



# شبیه‌سازی عددی هدایت نانوذرات مغناطیسی در محل دوشاخه شدن آئورت شکمی توسط میدان مغناطیسی سیم حامل جریان

صابر یکانی مطلق<sup>1\*</sup>، سالار دیهیم<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه  
2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه  
\* ارومیه، صندوق پستی 17165-57166، s.yekani@uut.ac.ir

## چکیده

در این مقاله دارورسانی مغناطیسی توسط نانوذرات مغناطیسی که سطح آن با دارو پوشش داده شده است، به صورت عددی مطالعه می‌شود. بخشی از رگ مربوط به پای سمت راست که از آئورت شکمی جدا شده است به عنوان بافت هدف در نظر گرفته شده است. منبع مغناطیسی مورد استفاده یک تک سیم حامل جریان می‌باشد. مدل دوفاز بونگیورنو با در نظر گرفتن اثر نیروی مغناطیسی یعنی ترم مگنتو فورسس بهبود یافت. معادلات ناپایای حاکم با در نظر گرفتن نیروی کلویین ناشی از اثرات فروهیدرودینامیکی، به روش حجم محدود و توسط الگوریتم پیرو گسسته سازی شد. تاثیر مکان سیم و مقدار جریان گذرنده از آن (1000، 2000، 3000، 4000 و 5000 آمپر) بر میزان و زمان تجمع دارو در بافت هدف مورد بررسی قرار گرفت. قطر نانوذرات 10 نانومتر و کسر حجمی آن 0.002 در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج، مکان منبع مغناطیسی بهتر است در بالادست بافت هدف و نزدیک به آن باشد. به علاوه استفاده از این روش میزان تجمع دارو در بافت هدف را می‌تواند تا 7.5 برابر افزایش دهد. از بین جریان‌های مطالعه شده بهترین عملکرد دارورسانی در جریان 2000 آمپر حاصل شد.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 19 خرداد 1396  
پذیرش: 20 تیر 1396  
ارائه در سایت: 10 شهریور 1396  
کلید واژگان:  
دارورسانی مغناطیسی  
نانوذرات مغناطیسی  
فروهیدرودینامیک  
آئورت شکمی  
نانوسیال

## Numerical simulation of magnetic nanoparticle delivery at location of abdominal aortic bifurcation using single wire magnetic source

Saber Yekani Motlagh\* Salar Deyhim

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology (UUT), Urmia, Iran  
\* P.O.B. 57166-17165, Urmia, Iran, s.yekani@uut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 09 June 2017  
Accepted 11 July 2017  
Available Online 01 September 2017

### Keywords:

Magnetic drug delivery (MDD)  
Magnetic nanoparticles  
Ferrohydrodynamics (FHD)  
Abdominal aorta  
nanofluid

### ABSTRACT

In this paper, drug coated magnetic nanoparticle delivery is numerically studied. The specific part of right foot vessel connected to the abdominal aorta is considered as target tissue. Single wire is applied as magnetic source. Buongiorno's two-phase model is modified by adding the magnetophoresis term to the volume fraction transport equation. Governing unsteady equations with ferrohydrodynamics Kelvin force as a source term is discretized with PISO based finite volume method. Effects of the location of magnetic source and magnitude of current carrying in wire (1000, 2000, 3000, 4000 and 5000 amperes) are investigated on residence time and deposition level of drug on target tissue. Flow is incompressible, unsteady, Newtonian, and its Reynolds number is 100, based on vessel diameter and maximum velocity at inlet. Diameter and volume fraction of nanoparticles are 10 nm and 0.002, respectively. From the results, location of wire should be near and upstream of the target tissue. Furthermore, by using this method deposition level of drug on target tissue can be increased by 7.5 times. Best drug delivery performance is seen for current magnitude of 2000 amperes. According to the results, magnetic drug delivery with magnetic nanoparticles is an efficient method for toxic cancer drugs.

### 1- مقدمه

نانومتر) که ته‌نشین و یا جذب یکدیگر نشده تشکیل توده ندهند. از طرفی برای جلوگیری از جذب و جلوگیری از لخته شدن نانوذرات مغناطیسی، سطح آن‌ها توسط لایه‌ی ماده کاهنده کشش سطحی پوشش داده می‌شود. نانوذرات دارای خواص و ویژگی‌های متفاوتی هستند که بسته به نوع و قطر متفاوت رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهند [4]. در دهه‌های اخیر استفاده از نانو ذرات مغناطیسی که توسط داروهایی مثل داروی سرطان پوشش داده شده‌اند در دارورسانی مغناطیسی بسیار مورد توجه بوده است و بررسی‌های گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است [5]. در این روش داروی مورد

نانوسیالات ترکیبی از یک سیال پایه و نانوذرات با خواص و ویژگی‌های خاص می‌باشند که در کاربردهای متنوعی مانند کلکتورهای خورشیدی [1]، مبدل‌های حرارتی [2]، چگالنده‌ها [3] و ... می‌توانند استفاده شوند. نانوسیالات مغناطیسی یا فروسیالات دسته‌ای از نانوسیالات هستند که در آن‌ها نانوذرات مغناطیسی مانند اکسید آهن در داخل سیال زمینه مانند آب، روغن، خون و ... به‌صورت هموزن مخلوط می‌شوند. البته برای این که مخلوط هموزن و پایداری به‌دست آید نیاز است که ذرات زیاد بزرگ نباشند (در حدود 10

Please cite this article using:

S. Yekani Motlagh, S. Deyhim, Numerical simulation of magnetic nanoparticle delivery at location of abdominal aortic bifurcation using single wire magnetic source, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 65-74, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و مغناطیسی سنتز نانو ذرات به صورت آزمایشگاهی بود. فرهاد علی و همکاران [18] به صورت تحلیلی تاثیر میدان مغناطیسی بر جریان خون در یک رگ دوشاخه نامتقارن پرداختند که مهمترین نکته در این تحقیق این بود که میدان مغناطیسی اعمالی سبب کاهش سرعت خون و تجمع ذرات مغناطیسی می‌شود. هوشیار و همکاران [19] به مطالعه‌ی آزمایشگاهی هدایت مجموع نانوذرات مغناطیسی به روش دارورسانی مغناطیسی<sup>5</sup> در رگ خونی پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده تسهیل و افزایش دقت هدایت مواد دارویی مغناطیسی شده در داخل بدن توسط منبع مغناطیسی بود. لوانو و پوانگمالی [20] به شبیه‌سازی عددی دارورسانی مغناطیسی به روش اویلر-لاگرانژی و بررسی اثر سه نوع هسته مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe$ ) و ضخامت درای پوشش داده شده بر روی آن‌ها بر عملکرد این روش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد دارورسانی تحت تاثیر ضخامت درای پوشش داده شده بر روی نانوذرات نیست. پوندمن و همکاران [21] به بررسی بهبود دارورسانی مغناطیسی با استفاده از نانوسیم پرداختند. این آزمایش روی پای چپ یک موش انجام شد. تاثیر جانبی منفی در زمان تزریق نانوسیم‌ها مشاهده نشد، همچنین سیم‌های نانو تاثیری بر کبد و کلیه و طحال نشان ندادند. گریف و ریچاردسون [22] دارورسانی مغناطیسی را با استفاده از روش‌های ریاضی مدل‌سازی کردند. فرناندز و همکاران [23] تاثیر روش مگنتیک ایمپلنت<sup>6</sup> رادر هدایت و تاثیر آن‌ها روی نانوذرات در دارورسانی مغناطیسی بررسی کردند. آن‌ها آهن ربا‌های دائمی را به روش لاپروسکوپی در ارگان تحت تاثیر کاشتند و با استفاده از تزریق داخل وریدی ذرات تحت تاثیر آهن ربا قرار گرفته و در نواحی که تومور وجود داشت اثر کردند. این بررسی، نتایج بسیار امیدوار کننده‌ای را نسبت به روش اعمال میدان مغناطیسی خارجی در برداشت، نصو و همکاران [24] رفتار نانوذرات فرومغناطیس را در اطراف رگ‌های خونی و بافت‌ها تحت تاثیر میدان مغناطیسی بررسی و سه عدد بی‌بعد برای بیان رفتار جریان و نانوذرات در دارورسانی مغناطیسی ارائه کردند. آن‌ها نتایج خود را با مشاهدات ثبت شده در گذشته مقایسه کردند و توانستند به صورت کیفی و کمی پدیده‌های دیده شده در دارورسانی مغناطیسی را توجیه نمایند. لاریمی و همکاران [25] به شبیه‌سازی عددی نانوذرات مغناطیسی در رگ‌های شاخه‌ای پرداختند که در این بررسی جریان خون به صورت تراکم ناپذیر ناپایای نیوتنی در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که میدان مغناطیسی کسر حجمی ذرات را در محل موردنظر افزایش می‌دهد اما در رگ‌هایی با عدد رینولدز بالا تاثیر روش دارورسانی مغناطیسی زیاد ملموس نیست. شرما و همکارانش [26] نیز تزریق نانوذرات مغناطیسی را در رگ با حضور میدان مغناطیسی مدل‌سازی عددی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ذرات تحت تاثیر میدان مغناطیسی سرعت‌شان کم می‌شود و با افزایش فاصله بین منبع مغناطیسی و رگ به بیش از 4.5 سانتی متر ذرات تقریباً به صورت آزادانه حرکت می‌کنند و جذب بافت نمی‌شوند. بوگی و همکاران [27] توسط روش دوفازی اویلر-لاگرانژی انتقال داروی مغناطیسی را در عروق سلیاک تحت اثر میدان یک حلقه مربعی حامل جریان الکتریکی مورد بررسی عددی قرار دادند. اگیوتیس و همکاران [28] در سال 2016، نانوذرات سوپر پارا مغناطیس را در سیستم میکروسیال برای کاربردهای دارورسانی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در آزمایش روی سیستم خون‌رسانی از دو آهن‌ربا موازی دائمی برای ایجاد میدان مغناطیسی استفاده کردند. در نتیجه آن‌ها توانستند با اعمال جریان مغناطیسی دارو را کنترل کرده و به محل موردنظر برسانند.

نظر بر روی ذرات نانوی فرومغناطیس پوشش داده می‌شوند [6]، با حضور میدان مغناطیسی این مواد تحت تاثیر میدان قرار می‌گیرند و می‌توان آن‌ها را به محل موردنظر که می‌تواند بافت سرطانی باشد، هدایت کرد [7] و [8]. استفاده از این روش بیشتر در درمان سرطان و تومورها بسیار مورد توجه بوده است. به این دلیل که استفاده از پرتو درمانی سلول‌های سالم بدن را همانند خود سلول‌های سرطانی تخریب می‌کند. شیمی درمانی هم باعث مسمومیت سیستمیک بدن شده و تنها به قسمت خاصی اثر نمی‌گذارد. با استفاده از روش دارورسانی مغناطیسی غلظت دارو در ناحیه موردنظر از مقدار بالایی برخوردار خواهد بود و لذا مقدار داروی تزریقی را می‌توان کاهش داد و همچنین می‌توان دارو را در این مکان به دام انداخت و مانع از گردش دارو در کل بدن شد و در نتیجه عوارض جانبی ناشی از داروهای شیمی درمانی را به حداقل رساند [8] و [9]. وانگ و همکارانش [10] به‌صورت آزمایشگاهی دارو رسانی مغناطیسی<sup>1</sup> را با استفاده از نانوکامپوزیت‌های سنتز آسان منگنز آهن - گرافن اکسید<sup>2</sup> مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقدار ظرفیت دارویی که به خورد بافت هدف رفته است، افزایش می‌یابد و دوز داروی مصرفی به اندازه‌ای پایین آمده است که سمیت مواد حمل‌کننده دارو قابل صرف‌نظر کردن خواهد بود. پورمهران و همکارانش [11] به بررسی شبیه‌سازی دارورسانی مغناطیسی توسط ذرات بزرگ 2-6 میکرومتر داخل جریان هوا داخل نای توسط روش دوفاز اویلر-لاگرانژی در حضور میدان مغناطیسی خارجی غیریکنواخت پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که مقدار دارو در ناحیه هدف برای عدد مغناطیسی<sup>3</sup> 1 تسلا<sup>4</sup> و کمتر از آن با کاهش قطر ذرات کاهش می‌یابد. زیرزیراسکی [12] اثر میدان مغناطیسی یک سیم را بر فروسیال خون در محل گشادی رگ آنورت شکمی به‌صورت عددی مورد بررسی قرار داد. نتایج آن‌ها نشانگر این بود که میدان مغناطیسی بر گردابه تشکیل شده در بخش گشاد شده رگ، تنش برشی و انتقال حرارت آن شدیداً تاثیرگذار می‌باشد. همچنین بوس و بنرجی [13] در سال 2015 در مورد دارورسانی مغناطیسی در جریان خون در رگ دوشاخه دارای تنگی با استفاده از روش دوفازی اویلر-لاگرانژی برای ذرات نسبتاً بزرگ با قطر 250 تا 500 نانومتر مطالعه کردند. آن‌ها تشکیل گردابه و تجمع زیاد ذرات مغناطیسی را در مجاورت منبع مغناطیسی مشاهده کردند. هاورکورت [14] به بهینه‌سازی دارورسانی با استفاده از میدان مغناطیسی پرداختند. آن‌ها از روش دوفاز اویلر-لاگرانژی استفاده کردند و فقط نیروی درگ و نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات را در نظر گرفتند. کایال و همکاران [15] نیز به بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان نانوذرات مغناطیسی در محیط دارورسانی داخل کانال پرداختند و مشاهده کردند که با افزایش دبی جریان سیال و کاهش شدت میدان مغناطیسی تمرکز ذرات در بافت هدف کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها تاثیر انتخاب محل صحیح برای تزریق، شدت میدان مغناطیسی و خواص نانوذرات در بهبود عملکرد را نشان دادند. حبیبی و همکاران [16] تاثیر گرایان‌های شدید میدان مغناطیسی را در ایجاد اختلال هنگام تزریق نانو ذرات با ابعاد 2 میکرومتر به جریان خونی ضربان‌دار مطالعه کردند. نتایج نشان دادند هنگامی که قلب در مرحله انقباضی قرار دارد سرعت خون افزایش می‌یابد و ذرات مغناطیسی از نزدیکی منبع مغناطیس دور می‌شود. هالوپکا و همکاران [17] دارورسانی مغناطیسی را با نانوذرات اکسید آهن به روش اویلر-لاگرانژی بررسی کردند. هدف آن‌ها از این کار مشخص کردن خواص فیزیکی

<sup>1</sup>Magnetic drug targeting<sup>2</sup>Manganese ferrite/grapheme oxide<sup>3</sup>Magnetic number<sup>4</sup>tesla<sup>5</sup> Magnetic drug delivery<sup>6</sup> Magnetic implants

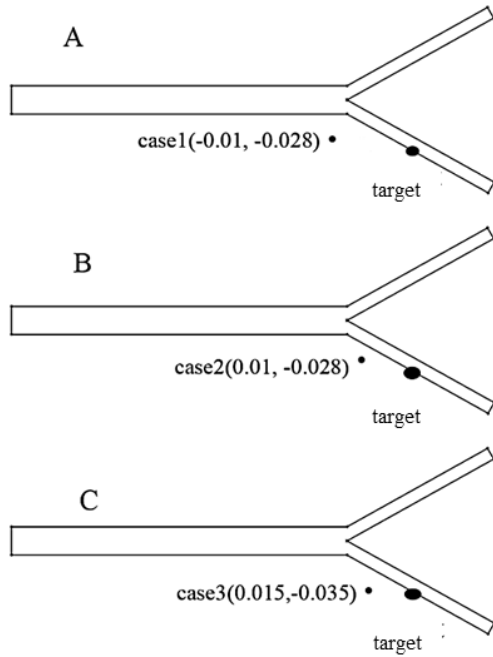


Fig. 2 wire and target location coordinate (cm)

شکل 2 مختصات قرار گیری سیم ها و ناحیه هدف (سانتی‌متر)

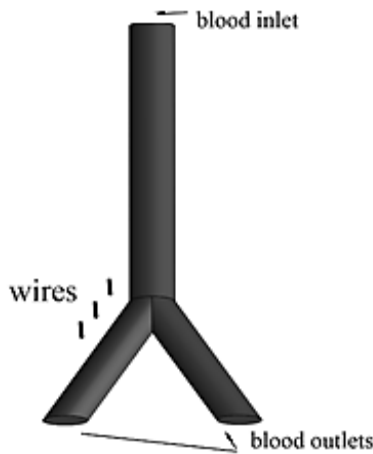


Fig. 3 three-dimensional view of vessel and wires

شکل 3 شکل سه بعدی رگ و سیم‌های مسئله

جدول 1 موقیت مکانی سیم‌ها

Table 1 wires position

واحد	X	Y	حالت
m	-0.01	-0.028	1 <sup>2</sup>
m	0.01	-0.028	2
m	0.015	-0.035	3

## 2-2- معادلات حاکم و شرایط مرزی

### 1-2-2- محاسبه خواص موثر نانوسیال مغناطیسی

برای محاسبه چگالی نانوسیالات مغناطیسی از روابط متداول در مورد مخلوط‌ها استفاده می‌شود.

چگالی نانو سیال مغناطیسی:

$$\rho_{ff} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (1)$$

<sup>2</sup> case

اگلسیا و همکاران [29]، از نانوذرات مغناطیسی به صورت همزمان هم در هایپرترمی و هم انتقال دارو استفاده کردند. میرزاباقی و همکاران [30]، به بررسی آزمایشگاهی دارورسانی مغناطیسی در یک مدل رگ همراه با گشادی پرداختند. بررسی نشان داد که سرعت فروسیال، قدرت میدان مغناطیسی و حجم آنوریسم پارامترهای مهمی در به دام انداختن نانوذرات هستند.

در کار حاضر هدف بررسی انتقال دارو توسط میدان مغناطیسی یک سیم حامل جریان در محل دو شاخه شدن آنورت شکمی به سمت بافت هدفی که در رگ پای راست واقع شده است، می‌باشد. برای اولین بار مدل دوفازی اوپلر-اوپلری که مختص نانوسیالات غیرمغناطیسی توسط بونگیورنو<sup>1</sup> [31] ارائه شده بود، برای حالت حضور میدان مغناطیسی برای نانوسیالات مغناطیسی (یا فروسیالات) بهبود داده و به کار گرفته شد.

## 2- هندسه مسئله، معادلات حاکم و شرایط مرزی

### 1-2- هندسه مسئله

مطالعات حاضر بر روی رگ آنورت شکمی قسمتی که جریان به دو شاخه تقسیم می‌شود، صورت گرفته است. قطر رگ‌ها در قسمت شکم 2 سانتی‌متر و در شاخه‌ها 1 سانتی‌متر مشابه رگ موجود در بدن انسان در نظر گرفته شده است. طول رگ در شکم و در شاخه‌ها به ترتیب 23 و 10 سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند، (شکل 1). در رگ قسمتی به عنوان بافت هدف برای بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر روی دارو انتخاب شده که طول آن 1.1 سانتی‌متر و ابتدای آن در مختصات (0.031 - 0.035) و انتهای آن در مختصات (0.031، 0.035) (نسبت به مبدا مختصاتی که در "شکل 1" نشان داده شده است، نقطه‌ای که رگ به دو قسمت تقسیم می‌شود) روی شاخه پایینی در نظر گرفته شده است. جریان دارو از سمت چپ رگ اصلی یا آنورت شکمی تزریق می‌شود "شکل 1" و با استفاده از میدان مغناطیسی اعمال شده به سمت ناحیه هدف هدایت می‌شود. میدان مغناطیسی با استفاده از سیمی که در نزدیکی رگ قرار گرفته است ایجاد می‌شود. بررسی‌ها در سه مکان مختلف، مطابق "شکل 2 و 3"، برای سیم صورت گرفته شده است. مختصات سیم‌ها در جدول 1، "شکل 2" و "شکل 3" آمده است.

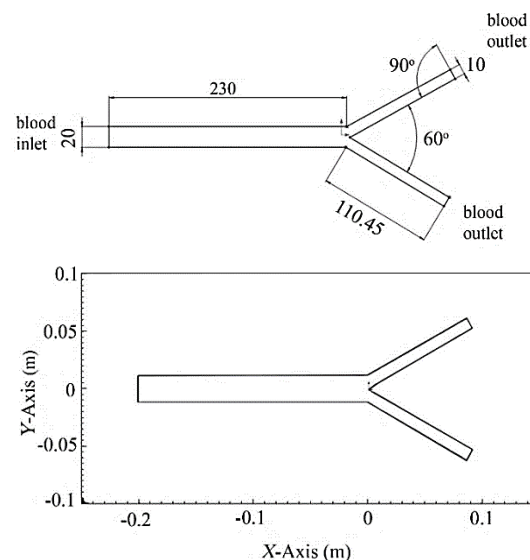


Fig. 1 shape of the vessel

شکل 1 شکل رگ

<sup>1</sup> Buongiorno

$$M = \chi(\varphi, T)H \quad (9)$$

که در رابطه (9)  $\chi(\varphi, T)$  از معادله  $\chi = 2\varphi\mu_0m_p^2/\pi d_p^3K_B T$  به دست می‌آید [32].

### 2-2-3- معادلات حاکم برای مدل بونگیورنوی بهبود یافته

با فرض جریان آرام، غیرقابل تراکم، ناپایا و بدون واکنش شیمیایی معادلات حاکم به صورت معادلات (10-12) خواهد بود.

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (10)$$

که در آن  $V$  بردار سرعت نانو سیال می‌باشد.

معادله مومنتم:

$$\rho_{ff} \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{ff} \nabla V) + \mu_0 M \cdot \nabla H \quad (11)$$

در معادله (11) ترم منبع یعنی  $F_{Kelvin} = \mu_0 M \nabla H$  نیروی کلون امیده می‌شود که ناشی از منبع مغناطیسی به نانو سیال مغناطیسی (یا فروسیال) وارد می‌شود.

معادله کسر حجمی [31]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V \cdot \nabla \varphi = -\frac{1}{\rho_p} \nabla \cdot J_p \quad (12)$$

که در آن  $J_p$  بردار شار نانو ذرات می‌باشد. در مدل اوپلر-اوپلری دوفازی که بونگیورنو [31] برای انتقال نانوذرات غیرمغناطیسی ارائه کرد فقط اثر پخش براونین ( $J_{p,T} = -\rho_p D_T \nabla T$ ) و ترموفورسس ( $J_{p,B} = -\rho_p D_B \nabla \varphi$ ) را در نظر گرفت. در کار حاضر مدل بونگیورنو با در نظر گرفتن اثر نیروی مغناطیسی بر انتقال نانوذرات مغناطیسی یا ترم شار مگنتوفورسس ( $J_{p,M} = -\rho_p D_B(\varphi/H)\xi L(\xi)\nabla H$ )، بهبود پیدا کرد.

$$J_p = J_{p,B} + J_{p,T} + J_{p,M} = \rho_p \left[ -D_B \nabla \varphi - D_T \frac{\nabla T}{T} + D_B \left( \frac{\varphi}{H} \right) \xi L(\xi) \nabla H \right] \quad (13)$$

با جاگذاری معادله (13) در (12) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot \left[ D_B \nabla \varphi + D_T \frac{\nabla T}{T} - D_B \left( \frac{\varphi}{H} \right) \xi L(\xi) \nabla H \right] \quad (14)$$

در کار حاضر مساله در شرایط هم دما حل خواهد شد. لذا اثرات ترموفورسس از معادله حذف می‌شود.

برای به دست آوردن حل خصوصی معادلات حاکم شرایط مرزی به صورت زیر تعریف می‌شوند.

در ورودی برای سرعت شرط مرزی پروفیل جریان توسعه یافته  $V = V_{max}(1 - (2y/D)^2)$ ، برای کسر حجمی  $\varphi = \varphi_{max}(1 - (2y/D)^2)$  و برای فشار گرادیان صفر در نظر گرفته شده است. در روابط مذکور  $V_{max}$  سرعت ماکزیمم در آنورت  $D$  قطر رگ آنورت و  $\varphi_{max}$  مقدار ماکزیمم کسر حجمی نانوذرات در ورودی می‌باشد.

در خروجی برای سرعت و کسر حجمی شرط مرزی گرادیان صفر و برای فشار شرط مرزی فشار نسبی معلوم صفر در نظر گرفته شده است.

جدول 2 خواص سیال خون و نانو ذره ( $Fe_3O_4$ ) در دمای  $T=315K$

Table 2 the blood and ( $Fe_3O_4$ )nanofluid properties in  $T=315K$

فاز	$d_p$ (nm)	$\mu$ ( $\frac{kg}{ms}$ )	$\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )
نانوذرات ( $Fe_3O_4$ )	10	-	5200
سیال پایه خون	-	$3.2 \times 10^{-3}$	1050

که در رابطه (1) اندیس‌های  $f, ff$  و  $p$  به ترتیب مربوط به فروسیال (نانوسیال مغناطیسی)، سیال پایه و نانو ذره بوده و  $\varphi$  نشان دهنده کسر حجمی نانوذرات می‌باشد. متاسفانه تعیین لزجت و رسانندگی نانو سیالات یکی از موضوعات چالشی بوده و ابهام‌های زیادی در این مورد وجود دارد. این امر به خاطر آن است که لزجت و رسانندگی نانو سیال‌ها تابع پارامترهای مختلفی چون خواص ذرات و سیال پایه، شکل و قطر ذرات، کسر حجمی ذرات، دما و غیره می‌باشد. بر این اساس روابط بهبود یافته و جدیدی برای تخمین دو خاصیت فوق مدام در حال انتشار می‌باشد. این وضعیت در مورد نانو سیال‌های مغناطیسی بدتر است چرا که این خواص گذشته از پارامترهای فوق الذکر به جهت و شدت میدان مغناطیسی وابسته‌اند. برخلاف نانو سیالات معمولی که لزجت و رسانندگی آن‌ها به صورت تابعی از پارامترهای مختلف ارائه شده است، تاکنون روابط دقیقی برای محاسبه خواص نانو سیال‌های مغناطیسی به صورت تابعی از شدت و امتداد میدان‌های مغناطیسی اعمالی ارائه نشده است که بتوان از آن‌ها در تحلیل‌های عددی بهره جست. لذا در کار حاضر برای محاسبه لزجت فروسیال از رابطه برینکمن به صورت رابطه (2) استفاده شده است:

$$\mu_{ff} = \mu_f / (1 - \varphi)^{2.5} \quad (2)$$

برای تخمین ضریب رسانندگی فروسیال از مدل همیلتون-کراسر استفاده شده است:

روابط (2) به صورت مکرر در تحلیل فروسیال‌ها استفاده شده است.

خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در جدول 2 آورده شده است.

### 2-2-2- مدل لانژوئن

رفتار نانوذرات مغناطیسی در داخل یک سیال پایه شبیه مولکول‌های یک گاز پارامغناطیسی می‌باشد. قانون مغناطیس شدگی برای یک گاز پارامغناطیس بوسیله تابع لانژوئن<sup>1</sup> به صورت رابطه (6) می‌باشد. که در آن  $M_s$  مغناطیس شدگی اشباع نانو سیال مغناطیسی<sup>2</sup>،  $L$  تابع لانژوئن و  $\xi$  پارامتر لانژوئن بوده که به صورت روابط (4-7) تعریف می‌شوند.

$$M = M_s L(\xi) \quad (3)$$

$$M_s = \frac{6\varphi}{\pi d_p^3} m_p \quad (4)$$

$$L(\xi) = \coth(\xi) - \frac{1}{\xi} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{\mu_0 m_p H}{k_B T} \quad (6)$$

گشتاور مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن ( $Fe_3O_4$ ) به صورت معادله (7) می‌باشد [32].

$$m_p = \frac{4\mu_B \pi d_p^3}{6 \times 91.25 \times 10^{-30}} \quad (7)$$

در روابط فوق،  $d_p$  نشان دهنده قطر نانو ذره مغناطیسی (در این مقاله برابر 10nm در نظر گرفته شده است)،  $T$  معرف دمای مطلق می‌باشد.  $\mu_B$  مگنتون بوهر<sup>3</sup> و  $k_B$  ثابت بولتزمن<sup>4</sup> بوده و مقادیر آن‌ها معادل با  $k_B = 1.3806503 \times 10^{-23} J/K$  و  $10^{-24} Am^2$  می‌باشد. تابع لانژوئن را می‌توان به صورت رابطه (8) نیز تقریب زد [32].

$$L(\xi) = \coth(\xi) - \frac{1}{\xi} = \frac{\xi}{3} \quad (8)$$

با توجه به روابط فوق می‌توان نتیجه گرفت که مغناطیس شدگی نانو سیال را می‌توان به صورت معادله (9) بر حسب  $H$  نوشت.

<sup>1</sup> Langevin function

<sup>2</sup> Saturation magnetization

<sup>3</sup> Bohr magneton

<sup>4</sup> Boltzmann constant

اعتبارسنجی کد حاضر به مرجع [35] و [36] ارجاع داده می‌شود. به علاوه برای اعتبارسنجی روش حل عددی مورد استفاده برای جریان فروسیال در حضور میدان مغناطیسی، ضریب اصطکاک  $C_f$  حاصل از مطالعه عددی حاضر با نتایج به‌دست آمده توسط تیزیرتزیلاکس [12] در داخل رگ آنورت شکمی دارای گشادی در عدد رینولدز 100 (در حضور میدان مغناطیسی یک تک سیم) مقایسه شده است، (شکل 4-ب). در این مورد نیز سازگاری نسبتاً خوبی مابین نتایج مشاهده شد.

#### 4- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی هدایت مغناطیسی نانوذرات پوشش داده شده توسط دارو از آنورت شکمی به طرف بافت هدف واقع در رگ پای راست ارائه خواهد شد. کسر حجمی ماکزیمم نانوذرات مغناطیسی، قطر آن‌ها و عدد رینولدز براساس واقعیت به ترتیب 0.002، 10 نانومتر و 100 در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز در داخل آنورت براساس سرعت ماکزیمم در آنورت ( $V_{max}=0.0152\text{m/s}$ )، قطر رگ  $D$  و ویسکوزیته خون ( $\nu$ ) به‌صورت  $Re = V_{max}D/\nu$  تعریف می‌شود. یک سیم حامل جریان به عنوان منبع مغناطیسی در نظر گرفته شده است. اثر مکان سیم و جریان

بر روی دیواره‌ها شرط عدم لغزش برای سرعت و برای کسر حجمی شار نانو ذره عمود بر سطح دیواره برابر صفر در نظر گرفته شده است که به فرم زیر خواهد بود.

$$J_p \cdot n = (J_{p,B} + J_{p,T} + J_{p,M}) \cdot n = 0 \quad (15)$$

که  $n$  بردار یکه عمود بر سطح است. با حل معادله برای کسر حجمی شرط مرزی روی دیواره‌ها به فرم زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\nabla \varphi \cdot n = \left( -\frac{D_T}{D_B} \frac{\nabla T}{T} + \left( \frac{\varphi}{H} \right) \xi L(\xi) \nabla H \right) \cdot n \quad (16)$$

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در کار حاضر میدان یک سیم به‌عنوان منبع مغناطیسی در نظر گرفته شده است. اندازه قدرت میدان مغناطیسی سیم به صورت معادله (17) تعریف می‌شود.

$$H = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}} \quad (17)$$

که در این رابطه ( $a, b$ ) مختصات مکان سیم می‌باشد.

#### 3- تنظیمات عددی، مطالعات مش و اعتبارسنجی کد

در کار حاضر کد با زبان ++C شی‌گرا به منظور بررسی دوفاز تریق نانوذرات توسعه داده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال جرم از روش حجم محدود استفاده شده است. از روش مرتبه دو بالا دستی به‌منظور درون‌یابی ترم‌های جابجایی و از روش مرتبه دو اختلاف مرکزی به‌منظور گسسته‌سازی ترهای نفوذ استفاده شده است. ترم‌های زمانی به روش ضمنی مرتبه دو گسسته شده‌اند. برای کوپل سرعت-فشار الگوریتم PISO مورد استفاده قرار گرفته است. عدد کورانت یا گام زمانی  $\Delta t$  بعد 0.1 در نظر گرفته شده است.

شبکه محاسباتی به‌صورت سازمان یافته و توزیع اندازه شبکه به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. در بررسی بر روی استقلال شبکه در بحرانی‌ترین حالت تعداد سلول‌های محاسباتی تا 34000 سلول افزایش داده شد. نتایج حل عددی در تعداد شبکه 27500 به استقلال می‌رسد. به‌طور مثال در جدول 3 نتایج میانگین زمانی کسر حجمی دارو (نانوذره ای که توسط دارو پوشش داده شده است) بر روی بافت هدف به ازای تعداد مش مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که میانگین مقدار دارو روی بافت هدف با تغییر تعداد مش به بالاتر 27500 تغییر نمی‌کند. لذا این تعداد شبکه در کار حاضر برای محاسبات استفاده شده است.

برای اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده در حل دوفاز جریان نانوسیال به روش بونگیورنو، نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران [33] و نتایج عددی شیخ زاده [34]، حاصل از روش دوفازی بونگیورنو، در جریان پایه جابجایی طبیعی نانوسیال در داخل محفظه مقایسه شده است. در "شکل 4-الف" نتایج تغییرات عدد نوسلت برحسب عدد رایلی را برای کار حاضر و نتایج آزمایشگاهی و عددی مذکور نشان داده شده است. نتایج نشانگر همخوانی نسبتاً خوب کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی و سایر تحقیقات عددی است. برای جزئیات بیشتر در مورد

جدول 3 نتایج بررسی عددی مش‌بندی

Table 3 result of mesh study

تعداد سلول	مقدار میانگین زمانی کسر حجمی دارو بر روی بافت هدف در بازه زمانی 40 تا 70 ثانیه
16500	8.49E-04
24000	8.49E-04
27500	1.02E-03
30000	1.02E-03
34000	1.02E-03

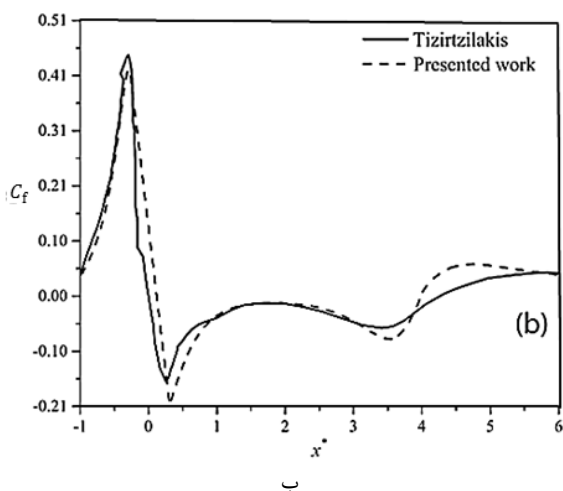
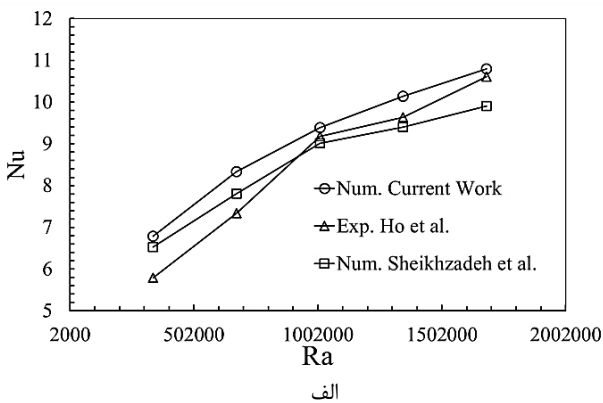


Fig. 4 The results of current numerical method in comparison with (a) the experimental results of Ho et al [33] and numerical result of Sheikhzadeh [34] for benchmark free convection of nanofluid inside the cavity, and (b) the results of Tizirtzilakis [12] inside anourismal.

شکل 4 نتایج روش عددی حاضر در مقایسه با الف- نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران [33] و نتایج عددی شیخ زاده [34] برای مساله پایه جابجایی آزاد نانوسیال داخل محفظه، و ب- نتایج تیزیرتزیلاکس [12] برای جریان فروسیال داخل آنورت شکمی دارای گشادی در حضور سیم حامل جریان

سیم نزدیک می‌شود و در ثانیه تقریباً 41 اثر نیروی کلونین و ترم مگنتوفورسس بر اثرات ادوکشن و نفوذ براونی غالب شده و دارو به سمت شاخه راست، که بافت هدف در آن قسمت قرار دارد، تمایل پیدا می‌کند. در لحظه 45 ثانیه بیشتر دارو وارد شاخه سمت راست می‌شود. البته در زمان‌های بعدی نیروی کلونین سبب ایجاد گردابه ای در محل ورودی رگ سمت راست می‌شود، لذا این گردابه تا حدی ورودی این رگ را مسدود و سبب می‌شوند که بخشی از دارو به سمت رگ سمت چپ منتقل شود. این اتفاق در لحظه 50 قابل مشاهده است. در "شکل 7" در نمایی نزدیک گردابه تشکیل شده در ورودی رگ سمت راست نشان داده شده اند. نکته قابل توجه این است که داروی وارد شده به رگ سمت چپ توسط جریان از این رگ خارج می‌شود ولی آن بخش از دارو که وارد رگ راست شده است، در محل سیم که در حوالی بافت هدف است، تجمع پیدا می‌کند و اصطلاحاً یک قطره دارو در نزدیکی محل سیم، در بالادست بافت هدف ایجاد می‌کند (لحظات 60 به بعد). در این لحظات به صورت تدریجی دارو از این قطره به داخل جریان خون نفوذ پیدا کرده و توسط جریان به سمت پایین دست قطره که بافت هدف در آنجا قرار دارد منتقل می‌شود. لذا این قطره دارو از این نظر که در واقع منبعی است که در لحظات بعدی تامین کننده داروی انتقالی به بافت هدف است اهمیت زیادی می‌تواند داشته باشد. با توجه به "شکل 8" و "شکل 9" که به ترتیب برای حالت 2 و حالت 3 می‌باشند، مطابق با "شکل 2" با نزدیکتر شدن سیم به محل بافت هدف روند کیفی انتقال دارو مشابه با روند توضیح داده شده برای حالت 1 می‌باشد با این تفاوت که مسلماً از نظر کمی مقدار دارو در محل بافت هدف متفاوت خواهد بود.

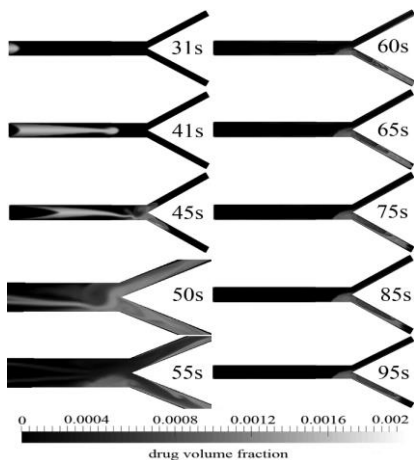


Fig. 6 volume fraction of drug for case 1,  $\varphi=0.002$ ,  $I=3000$

شکل 6 کسر حجمی دارو برای حالت 1،  $\varphi=0.002$ ،  $I=3000$

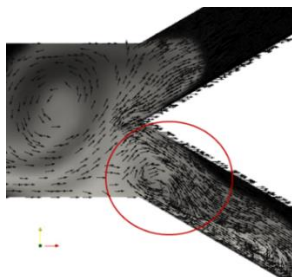


Fig. 7 close view of formed vortex in entrance of right vessel at time 50 for case 1,  $\varphi=0.002$ ,  $I=3000$

شکل 7 نمای نزدیک از گردابه موجود در ورودی رگ سمت راست در ثانیه 50، حالت 1،  $\varphi=0.002$ ،  $I=3000$

گذرنده از سیم بر عملکرد دارورسانی مطالعه می‌شود. فرآیند شبیه‌سازی به این صورت می‌باشد که از زمان 0 تا 30 ثانیه دارو تزریق نمی‌شود و فقط خون جریان دارد تا به حالت پایا برسد. در بازه زمانی 30 تا 40 ثانیه دارو از مرز ورودی تزریق می‌شود. میدان مغناطیسی از ثانیه 30 تا انتهای شبیه‌سازی به صورت پیوسته اعمال می‌شود. در حالی که بعد از زمان 40 ثانیه تزریق دارو متوقف می‌شود.

#### 1-4- بررسی تاثیر موقیت سیم

در مسئله موردنظر ابتدا تاثیر موقیت سیم بر روی نحوه انتشار دارو در داخل رگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. سه موقیت مکانی مختلف برای سیم مطابق با جدول 1 در نظر گرفته شده است. شماتیک مسائل مورد بررسی در سه حالت 1، حالت 2 و حالت 3 در "شکل 2 و 3" نشان داده شده است. مقدار جریان عبوری از همه سیم‌ها یکسان و برابر 3000 آمپر می‌باشد. در "شکل 5" کسر حجمی نانوذررات پوشش داده شده توسط دارو در حالتی که میدان مغناطیسی وجود ندارد یعنی جریان گذرنده از سیم صفر آمپر است در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. نوار رنگی در شکل‌ها کسر حجمی نانوذررات پوشش داده شده توسط دارو را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در این حالت پس از تزریق دارو در ثانیه 30 دارو توسط جریان ادوکت می‌شود و در حین حرکت بخشی از دارو به واسطه ترم براونین در خون نفوذ پیدا می‌کند. تقریباً در ثانیه 45 دارو به محل دوشاخه می‌رسد و در این محل جریان نانوذررات به دو قسمت مساوی تقسیم و تقریباً بدون مکث بر روی بافت هدف از این محل دور می‌شود. از لحظه تقریباً 65 ثانیه به بعد دارو به طور کلی از رگ‌ها خارج می‌شود. به همین دلیل است که داروهای سرطانی که خود سمی هستند در حالت‌های معمول نیاز است که با دوز بالا و به مدت طولانی در سیستم گردش خون جریان داشته باشند که نهایتاً به بافت هدف نفوذ پیدا کنند. از آن‌جا که این داروها توسط سلول‌های گیرسرطانی نیز جذب می‌شوند، این سلول‌های سالم را نیز از بین می‌برند. "شکل 6" تغییرات کسر حجمی نانوذررات را برای حالت 1، که موقیت سیم برای این حالت در جدول 1 و "شکل 2" ارائه شده است، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پس از تزریق در ثانیه 30 دارو توسط جریان به محل

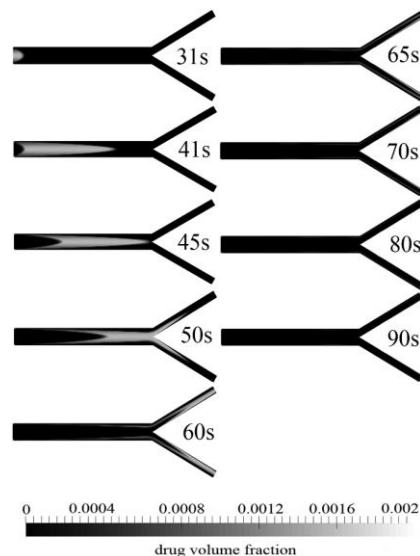


Fig. 5 volume fraction of drug for case 2,  $\varphi=0.002$ ,  $I=0$

شکل 5 کسر حجمی دارو برای حالت 2،  $\varphi=0.002$ ،  $I=0$

حالت 3)، مدت زمان به دام افتادن دارو تغییر چندانی نمی‌کند ولی مقدار دارو در محل بافت بیشتر می‌شود. این نتایج نشانگر این است که با استفاده از میدان مغناطیسی و استفاده از نانوذرات مغناطیسی این امکان فراهم می‌شود که دوز تزریقی داروهای سمی بیماری‌هایی چون سرطان را کاهش داد و دارو را در مکان بافت موردنظر برای مدت طولانی به دام انداخت. در ادامه مقاله در حالت 3 که نتایج بهتری حاصل شد، اثر مقدار جریان سیم بر فرآیند انتقال دارو به بافت هدف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

#### 2-4- بررسی تاثیر مقدار جریان سیم بر روی هدایت دارو

در ادامه مکان سیم در حالت 3 ثابت نگه داشته می‌شود و اثر تغییرات مقدار جریان سیم به مقادیر 1000، 2000، 3000، 4000 و 5000 بر روی هدایت دارو به سمت بافت هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در "شکل 11" تغییر کسر حجمی دارو در طول زمان برای حالتی که جریان سیم برابر با 1000 آمپر است ارائه شده است. نتایج نشانگر این است که در این جریان مقدار نیروی کلین و اثرات مگنتوفورسس به اندازه‌ای نیست که دارو را کاملاً به طرف رگ سمت راست هدایت کند. در نتیجه مقدار کمی داروی اضافی وارد رگ سمت راست می‌شود. به علاوه، داروی وارد شده به این رگ به سمت

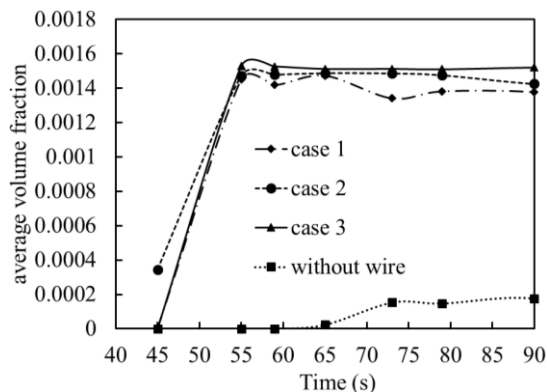


Fig. 10 the chart of effect of different locations of wires on drug capturing in  $\varphi = 0.002, I=3000$

شکل 10 نمودار تاثیر مکان‌های مختلف سیم بر روی بدام انداختن دارو در ناحیه هدف،  $I=3000, \varphi = 0.002$

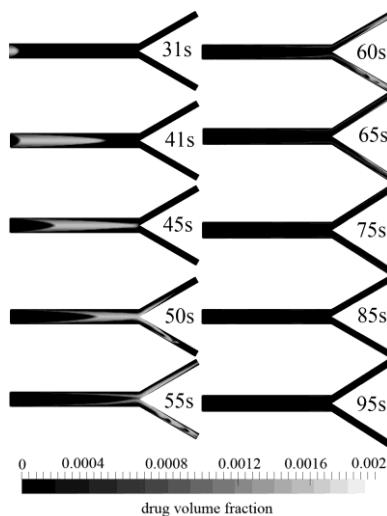


Fig. 11 volume fraction of drug for case 3,  $\varphi=0.002, I=1000$

شکل 11 کسر حجمی دارو برای حالت 3،  $\varphi=0.002, I=1000$

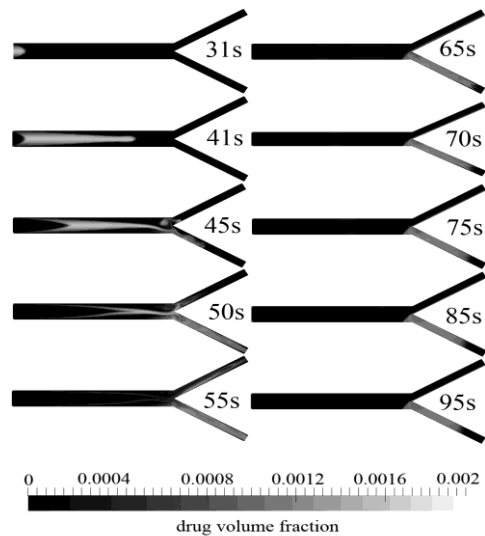


Fig. 8 volume fraction of drug for case 2,  $\varphi = 0.002, I=3000$

شکل 8 کسر حجمی دارو برای حالت 2،  $\varphi = 0.002, I=3000$

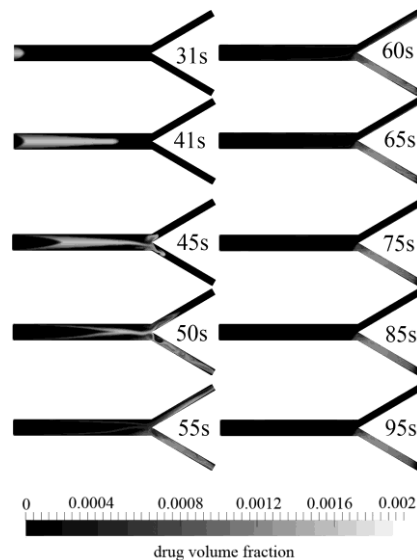
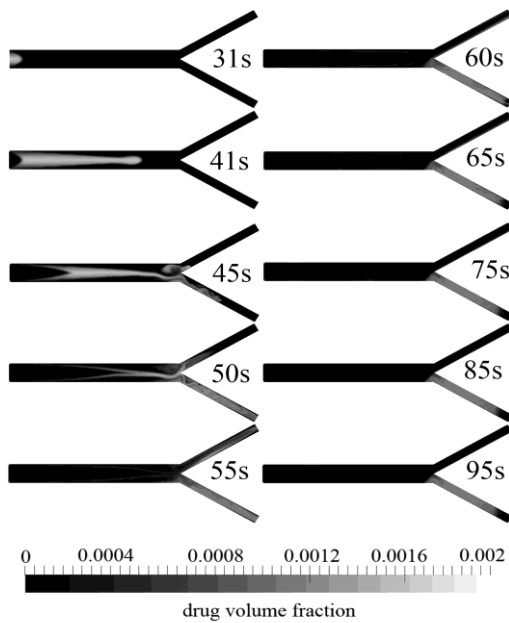


Fig. 9 volume fraction of drug for case 3,  $\varphi=0.002, I=3000$

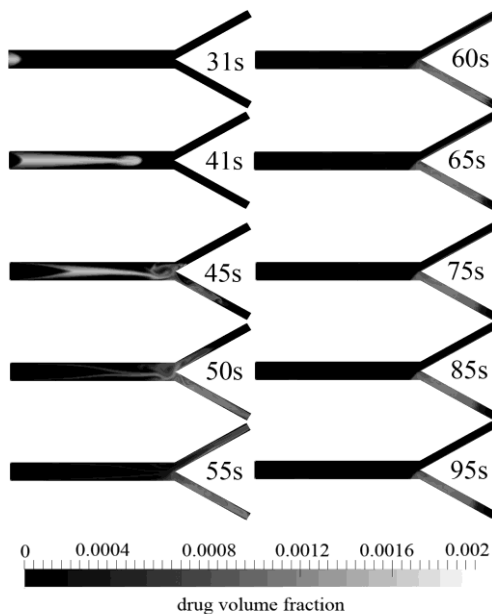
شکل 9 کسر حجمی دارو برای حالت 3،  $\varphi=0.002, I=3000$

به منظور بررسی کمی‌تر، در "شکل 10" تغییرات مقدار میانگین مکانی کسر حجمی دارو روی بافت هدف در طول زمان برای حالت‌های مختلف مقایسه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در حالتی که جریان سیم صفر است یا به عبارت دیگر سیم وجود ندارد فقط در بازه زمانی 65 تا 100 ثانیه مقدار کمی دارو (در حدود کسر حجمی 0.002) در محل بافت هدف به دام افتاده است. این پدیده به این علت است که دارو توسط جریان خون از رگ سمت راست به کلی خارج می‌شود. در صورتی که در هر سه حالت که سیم در مکان‌های مختلف حضور دارد، از ثانیه 50 به بعد تا انتهای مدت زمان مورد بررسی مقدار کسر حجمی به حدود 0.0015، یعنی تقریباً 7.5 برابر حالت بدون سیم، می‌رسد. علت این‌که دارو مدت زمان زیادی در محل بافت هدف حضور دارد پدیده تشکیل قطره دارو و تغذیه بافت از این محل می‌باشد که قبلاً توضیح داده شد. در نتیجه حضور میدان مغناطیسی هم مدت زمان حضور دارو و هم مقدار دارو را در محل بافت هدف افزایش می‌دهد. به‌علاوه، نتایج نشانگر این است که هر چه سیم به محل بافت هدف نزدیک‌تر می‌شود

هدف رسیده است مقدار دارو بر روی بافت هدف ماکزیمم است. پس از این لحظه به دلیل این که قطره دارو تشکیل نمی‌شود و دارو توسط جریان خون از رگ سمت راست خارج می‌شود، کسر حجمی دارو کاهش یافته به سمت صفر میل می‌کند. در مقدار جریان‌های الکتریکی بیشتر از 1000 مشاهده می‌شود که از زمان ثانیه 50 به بعد همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، چون قطره دارو به‌عنوان منبع تامین دارو برای بافت هدف تشکیل می‌شود تا انتهای شبیه‌سازی دارو در بافت هدف به‌صورت مقدار تقریباً ثابت حضور دارد. به‌علاوه، به این دلیل که در جریان 2000 آمپر در ورودی رگ سمت راست گردابه‌های مسدود کننده جریان ایجاد نمی‌شوند مقدار دارو نسبت به سایر حالت‌ها بیشتر است.



**Fig. 13** volume fraction of drug for case 3,  $\phi=0.002$ ,  $I=4000$   
شکل 13 کسر حجمی دارو برای حالت 3،  $\phi=0.002$ ،  $I=4000$



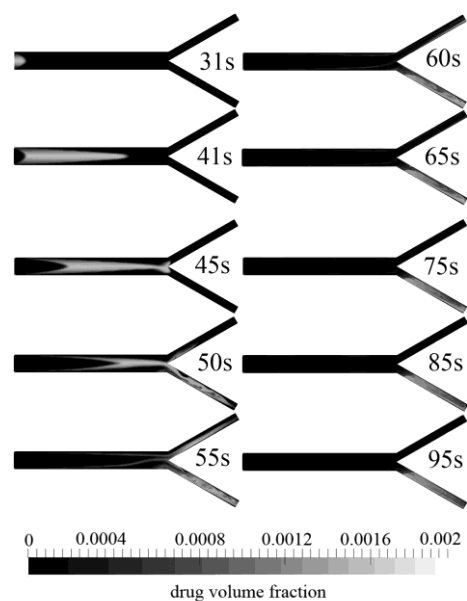
**Fig. 14** volume fraction of drug for case 3,  $\phi=0.002$ ,  $I=5000$   
شکل 14 کسر حجمی دارو برای حالت 3،  $\phi=0.002$ ،  $I=5000$

بافت هدف جذب نمی‌شود. همچنین قطره دارو در این حالت تشکیل نمی‌شود و پس از مدتی کلا دارو از رگ خارج می‌شود. لذا انتظار می‌رود دارو مدت زمان محدودی در محل بافت به دام بیافتد.

با توجه به تغییرات کسر حجمی دارو با زمان برای جریان 2000 آمپر که در "شکل 12" نشان داده شده است، در این جریان مقدار نیروی کلویین و اثرات مگنتوفورسس به اندازه‌ای است که با توجه به شکل در زمان 50 ثانیه بیشتر مقدار دارو وارد رگ سمت راست شده است. به علاوه در زمان 55 واضح است که گردابه‌ای در ورودی رگ سمت راست تشکیل نشده است و این باعث شده که مقدار بسیار کمی از دارو به طرف رگ سمت چپ برود. همچنین برخلاف جریان 1000 آمپر در این حالت قطره دارو در محل سیم تشکیل می‌شود و انتظار می‌رود که این قطره به عنوان منبع تامین دارو سبب حضور دارو به مدت بسیار طولانی در محل بافت هدف شود.

برای جریان 3000 آمپر که نتایج آن در بخش قبل، در "شکل 9" ارائه و توضیح داده شد، روند تغییرات کسر حجمی مشابه جریان 2000 بود با این تفاوت که در زمان 50 تشکیل گردابه در ورودی رگ سمت راست مشاهده شد که این گردابه مانع ورود دارو به این قسمت می‌شد. لذا انتظار می‌رود مقدار دارو در بافت هدف برای جریان 2000 آمپر بیشتر از جریان 3000 آمپر باشد.

با افزایش جریان سیم به 4000 آمپر "شکل 13" و 5000 آمپر "شکل 14" روند مشابهی برای تغییرات کسر حجمی با جریان 3000 آمپر مشاهده می‌شود. با این تفاوت که به دلیل بیشتر شدن نیروی کلویین گردابه‌های بیشتری در این حالت‌ها در ورودی رگ سمت راست ایجاد می‌شوند. در نتیجه به دلیل مسدود شدن بیشتر ورودی رگ سمت راست میزان ورود دارو به این شاخه با افزایش جریان سیم کاهش می‌یابد. با این توضیحات به نظر می‌رسد که در جریان 2000 آمپر میزان به دام افتادن دارو در محل بافت هدف از سایر حالت‌ها بیشتر باشد. به‌منظور بررسی کمی این موضوع در "شکل 15" میانگین مکانی کسر حجمی دارو بر روی بافت هدف در طول زمان رسم شده است. با توجه به شکل در جریان 1000 آمپر در فاصله زمانی 50 تا 60 ثانیه که با توجه به "شکل 11" دارو توسط جریان خون به نزدیکی محل بافت



**Fig. 12** volume fraction of drug for case 3,  $\phi=0.002$ ,  $I=2000$   
شکل 12 کسر حجمی دارو برای حالت 3،  $\phi=0.002$ ،  $I=2000$



## 6- فهرست علائم

$d_p$	قطر نانوذره
$H$	بردار میدان مغناطیسی
$I$	شدت جریان گذرنده از سیم
$J_p$	بردار شار نانو ذره
$k_B$	ثابت بولتزمن
$k_f$	ضریب رسانندگی سیال پایه
$k_{ff}$	ضریب رسانندگی فرو سیال
$k_p$	ضریب رسانندگی نانو ذرات
$L$	تابع لانژوئن
$M$	بردار مغناطیس شدگی
$M_s$	مغناطیس شدگی اشباع نانوسیال مغناطیسی
$m_p$	گشتاور مغناطیسی
$Re$	عدد رینولدز
$T$	دمای مطلق
$V$	بردار سرعت نانو سیال

## علائم یونانی

$\phi$	کسر حجمی
$\mu_f$	لزجت سیال
$\mu_{ff}$	لزجت فروسیال
$\xi$	پارامتر لانژوئن
$\mu_B$	مگنتون بوهر
$\mu_0$	ثابت تراوایی خلا
$\rho_p$	چگالی ذره مغناطیسی
$\rho_{ff}$	چگالی فرو سیال
$X$	قابلیت مغناطیس پذیری

## زیرنویس‌ها

$f$	سیال پایه
$ff$	فروسیال
$P$	نانوذره

## 7- مراجع

- [1] J. Ghandehari, A. Kianifar, Experimental investigation on the effect of iron oxide nanofluid on the exergy efficiency of flat-plate solar collectors in the building, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 217-221, 2016. (in Persian فارسی)
- [2] A. A. Asadi, M. M. Heyhat, Study of using nanofluid in shell and tube heat exchangers with different sizes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 455-458, 2017. (in Persian فارسی)
- [3] H. R. T. Bahrami, S. Zareie, H. Saffari, A numerical analysis of dropwise condensation of nanofluid on an inclined flat plate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 105-114, 2017. (in Persian فارسی)
- [4] S. Darling, S. Bader, A materials chemistry perspective on nanomagnetism, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 15, No. 39, pp. 4189-4195, 2005.
- [5] J. M. Shen, F. Y. Gao, T. Yin, H. X. Zhang, M. Ma, Y. J. Yang, F. Yue, cRGD-functionalized polymeric magnetic nanoparticles as a dual-drug delivery system for safe targeted cancer therapy, *Pharmacological Research*, Vol. 70, No. 1, pp. 102-115, 2013.
- [6] H. Wang, Y. Zhao, Y. Wu, Y. I. Hu, K. Nan, G. Nie, H. Chen, Enhanced anti-tumor efficacy by co-delivery of doxorubicin and paclitaxel with amphiphilic methoxy PEG-PLGA copolymer nanoparticles, *Biomaterials*, Vol. 32, No. 32, pp. 8281-8290, 2011.
- [7] A. S. Lübbe, C. Alexiou, C. Bergemann, Clinical applications of magnetic drug targeting, *Journal of Surgical Research*, Vol. 95, No. 2, pp. 200-206, 2001.
- [8] J. M. Llovet, J. Bruix, Novel advancements in the management of hepatocellular carcinoma in 2008, *Journal of Hepatology*, Vol. 48, pp. S20-

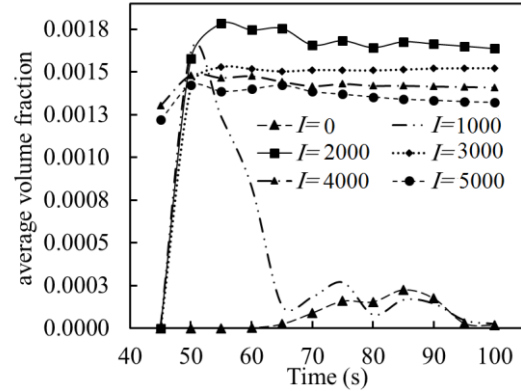


Fig. 15 influence of different amperage in drug targeting, location case3,  $\phi = 0.002$

شکل 15 تاثیر شدت جریان های مختلف در هدایت و به دام انداختن دارو در ناحیه هدف، موقعیت مکانی حالت 3،  $\phi = 0.002$

## 5- نتیجه گیری نهایی

در کار حاضر به بررسی عددی اثر مکان و مقدار جریان گذرنده از سیم بر هدایت نانوذرات پوشش داده شده توسط دارو با قطر 10 نانومتر و کسر حجمی 0.002 به طرف بافت هدف واقع در رگ پای سمت راست جدا شده از آنورت شکمی پرداخته شد. معادله بهبودیافته بونگیورنو با اضافه کردن ترم مگنتوفورسس به دست آمد و معادلات ناپایای حاکم به روش حجم محدود و الگوریتم پیرو حل شد. با توجه به نتایج به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- در حالت بدون وجود سیم دارو به مدت کم و به مقدار کم به محل بافت هدف نفوذ و آنجا تجمع پیدا می‌کند.
- هر چه منبع مغناطیسی که در بالادست بافت هدف است به بافت هدف نزدیکتر باشد عملکرد بهتری از نظر دارورسانی به دست می‌آید.
- وقتی جریان گذرنده از سیم کم است (حدود 1000 آمپر) ترم مگنتوفورسس معادله انتقال کسر حجمی و نیروی کلونین به دلیل کم بودن، قادر به جذب دارو به سمت بافت هدف نیست.
- در حالتی که جریان گذرنده از سیم زیاد است (بالتر از 3000 آمپر) مقدار زیاد نیروی کلونین سبب ایجاد گردابه‌هایی در ورودی رگ سمت راست که بافت هدف در آنجا قرار دارد شده، باعث کاهش تجمع دارو در آنجا می‌شود.
- در مقدار جریان الکتریکی متوسط (حدود 2000 آمپر) و زیاد (بالتر از 3000 آمپر) قطره دارو در بالادست بافت هدف در نزدیکی محل سیم تشکیل می‌شود که عامل مهم در افزایش زمان ماندگاری دارو در بافت هدف است.
- در مقدار جریان متوسط (حدود 2000) در ورودی رگ سمت راست گردابه ایجاد نمی‌شود و به همین دلیل در این جریان بهترین عملکرد دارورسانی مغناطیسی مشاهده شد.
- نتایج کار حاضر نشانگر این است که مدل بونگیورنوی بهبودیافته به خوبی پدیده هدایت نانوذرات پوشش داده شده توسط دارو به وسیله میدان مغناطیسی را مدل‌سازی می‌کند. به علاوه، مقاله حاضر تصدیق کننده‌ی این موضوع است که این روش سبب افزایش تجمع و زمان حضور دارو در محل بافت هدف شده و در صورت استفاده از این روش می‌توان دوز داروهای سمی که مثلا در درمان انواع سرطان استفاده می‌شود را کم کرد.

- 293, No. 1, pp. 455-463, 2005.
- [23] R. Fernández-Pacheco, J. G. Valdivia, M. R. Ibarra, Magnetic nanoparticles for local drug delivery using magnetic implants, *Micro and Nano Technologies in Bioanalysis: Methods and Protocols*, Vol. 311, No. 1, pp. 559-569, 2009.
- [24] A. Nacev, C. Beni, O. Bruno, B. Shapiro, The behaviors of ferromagnetic nano-particles in and around blood vessels under applied magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 6, pp. 651-668, 2011.
- [25] M. Larimi, A. Ramiar, A. Ranjbar, Numerical simulation of magnetic nanoparticles targeting in a bifurcation vessel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 362, pp. 58-71, 2014.
- [26] S. Sharma, V. Katiyar, U. Singh, Mathematical modelling for trajectories of magnetic nanoparticles in a blood vessel under magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 379, pp. 102-107, 2015.
- [27] A. Boghi, F. Russo, F. Gori, Numerical simulation of magnetic nano drug targeting in a patient-specific coeliac trunk, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 437, pp. 86-97, 2017.
- [28] L. Agiotis, I. Theodorakos, S. Samothrakitis, S. Papazoglou, I. Zergioti, Y. Raptis, Magnetic manipulation of superparamagnetic nanoparticles in a microfluidic system for drug delivery applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 401, pp. 956-964, 2016.
- [29] G. Iglesias, A. Delgado, F. González-Caballero, M. Ramos-Tejada, Simultaneous hyperthermia and doxorubicin delivery from polymer-coated magnetite nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 431, pp. 294-296, 2017.
- [30] S. Mirzababaei, T. B. Gorji, M. Baou, M. Gorji-Bandpy, N. Fatouree, Investigation of magnetic nanoparticle targeting in a simplified model of small vessel aneurysm, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 426, pp. 126-131, 2017.
- [31] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, No. 3, pp. 240-250, 2006.
- [32] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, S. A. Zonouzi, Numerical study of the ferrofluid flow and heat transfer through a rectangular duct in the presence of a non-uniform transverse magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 327, pp. 31-42, 2013.
- [33] C. Ho, W. Liu, Y. Chang, C. Lin, Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 8, pp. 1345-1353, 2010.
- [34] G. A. Sheikhzadeh, M. Dastmalchi, H. Khorasanizadeh, Effects of nanoparticles transport mechanisms on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid natural convection in a square enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 66, pp. 51-62, 2013.
- [35] S. Y. Motlagh, H. Soltanipour, Natural convection of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid in an inclined cavity using Buongiorno's two-phase model, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 111, pp. 310-320, 2017.
- [36] S. Y. Motlagh, S. Taghizadeh, H. Soltanipour, Natural convection heat transfer in an inclined square enclosure filled with a porous medium saturated by nanofluid using Buongiorno's mathematical model, *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 2526-2540, 2016.
- S37, 2008.
- [9] R. Jurgons, C. Seliger, A. Hilpert, L. Trahms, S. Odenbach, C. Alexiou, Drug loaded magnetic nanoparticles for cancer therapy, *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 18, No. 38, pp. S2893, 2006.
- [10] G. Wang, Y. Ma, L. Zhang, J. Mu, Z. Zhang, X. Zhang, H. Che, Y. Bai, J. Hou, Facile synthesis of manganese ferrite/graphene oxide nanocomposites for controlled targeted drug delivery, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 401, pp. 647-650, 2016.
- [11] O. Pourmehran, M. Rahimi-Gorji, M. Gorji-Bandpy, T. Gorji, Simulation of magnetic drug targeting through tracheobronchial airways in the presence of an external non-uniform magnetic field using Lagrangian magnetic particle tracking, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 393, pp. 380-393, 2015.
- [12] E. Tzirtzilakis, Biomagnetic fluid flow in an aneurysm using ferrohydrodynamics principles, *Physics of Fluids*, Vol. 27, No. 6, pp. 061902, 2015.
- [13] S. Bose, M. Banerjee, Magnetic particle capture for biomagnetic fluid flow in stenosed aortic bifurcation considering particle-fluid coupling, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 385, pp. 32-46, 2015.
- [14] J. Haverkort, S. Kenjereš, Optimizing drug delivery using non-uniform magnetic fields: a numerical study, *Proceeding of 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*, Antwerp, Belgium: Springer Berlin Heidelberg, pp. 2623-2627, November 2008.
- [15] S. Kayal, D. Bandyopadhyay, T. K. Mandal, R. V. Ramanujan, The flow of magnetic nanoparticles in magnetic drug targeting, *RSC Advances*, Vol. 1, No. 2, pp. 238-246, 2011.
- [16] M. R. Habibi, M. Ghassemi, M. H. Hamed, Analysis of high gradient magnetic field effects on distribution of nanoparticles injected into pulsatile blood stream, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 8, pp. 1473-1482, 2012.
- [17] M. Halupka-Bryl, M. Bednarowicz, B. Dobosz, R. Krzymiński, T. Zalewski, B. Wereszczyńska, G. Nowaczyk, M. Jarek, Y. Nagasaki, Doxorubicin loaded PEG-b-poly (4-vinylbenzylphosphonate) coated magnetic iron oxide nanoparticles for targeted drug delivery, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 384, pp. 320-327, 2015.
- [18] F. Ali, N. A. Sheikh, I. Khan, M. Saqib, Magnetic field effect on blood flow of Casson fluid in axisymmetric cylindrical tube: A fractional model, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 423, pp. 327-336, 2017.
- [19] A. K. Hoshair, T. A. Le, F. U. Amin, M. O. Kim, J. Yoon, Studies of aggregated nanoparticles steering during magnetic-guided drug delivery in the blood vessels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 427, pp. 181-187, 2017.
- [20] T. Lunnoo, T. Puangmali, Capture efficiency of biocompatible magnetic nanoparticles in arterial flow: A computer simulation for magnetic drug targeting, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 10, No. 1, pp. 426, 2015.
- [21] K. M. Pondman, N. D. Bunt, A. W. Majenburg, R. J. Van Wezel, U. Kishore, L. Abelmann, E. Johan, B. Ten Haken, Magnetic drug delivery with FePd nanowires, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 380, pp. 299-306, 2015.
- [22] A. D. Grief, G. Richardson, Mathematical modelling of magnetically targeted drug delivery, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.