروفورسیس)؛ ۲- جداسازی به کمک میدان مغناطیسی (مگنتوفورسیس)؛ ۳- جداسازی به کمک صوت (آکستوفورسیس)؛
- ۴- جداسازی به کمک نور و لیزر (اپتوفورسیس) [۷]. روش‌های غیرفعال براساس فیلتراسیون مبتنی بر اندازه، معمولاً مشکلاتی از جمله خلوص پایین CTC‌های جدا شده و دشواری جمع‌آوری دارند. در همین حال، در روش‌های فعال فتوفورز می‌تواند نور را تا سطح یک سلول مشخص کند، اما خطر آسیب سلولی وجود دارد؛ زیرا پرتوهای بسیار متمرکز گاهی اوقات گرمای بیش از حد تولید می‌کنند. آکستوفورزیس تنها می‌تواند سلول‌ها را با تفاوت در اندازه سلول، چگالی و تراکم‌پذیری به دلیل دشواری ادغام مبدل صوتی در یک دستگاه میکروسیال و دشواری کنترل سلول‌های در مقیاس زیرمیکرونی جدا کند. الکتروفورز به مدارهای محلی و پتانسیل‌های بزرگ نیاز دارد که می‌تواند باعث آسیب یون‌های محلول و پتانسیل‌های سطحی آن به سلول‌ها شود. در مقابل، مگنتوفورز چندین مزیت متمایز دارد؛ مانند هزینه کم و کاهش مصرف نمونه. علاوه بر این، هیچ مشکل گرمایشی ندارد و به هیچ سیستم خارجی گران‌قیمتی به‌عنوان کمک نیاز ندارد. با توجه به توانایی ذاتی آهن‌رباها برای ارائه نیرو در فاصله، فناوری جداسازی C‌ها براساس مکانیسم مگنتوفورسیس به یک روش معمول تبدیل شده است.

تکنیک‌های تصویربرداری و مطالعه مورفولوژیکی بافت‌ها (هیستوپاتولوژی) یا سلول‌ها (سیتولوژی) در حال حاضر برای کمک به تشخیص زودهنگام سرطان استفاده می‌شود. فناوری‌های تصویربرداری امکان مشاهده تغییرات بافتی برای تشخیص سلول‌های سرطانی را فراهم می‌کند. با این حال، به دلیل ماهیت زمان‌بر بودن این روش‌ها، سلول‌های سرطانی می‌توانند زمان لازم برای تکثیر و حمله به بافت را داشته باشند. علاوه بر این، فناوری‌های تصویربرداری موجود قادر به تمایز بین تومورهای خوش‌خیم و بدخیم نیستند. همچنین سیتولوژی و هیستوپاتولوژی نمی‌تواند برای تشخیص سرطان در مراحل اولیه به‌عنوان روشی قابل‌اعتماد و مستقل استفاده شود. در نتیجه، توسعه روش‌های قابل‌اعتمادی که بتواند سرطان را در مراحل اولیه تشخیص دهد، ضروری است [۹]. روش‌های زیادی برای یافتن سلول سرطانی در خون پس از جداسازی خون و استفاده از فیلترها و سانتریفیوژ و استفاده از میکروفلوئیدها وجود دارد. با این حال کارایی و دقت این روش‌ها نسبت به شناسایی سلول‌ها در شرایط *invivo* بسیار پایین است. روشی که بتواند به‌سرعت وجود سلول‌های سرطانی در خون و لنف را نشان دهد می‌تواند اقدامات و درمان‌های بعدی را نیز با موفقیت بیشتر همراه کند [۸].

برای دستیابی به هدف ذکر شده محققان استفاده از تله‌های سرطانی قابل‌کاشت برای به دام انداختن سلول‌های سرطانی در بدن را پیشنهاد داده‌اند. به‌طور خاص، تله‌های سرطانی مهندسی شده زیستی توجه بسیاری را از سوی جامعه مهندسی بافت به‌خود جلب کرده است. این تله‌ها به‌عنوان راه‌حلی بالقوه برای گرفتن انتخابی سلول‌های سرطانی، به منظور جلوگیری از انتشار کنترل‌نشده‌شان، در نظر گرفته می‌شوند. این نوع تله‌ها از بیومواد مهندسی شده مختلف (طبیعی و مصنوعی) و مکانیسم‌های مختلف برای جذب و جذب انتخابی سلول‌های سرطانی که از تومور گسترش یافته‌اند، بهره می‌برند. زمان استفاده آن‌ها به‌ویژه پس از درمان اولیه می‌باشد که به‌طور بالقوه منجر به ریشه‌کنی سلول‌های سرطانی و کاهش نیاز به درمان‌های تهاجمی‌تر می‌شود [۱۰].

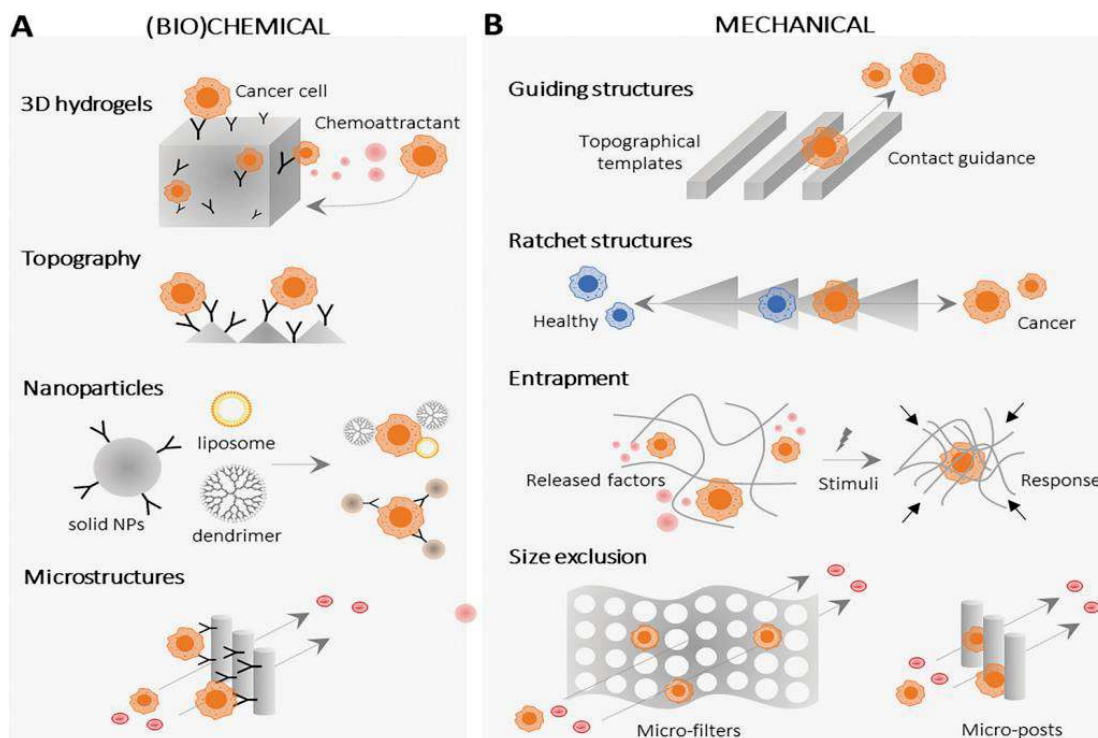
به‌واسطه قابل‌کاشت بودن، تله‌های سرطانی این مزیت را دارند که در نواحی برداشته‌شده تومور بدخیم، برای هدف قراردادن سلول‌های مهاجم باقی‌مانده در اندام‌ها یا بافت‌های خاصی که سلول‌های تومور اولیه معمولاً متاستاز می‌دهند، قرار گیرند؛ بنابراین

به جلوگیری از انتشار کنترل نشده آنها کمک می‌کند [۱۱]. علاوه بر این، از این تله‌ها می‌توان برای نظارت مستمر بر فعالیت و درمان سلول‌های سرطانی استفاده کرد [۱۲]. این امر می‌تواند به شناسایی تغییراتی در تومور کمک کند که ممکن است نشان‌دهنده نیاز به درمان اضافی یا تغییر در برنامه درمانی و یا برای تشخیص عود تومور پس از درمان باشد [۱۳].

### تله‌های سرطانی قابل کاشت برای گرفتن سلول‌های متاستاتیک درون بدن

تله‌های سرطانی قابل کاشت از مواد زیست سازگار مشتق شده طبیعی یا مصنوعی، برای جذب و گرفتن سلول‌های سرطانی در حال انتشار استفاده می‌کنند. این تله‌ها را می‌توان به طور کلی بسته به مکانیسم کارشان به دو دسته تقسیم کرد: بیوشیمیایی و مکانیکی. شکل (۱) شامل عوامل بیوشیمیایی (بیولوژیکی) محصور شده در تله‌ها از جمله، آنتی‌بادی‌های خاص، آپتامرها، مواد شیمیایی جذب‌کننده، داروها یا سایر مولکول‌های کوچک است که برای جذب و گرفتن سلول‌های سرطانی به کار برده می‌شوند. پس از به دام افتادن، این عوامل ممکن است توانایی مهاجرت و یا تکثیر سلول‌های سرطانی را مسدود کنند یا از طریق فعال شدن سیستم ایمنی، موجب ریشه‌کنی آنها شود [۱۴]. از سوی دیگر، تله‌های سرطانی مبتنی بر مکانیک، از مکانیسم‌های فیزیکی مانند میکروفیلترها، ویژگی‌های توپولوژیکی یا به دام افتادن فیزیکی برای گرفتن سلول‌های سرطانی استفاده می‌کنند که سپس می‌توانند از طریق موارد مشابه یا روش‌هایی مانند جراحی از بدن خارج شوند. مستقل از استراتژی به دام انداختن انتخابی، تله‌ها را می‌توان در ناحیه تومور پس از جراحی یا در جای دیگری به عنوان پیش‌متاستاتیک بیومیمتیک مهندسی شده کاشت. یک مثال معمولی از تله سرطان (بیولوژیکی)، استفاده از داربست‌های پلیمری است که با عوامل خاصی مانند آنتی‌بادی‌های مونوکلونال، گیرنده‌های هدف، پروتئین‌ها و غیره که بیش از حد بر روی سطح سلول‌های سرطانی بیان می‌شوند، عامل دار شده‌اند [۱۵، ۱۶]. به عنوان مثال، داربست فیبروین ابریشم شرایطی شبیه مغز استخوان را برای گرفتن سلول‌های سرطان سینه و پروستات استفاده

می‌شود [۱۷].



**شکل ۱.** نمونه‌های اولیه تله‌های (بیو)شیمیایی شامل هیدروژل‌ها و داربست‌های سه‌بعدی، ساختارهای توپوگرافی، نانوذرات و ریزساختارهای تله‌های فیزیکی شامل ساختارهای هدایت‌کننده بدون مواد شیمیایی، نحوه به دام افتادن فیزیکی یا روش‌های حذف براساس اندازه است. در این روش‌ها با استفاده از عناصر شناسایی زیستی برای تشخیص سلول‌های سرطانی یا سایر مواد مشتق شده از تومور عمل می‌شود.

تا به امروز، تعداد بی‌شماری از تله‌های سرطانی مبتنی بر مکانیک توصیف شده‌اند که مکانیسم‌های کاری متفاوتی را نشان می‌دهند، اما ویژگی مشترک آن‌ها این است که پلتفرم‌هایی مستقل از نشانگر زیستی هستند. به‌عنوان مثال می‌توان به استفاده از مواد حساس به اندازه (مانند غشاهای متخلخل و غیره) انتخابی برای سلول‌های سرطانی بزرگ، به‌ویژه CTC‌ها اشاره کرد.

هدف این پروژه این است که با اعمال میدان الکترومغناطیسی سلول‌های در حال تقسیم با بار الکتریکی زیاد را تحت تأثیر قرار داده، و با طولانی شدن زمان تقسیم آن‌ها،

سلول به صورت خودکار دستور مرگ برنامه‌ریزی شده را بدهد و سلول‌های در حال تقسیم از بین بروند.

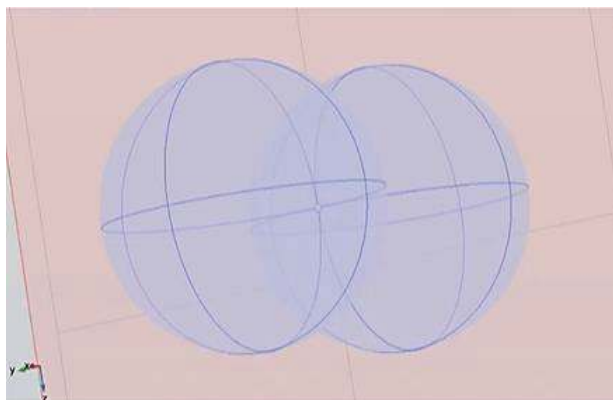
### مواد و روش‌ها

#### معرفی نرم‌افزار کامسول به عنوان نرم‌افزار شبیه‌سازی میدان مغناطیسی

به منظور شبیه‌سازی تقسیم سلولی در میدان مغناطیسی و تأثیر میدان بر تقسیم سلول‌های سرطانی نرم‌افزار کامسول مورد توجه قرار گرفت. نرم‌افزار کامسول (Multiphysics Comsol) ویژگی‌های منحصربه‌فردی در زمینه مدل‌سازی‌های فیزیک‌های چندمنظوره داشته و کاربردهای زیادی در بحث تحقیقات و صنایع مختلف دارد.

#### روش انجام شبیه‌سازی کامسول

به منظور شبیه‌سازی فضا و شکل دو سلول در حال تقسیم در ابتدا توسط بخش Geometry، شکل هندسی سه‌بعدی سلول به واسطه طراحی دو کره که در یک مکعب به عنوان محیط کشت آزمایشگاه قرار گرفته‌اند، در مراحل مختلف تقسیم طراحی شد. دو کره بیضوی در ابعاد ۲۰، ۲۰ و ۲۵ میکرومتر و مکعب با ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ در ۲۰۰ میکرومتر تعریف شدند. با استفاده از بخش Union و انتخاب دو کره فضای آن دو را با یکدیگر مرتبط کرده و سیتوپلاسم دو سلول به یکدیگر راه دارند. با تعریف فواصل مختلف دو سلول بر حسب میکرومتر نسبت به یکدیگر در بخش پارامترها (Parameters) اعمال میدان در هر یک از مراحل تقسیم انجام شد.



شکل ۲. فواصل تعریف شده در بخش پارامتر

در ابتدا باید موقعیت‌های پیش‌فرضی در اطلاعات شبیه‌سازی وارد شود تا تداعی‌گر تقسیم سلولی در مراحل مختلف آن باشد. بعد از قرارگیری سلول‌های شبیه‌سازی شده در منطقه مورد نظر لازم است برای آن‌ها محیطی مانند محیط آزمایشگاه ایجاد شود تا مدل‌سازی تا حد امکان نتایج دقیق داشته باشد. پس از شبیه‌سازی سلول‌ها و محیط کشت آن‌ها، باید برای مشخص کردن ماده سازنده سلول‌ها و محیط قرارگیری آن‌ها (به دلیل این‌که نرم‌افزار کامسول این ماده را به صورت پیش‌فرض ندارد) اطلاعات رسانایی الکتریکی آن‌ها وارد شود.

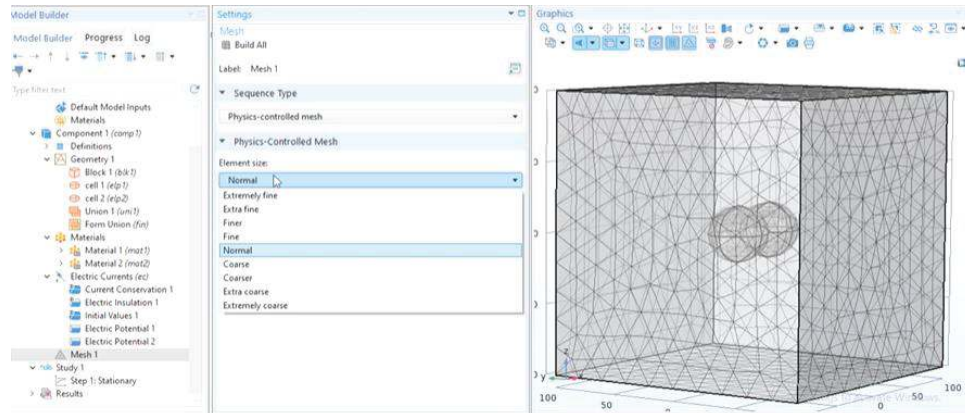
جدول ۱. ضریب دی‌الکتریک و رسانندگی ویژه الکتریکی سلول

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma...	0.3	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilo...	72.3	1	Basic

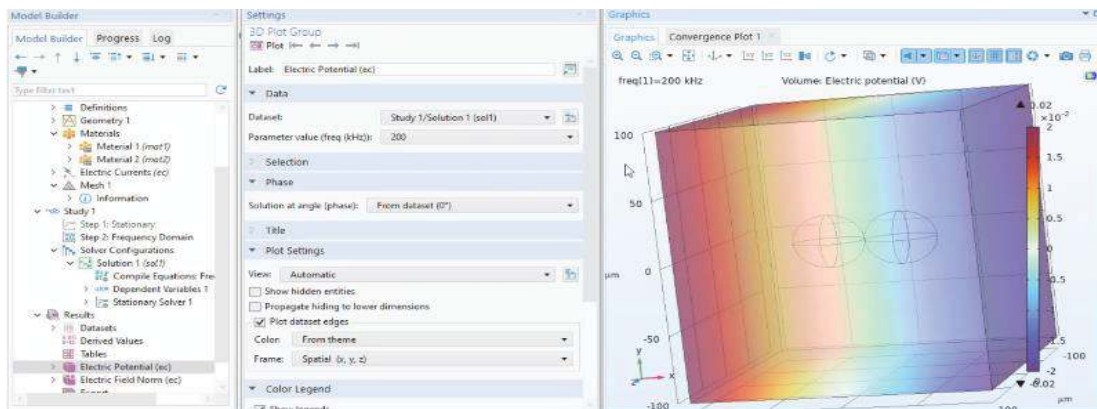
جدول ۲. ضریب دی‌الکتریک و رسانندگی ویژه الکتریکی محیط تقسیم

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma...	1.2	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilo...	72.3	1	Basic

سپس باید با مش‌بندی مناسب بتوان نتایج را پس از اعمال نیروی الکترومغناطیسی بر سلول و محیط کشت دریافت کرد.

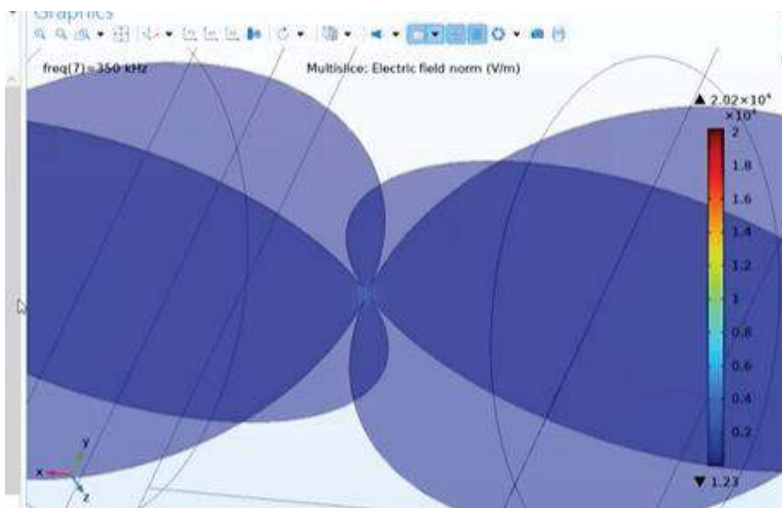


شکل ۳. مش‌بندی اعمال شده در سایز Extremely fine



شکل ۴. سلول در حال تقسیم و محیط تحت تأثیر میدان و جریان اعمال شده، در شکل بالا با توجه به نمودار داده شده توسط کامسول می‌توانیم شدت بیشینه و کمینه میدان الکتریکی را براساس رنگ‌ها پیدا کنیم و اطلاعات مورد نظرمان را استخراج کنیم.

در مرحله بعد شدت میدان در نقطه اتصال دو سلول بررسی می‌شود. در این مرحله ما شدت میدان را در نقطه مشخص شده به دست می‌آوریم که براساس مدل‌سازی کامسول  $5625,722060447705 \text{ m/V}$  در بیشترین میزان یعنی فرکانس ۵۰ هرتز محاسبه می‌شود.

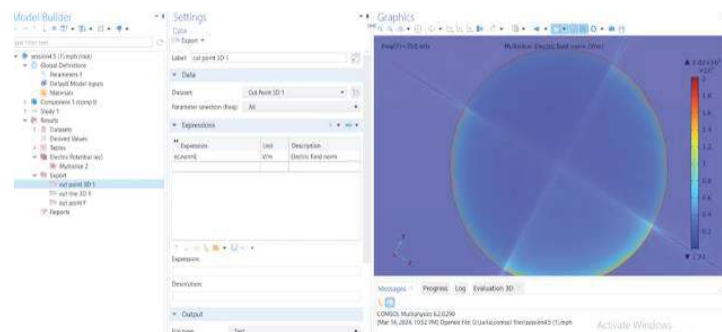


شکل ۵. جریان اعمال شده بر دو سلول و شدت آن در نقطه اتصال دو سلول

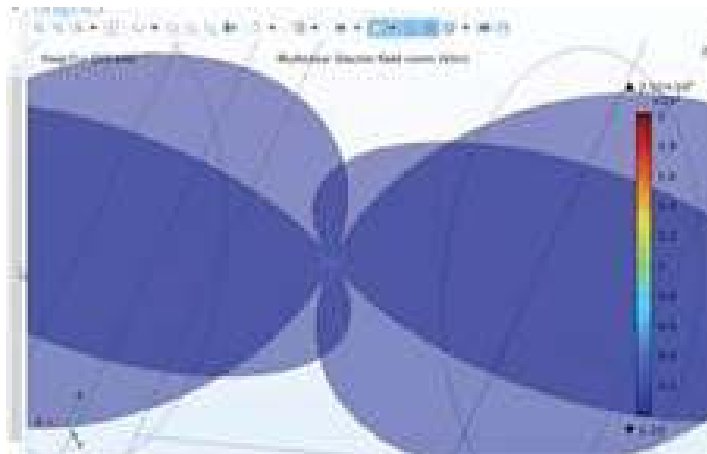
## نتایج

پس از انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند تقسیم سلولی در بدن موجود زنده تحت اثر میدان الکترومغناطیس ناشی از گرادیان میدان الکترومغناطیسی کاشته شده نتایج زیر به دست آمد.

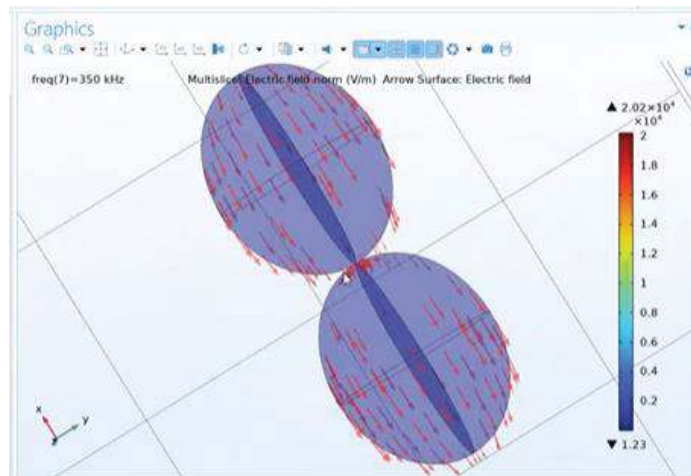
تعریف پدیده الکتروفورسیس: شدت میدان الکتریکی در شکل‌های باریک‌تر و نامنظم‌تر بیشتر از دیگر نواحی است؛ زیرا یون‌ها یا دوقطبی‌های القایی به سمت منطقه باریک‌تر می‌روند در نتیجه در آن نواحی شدت میدان بیشتر است. توقف تقسیم سلولی به واسطه پدیده الکتروفورسیس در این مرحله از تقسیم رخ می‌دهد.



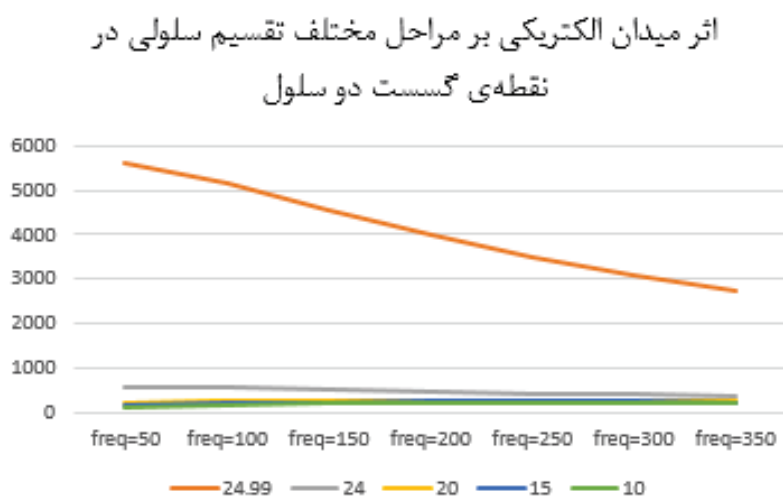
شکل ۶. جریان الکتریکی اعمال شده در نقطه اتصال دو سلول



شکل ۷. این شکل پدیده فیزیکی دی‌الکتروفورزیسیس را نشان می‌دهد.



شکل ۸. جهت شارش جریان الکتریکی هنگام تقسیم سلول



**شکل ۹.** نمودار تأثیر میدان الکترومغناطیس در محیط تقسیم سلول بر نقطه گسست دو سلول در حال تقسیم در مراحل مختلف تقسیم در اعمال فرکانس‌های مختلف در بازه مشخص بر حسب کیلو هرتز

### بحث

متاستاز به‌عنوان عامل اصلی مرگ‌ومیر بیماران سرطانی به‌عنوان فرایند اصلی مورد هدف محققان سرطان محسوب می‌شود؛ بنابراین توقف متاستاز هدف اصلی محققان حوزه سرطان می‌باشد. روش‌های متفاوتی برای توقف متاستاز وجود دارد و بهترین این روش‌ها جلوگیری از پراکنش سلول‌های سرطانی از درون سلول‌های تومور اولیه به درون خون و لنف است. در تحقیقات پیشین از تله‌های زیستی متفاوتی برای به دام انداختن سلول‌های سرطانی در حال گردش CTC استفاده شده است. با این حال این روش‌ها به دلیل ناکارآمد بودن و تأثیر نامناسب بر روی سیستم ایمنی، در شرایط *in vivo* (درون بدن انسان) کارآمد نیستند. در تحقیق حاضر استفاده از تله‌مغناطیسی به همراه نانوذرات مغناطیسی برای به دام انداختن سلول‌های سرطانی مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد نیروی الکترومغناطیسی در فرکانس‌های مشخص که در بخش نتایج به آن پرداختیم از تقسیم سلول‌های سرطانی جلوگیری می‌کند. با توجه به این‌که این روش از میدان الکترومغناطیسی برای توقف متاستاز استفاده می‌کند نسبت به دیگر روش‌ها ارزان‌تر و

غیرتجاهمی‌تر محسوب می‌شود.

نتایج میدان ۵۰ کیلو هرتز نسبت به دیگر فرکانس‌ها نشان می‌دهد، تأثیر میدان در بازه فرکانسی خاصی عمل می‌کند و به هیچ‌وجه وابسته به شدت فرکانس نیست و با افزایش شدت، شاهد اثرات بیشتر نخواهیم بود؛ بنابراین با افزایش فرکانس شاهد تأثیر بیشتر میدان بر فرایند دی‌الکتروفورسیس نیستیم. در دیگر مطالعات نیز این رفتار میدان الکترومغناطیسی بر فرایندهای زیستی قابل‌مشاهده است؛ بدین ترتیب که میدان الکترومغناطیسی در محدوده‌های خاص شدت یا فرکانس، موجب تأثیر بر فرایندهای زیستی می‌گردد. به این محدوده‌ها پنجره‌های زیستی می‌گویند و در بسیاری موارد هنوز مشخص نیست چرا میدان تنها در این بازه عمل می‌کند. در سه دهه پیشین مفهوم پنجره‌های زیستی توجه دانشمندان را به‌خود جلب کرده است. در حال حاضر دوزیمتری برای توضیح پاسخ‌های زیستی مشاهده شده به میدان، مورد بررسی و تحقیق قرار می‌گیرد [۱۸]. جست‌وجوی منطقی برای یافتن این پنجره‌ها باید شامل یک آنالیز سیستماتیک در گستره پارامترهایی چون شار مغناطیسی یا فرکانس باشد. مطالعات پیشین پیشنهاد کرده‌اند که طی تکامل در ارگانیس‌م‌ها، مکانیسم‌های خاصی برای درک میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی طبیعی ارتقا یافته است. این مکانیسم‌ها ترکیبات ویژه‌ای از پارامترهای فیزیکی میدان اعمال شده را نیاز دارد تا بتواند به‌وسیله سیستم‌های زیستی مورد شناسایی قرار گیرد. درک میدان و پاسخ‌دهی به آن‌ها شاید در سطوح متفاوتی به‌طور مثال در سطح غشا، سطح سلولی یا بافتی دیده شوند. گاهی اوقات پنجره‌ها از طریق مسیرهای انتقال سیگنال، فعالیت مغزی یا سیستم‌های عصبی مرکزی عمل می‌کنند [۱۹].

میدان الکترومغناطیسی به‌عنوان یک روش مناسب برای کنترل رفتار سلولی (تقسیم سلولی) و ملکول‌های اجزاء تشکیل‌دهنده سلولی (پروتئین‌های سیتواسکلتون، کانال‌ها و پمپ‌های یونی و غیره) عمل کند [۲۰]. دستکاری عملکرد و ساختار اجزای مسئول فعالیت‌های متفاوت سلولی به‌وسیله یک روش فیزیکی مثل میدان الکترومغناطیسی روشی بسیار کارآمد برای تنظیم عملکرد سلول است. از طرفی ویژگی‌های کاربردی میدان از جمله اعمال میدان در محل مشخص (برخلاف داروهای شیمیایی) و همچنین

کنترل دوز مورد نظر از جمله ویژگی‌های درخشان برای استفاده از میدان است که میدان را به‌عنوان کاندید مناسب برای درمان بیماری‌ها مطرح می‌کند [۱۹]. در مطالعه حاضر بررسی مدل‌سازی بر روی اثر میدان الکترومغناطیسی ۵۰ تا ۳۵۰ کیلو هرتز بر تقسیم سلول‌های سرطانی انجام شد. با توجه به این که در فرکانس ۵۰ کیلو هرتز توقف تقسیم سلولی مشاهده شد و از آنجا که در بیشتر موارد تقسیم سلولی عملکرد سلول‌های سرطانی است؛ بنابراین به احتمال بالا سلول‌های مورد هدف میدان سلول‌های سرطانی خواهد بود و نه سلول‌های نرمال؛ بنابراین استفاده از میدان الکترومغناطیس برای توقف تقسیم و مرگ سلول‌های سرطانی مورد توجه قرار می‌گیرد. از بین بردن سلول‌های سرطانی در گردش با روشی ساده، غیرتهاجمی و کم‌هزینه مثل میدان الکترومغناطیسی اهمیت زیادی دارد. با این حال مشکلاتی در زمینه کاربردهای درمانی میدان وجود دارد که از جمله این موارد می‌توان به نبود یک مطالعه جامع و کامل بر روی تمام اثرات سلولی و ملکولی میدان بر سیستم‌های زیستی و قرارگیری تمام این اثرات کنار یکدیگر و تفسیر اثرات و جمع‌بندی تمامی آن‌ها برای یافتن مکانیسمی جامع و کامل که جوابگوی تمام اثرات مشاهده شده از میدان باشد اشاره کرد. از طرفی مطالعات کمی اثرات گستره میدان‌ها با شدت‌ها و فرکانس‌های مختلف را بر فعالیت‌های سلولی برای یافتن نحوه اثر میدان انجام داده‌اند.

### منابع

- [۱] نوری دلویی، م.، فضیلتی، ح. و مینا تبریزی، م. «متاستاز سرطان، عامل‌های ژنتیکی و ریزمحیطی بافت ثانویه: مقاله مروری»، مجله دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران. شماره ۱۱، بهمن ۱۳۹۱.
- [۲] نوروزشمسیان، ع.، محسنی، آ و مجدم، م. «طراحی میکروجداساز سلول‌های سرطانی همراه جریان خون با استفاده از ترکیب روش‌های جداساز پینچ و دی‌الکتروفورسیس»، مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها. شماره ۱، ۱۳۹۹.
- [3] Niciński, K., Krajczewski, J., Kudelski, A., Witkowska, E., Trzcińska-Danielewicz, J., Girstun, A., & Kamińska, A., (2019). "Detection of circulating tumor cells in blood by shell-isolated nanoparticle – enhanced Raman spectroscopy," (SHINERS) in *microfluidic device: natur.Scientific Reports*.
- [4] Nathanson, David, M.D, (2003). "Insights into the Mechanisms of Lymph

- NodeMetastasis:" *Cancer*. Volume98. Issue2, p.215-435
- [5] Laan ,Lou., Hongging, He., (2020). "Magnetically driven microfluidics for isolation of circulating tumor cells:" *Cancer Medicine*, p.4207–4231.
- [6] Nicole, Pamme, Claire, Wilhelm, (2006). "Continuous sorting of magnetic cells via on-chip free-flow magnetophoresis:" *Lab Chip*, p.974–980.
- [7] Woodhouse, Elisa C., Rodrigo F., (1997). "Chuaqui, Lance A. Liotta, General Mechanisms of Metastasis": *CANCER Supplement*. Volume 80. Number 8. October 15, p.1529-1537.
- [8] Zhou, Hengbo, Lei, Pin-ji, and Timothy, P., (2021). *Padera, Progression of Metastasis through Lymphatic System: cells*.
- [9] Jin, Cancan, Wang, Kankai, (2020). "Anthony Oppong-Gyebi, and Jiangnan Hu, Application of anotechnology in Cancer Diagnosis and Therapy - A Mini-Review": *international journal of medicl sciences*, volume17, p.2964-2973.
- [10] Najberg, M., Haji Mansor, M., Boury, F., Alvarez-Lorenzo, C., Garcion, E., (2019). *Front. Pharmacol*.
- [11] Lesniak, M. S., Brem, H., (2024). *Nat. Rev. Drug Discovery*, 3, p.499.
- [12] Chew, S. A., Danti, S., (2017). *Adv. Healthcare Mater*. 6, 1600766.
- [13] a) Bushnell, G. G., Orbach, S. M., Ma, J. A., Crawford, H. C., Wicha, M. S., Jeruss, J. S., Shea, L. D., (2021). *Biomaterials*, 269, 120632; b) Beri, P., Matte, B. F., Fattet, L., Kim, D., Yang, J., Engler, A. J. (2021). *Nat. Rev. Mater*, 3, p.418.
- [14] Belotti, Y., Lim, C. T., Anal., (2021). *Chem*.93, 4727. Modeling (Eds.: S. C. Kundu, R. L. Reis), Elsevier, New York 2020, p.331–377.
- [15] Caballero, D., Reis, R. L., Kundu, S. C., (2020). "in Biomaterials- and MicrofluidicsBased Tissue Engineered 3D Models (Eds.: J. M. Oliveira, R. L. Reis)", *Springer International Publishing*, p.43-64.
- [16] Li, J., Luo, Y., Li, B., Xia, Y., Wang, H., Fu, C., (2020). *Front. Bioeng. Biotechnol*, 8, 612950.
- [17] Caballero, D., Abreu, C. M., Lima, A. C., Neves, N. N., Reis, R. L., Kundu, S. C., (2022). *Biomaterials*, 280, 121299.
- [18] Adey, W. R., (1993). "Biological effects of electromagnetic fields". *J Cell Biochem*, Apr;51(4): p.410-6.
- [19]. Naarala, J., Höytö, A., Markkanen, A., (20041). "Cellular Effects of Electromagnetic Fields." *Alternatives to Laboratory Animals*; 32(4): p.355-360.
- [20] Funk, R. H., & Monsees, T. K. (2006). "Effects of electromagnetic fields on cells: physiological and therapeutical approaches and molecular mechanisms of interaction. A review." *Cells, tissues, organs*, 182(2), p.59–78. <https://doi.org/10.1159/000093061>