

## مطالعه عددی تاثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت محوری بر رشد حباب در جریان جوششی نانو سیال مغناطیسی شونده داخل یک میکروکانال

موسی محمدپور فرد<sup>۱</sup>

دانشیار

مهدي قرباني فیروزسالاری<sup>۲</sup>

کارشناسی ارشد

در این پژوهش، چگونگی رشد حباب در فرآیند جوشش هسته‌ای آب خالص و فروسیال (سیال حاوی نانوذرات اکسید آهن) بصورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود و مدل VOF مورد بررسی قرار گرفته است. پس از اعتبار سنجی نتایج بدست آمده با نتایج موجود در ادبیات فن، تاثیر اعمال میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت محوری بر رشد یک حباب در فرآیند جوشش نانوسیال مغناطیسی شونده بررسی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، در حضور میدان مغناطیسی با گرادیان‌های مثبت، انتقال حرارت از دیواره‌ها بیشتر شده و گرمای دیواره‌ها بهتر انتقال می‌یابد و این موضوع سبب کاهش رشد حباب می‌شود در حالیکه میدان با گرادیان منفی، باعث افزایش رشد حباب می‌شود. در واقع استفاده از میدان‌های مغناطیسی با گرادیان مثبت سبب افزایش بازدهی میکرو سیستم های خنک کننده می‌شود.

واژه‌های راهنما: حباب، مدل VOF، جوشش نانوسیال، میدان مغناطیسی غیریکنواخت، میکروکانال

### ۱- مقدمه

فرآیند خنک کاری به کمک سیالات دارای کاربردهای مهمی از جمله در صنعت تولید توان، حمل و نقل، ماشین کاری و الکترونیک می‌باشد. امروزه تجهیزات انتقال حرارتی به منظور افزایش راندمان، نیازمند به کوچک سازی و افزایش شدت انتقال حرارت به ازای واحد سطح هستند. سیالاتی نظیر آب و اتیلن گلیکول با توجه به خواص حرارتی پایین، توانایی محدودی در انتقال گرما دارند و با توجه به اینکه فلزها دارای ضریب رسانش حرارتی تا سه برابر بیشتر از سیالات مذکور می‌باشند، بر این اساس در دهه‌های اخیر استفاده از ترکیب نانوذرات و سیال برای افزایش انتقال حرارت پیشنهاد شده است.

در سال‌های اخیر علاوه بر استفاده از نانو سیال به عنوان سیال خنک کننده به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت، پژوهشگران علاقمند به کنترل هیدرودینامیکی و یا حرارتی سیال‌های خنک کننده نیز هستند. یکی از روش‌های مناسب برای این کار استفاده از سیال مغناطیسی و اعمال میدان بر آن است.

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز Mohammadpour@azaruniv.edu

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز bcs\_ghorbani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۴/۲۲

نانوسیال‌های مغناطیسی یا فروسیال‌ها در واقع گونه‌ی خاصی از نانوسیال‌ها هستند که در آن‌ها نانوذرات مغناطیسی با ابعادی در حدود ۳ الی ۱۵ نانومتر بصورت پایدار در یک سیال پایه نظیر آب و یا نفت پراکنده شده‌اند. با اعمال میدان مغناطیسی در شدت‌ها و جهات مختلف می‌توان تا حدودی بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی این نوع از سیال کنترل داشت که این یک مزیت مهم برای این گونه از نانوسیالات به شمار می‌آید [۱]. امروزه با توجه به نیازهای تحقیقاتی و استفاده‌های تجاری از وسایل مکانیکی با ابعاد میکرو و نانو رواج بسیار زیادی یافته است. کانال‌ها از مهمترین بخش‌های این سیستم‌ها هستند که به منظور انتقال سیال با اهداف مختلف مانند انتقال حرارت، جابجایی و سوخت رسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی سیستم‌های مشابه جریان در میکروکانال‌ها از جمله جریان در مویرگ‌ها و دیگر بافت‌های حیاتی با ابعاد میکرو، تراشه‌های کامپیوتری و... باعث شده تا این زمینه بسیار مورد توجه محققان قرار گیرد. معمولاً فرآیندهای صنعتی با اعمال گرما و جوشش سیال همراه است. در جریان داخل میکروکانال‌ها وقتی دمای دیواره‌ها از دمای اشباع سیال در حال جریان بیشتر باشد تشکیل حباب امری اجتناب ناپذیر بوده که موضوعی مهم و تاثیرگذار در انتقال حرارت محسوب می‌شود. در جوشش جریانی در ابعاد بزرگتر نظیر کانال‌ها تشکیل حباب تاثیر کمتری نسبت به حالت میکرو دارد [۲].

موخرجی و کندلیکار [۳] در تحقیقات خود در مورد جوشش جریانی در لوله با قطر زیاد و میکروکانال‌ها با عرض‌های مختلف ورودی مشاهده کردند که وجود جریان در داخل میکروکانال به مهاجرت سریع حباب از روی دیواره کمک نموده، در نتیجه حباب در مقایسه با جوشش استخری و به ازای انتقال حرارت یکسان از دیواره، رشد کمتری خواهد داشت. همچنین آنها در بررسی عرض‌های متفاوت ورودی میکروکانال مشاهده کردند که هر چقدر عرض ورودی کوچکتر باشد حباب سریع‌تر بصورت عرضی رشد کرده و مقطع میکروکانال را پر می‌کند. با افزایش عرض میکروکانال مدت زمان لازم برای رشد عرضی افزایش یافته و زمان بیشتری طول خواهد کشید تا حباب تمام عرض کانال را بپوشاند. همچنین افزایش عرض کانال منجر به همراستایی بیشتر حبابها با جریان می‌شود.

وو و همکاران [۴] روشی را برای شبیه‌سازی دینامیک حباب روی سطح گرم شده با حل معادله هدایت سه بعدی ناپایا پیشنهاد نموده‌اند. آنها همچنین مساحت تاثیر گرفته از حباب، پهنای جریان، تغییرات درجه حرارت سطح و زمان انتظار حباب<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین موخرجی و همکاران [۵] با انجام آزمایشاتی درباره‌ی نحوه رشد حباب و پارامترهای موثر بر آن، گزارش داده‌اند که هرچه دمای سطح میکروکانال افزایش یابد مدت زمان لازم برای افزایش قطر حباب کاهش یافته و همچنین افزایش شار گرمی نانو سیال باعث کاهش رشد حباب‌ها می‌شود. در شرایط مساوی استفاده از نانوذرات با چگالی بیشتر در مقایسه با دیگر نانوذرات، مدت زمان لازم برای تشکیل و رشد حباب را افزایش می‌دهد.

کندلیکار و همکاران [۶] آزمایشاتی درباره‌ی فرآیند رشد حباب در یک میکروکانال برنجی انجام داده و نشان دادند که ضرایب بالای انتقال حرارت در جوشش سیال منجر به ایجاد ناحیه سوپرهیت شده که این خود سبب رشد سریع حباب خواهد شد.

<sup>1</sup> Bubble wait time

لی و همکاران [۷] از آزمایشات خود دریافتند که روند رشد حباب در میکروکانالها تا زمانی که قطر حباب کمتر از قطر میکروکانال باشد بصورت ایزوتروپیک بوده و پس از آن از طرف دیوارهها تحت فشار قرار گرفته و بهطور قابل توجهی تحت تاثیر نیروی دراگ جریان قرار میگیرد. اخیرا یانگ و همکاران [۸] در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که رشد حباب و جدایش از دیوار گرم به میزان قابل توجهی تحت تاثیر لایه مرزی حرارتی نزدیکی دیواره می باشد و رفتار حباب در شرایط یکسان حرارتی در یک لوله متفاوت از میکروکانال است که آن هم ناشی از وجود تنش برشی بالا در جهت جریان بر روی دیواره است. اعتقاد بر این است که رفتار حباب در طول مراحل رشد خود با میزان انتقال حرارت به آن، قابل کنترل است. کرنول و کو [۹] در آزمایشات جوشش جریان مبرد  $R - 111$  در یک میکروکانال مستطیلی با سرعت های ورودی پایین، الگوهای تشکیل حباب را مشخص کرده اند. آنها آزمایشات خود را در میکروکانال هایی با عرض کم انجام داده و این نتیجه حاصل شد که با کاهش عرض ورودی میکروکانال، حباب در کمترین زمان ممکن بصورت عرضی رشد کرده و سپس رشد طولی خود را آغاز می کند. همچنین مشخص گردید که رشد عرضی حباب در طول کمتری از میکروکانال اتفاق افتاده و بیشتر طول میکروکانال به رشد طولی اختصاص می یابد.

جون هنگ و همکاران [۱۰] جوشش استخری نانوسیال مغناطیسی با سیال پایه ی آب را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که در یک شار حرارتی ثابت افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی با اضافه نمودن نانوذرات مغناطیسی نسبت به سیال پایه رخ داده و این تاثیر ناشی از وجود نانوذرات همراه با مواد فعال سطحی است، با اعمال میدان مغناطیسی افزون می گردد. آن ها دلیل این افزایش را نیز چنین عنوان کرده اند که با اعمال یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت، قطر جدائی حباب ها کاهش یافته، علاوه بر این حباب ها از وسط باریک و از پایین پهن شده که این موضوع شتاب گیری و رشد سریع حباب ها و نهایتا افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی را به دنبال دارد.

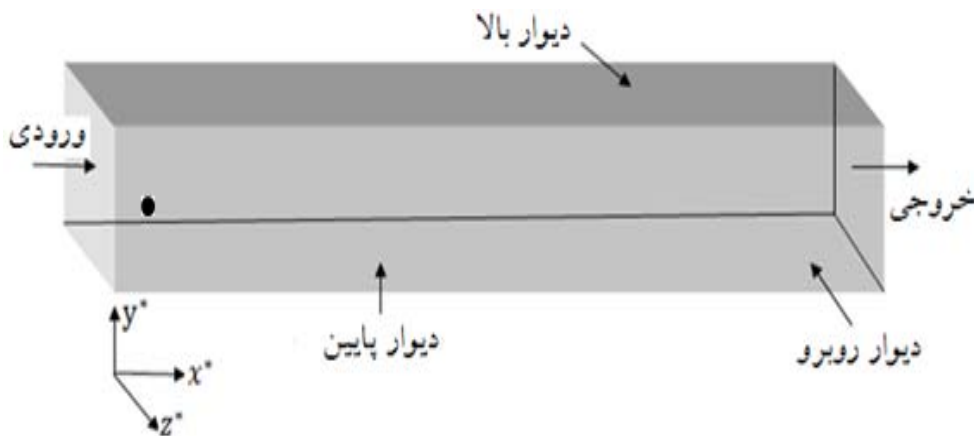
اهمیت موضوع مورد بررسی در کار حاضر وقتی بیشتر احساس می شود که بیان شود در صورت مهار رشد حباب می توان ایجاد حالت شار حرارتی بحرانی را به تاخیر انداخت. همانطور که می دانیم زمانی که مایع خنک کن در طی تبادل گرما از یک سطح فلزی گرم دچار تغییر فاز شود انتقال حرارت زیادی رخ می دهد، اما مشکل جدی که در این زمینه وجود دارد شرط محدودکننده ای بنام شار حرارتی بحرانی<sup>۱</sup> در استفاده از جوشش وجود دارد. لازم به توضیح است تحت این شرایط، بخار موجود در سیستم روی سطح فلز گرم را پوشانده و باعث عدم تماس مایع می شود. در این حالت ضریب انتقال گرما افت شدید پیدا کرده و به دنبال آن دمای سطح دچار افزایش چشمگیری می گردد که حتی می تواند منجر به تخریب دیواره نیز گردد. پس شار حرارتی بحرانی، بیشترین شار حرارتی است که در تجهیزات حرارتی می توان بدون آسیب دیدن سطح حرارتی از آن استفاده کرد. لذا یکی از روش ها برای افزایش خنک کاری، بحث به تاخیر انداختن یا به عبارتی افزایش شار حرارتی بحرانی در سیستم های مختلف می باشد. در بحث جوشش جریانی برای حفظ پایداری بیشتر سیال که در نتیجه عدم رشد حباب ها که خود عامل آشفته گی جریان می باشند، اتفاق می افتد که میزان خنک کاری افزایش چشمگیری پیدا می کند.

<sup>1</sup> Critical heat flux

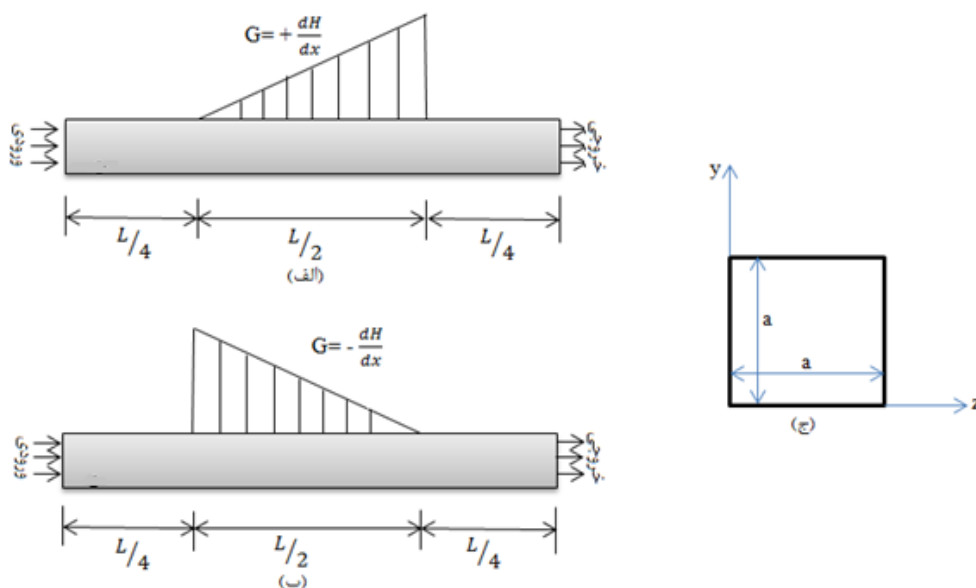
با توجه به آنچه گفته شد، بررسی رشد حباب و امکان کنترل رشد آن در سیستم‌های میکرو (که دارای ابعاد قابل مقیسه با قطر حباب دارند) بسیار حائز اهمیت است. با توجه به ابعاد مسئله، رشد حباب تاثیر بسزایی در انتقال حرارت از دیواره‌ها و موضوع خنک‌کاری و بحث پایداری سیال در میکروکانال‌ها دارد. در کار حاضر سعی شده است ابتدا به بررسی تاثیر افزودن نانوذرات اکسید آهن به سیال پایه را در فرآیند رشد حباب مطالعه و سپس با استفاده از میدان‌های مغناطیسی با گرادیان‌های مختلف رشد حباب را کنترل کرده و در صورت امکان راندمان سیستم را افزایش داد.

## ۲- تعریف مسئله

به منظور بررسی تاثیر میدان بر رشد یک حباب در جریان جوششی، جریان آرام و انتقال حرارت جابجایی برای نانوسیال مغناطیسی با سیال پایه آب و ۴ درصد اکسید آهن ( $Fe_3O_4$ ) در یک میکروکانال مستطیلی مستقیم به ابعاد  $(x^*, y^*, z^*) = (3/96, 0/99, 0/99)$  در نظر گرفته شده که نسبت به ضلع مقطع ورودی (مربعی شکل) بی بعدسازی صورت گرفته است. میکروکانال مطابق شکل (۱) افقی، دیواره‌ها دارای شرط مرزی دما ثابت، طول لوله  $L$  و هر ضلع سطح مقطع کانال  $a$  می‌باشد. مطابق شکل ۲ میدان مغناطیس غیر یکنواخت محوری با گرادیان مثبت و منفی در قسمت مشخصی از طول لوله (از  $x = L/4$  تا  $x = 3L/4$ ) اعمال شده است. حباب در صفحه روبرویی  $(x^* - y^*)$  به شعاع  $0/02$  میلی‌متر با مختصات مرکز  $(x^*, y^*, z^*) = (0/05, 0/1, 0)$  قرار داده شده است.



شکل ۱- هندسه مورد بررسی



شکل ۲- هندسه و میدان‌های مورد استفاده (الف) میدان با گرادیان مثبت (ب) میدان با گرادیان منفی (ج) مقطع ورودی میکروکانال

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه آب، بخار آب و نانو ذره اکسید آهن ( $Fe_3O_4$ )

خواص	آب خالص	بخار آب	نانوذره (اکسید آهن)
$\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	۹۹۸	$5542 \times 10^{-4}$	۵۲۰۰
$c_p \left(\frac{j}{kg.K}\right)$	۴۱۸۲	۲۰۱۴	۶۷۰
$k \left(\frac{w}{m.K}\right)$	۰/۶	$261 \times 10^{-4}$	۶
$\mu \left(\frac{kg}{m.s}\right)$	$1.003 \times 10^{-6}$	$134 \times 10^{-7}$	$351.05 \times 10^{-7}$
$\beta \left(\frac{1}{K}\right)$	$36 \times 10^{-5}$	$8/36 \times 10^{-8}$	$131 \times 10^{-7}$

در جدول (۱) خواص ترموفیزیکی سیال پایه آب، بخار آب و نانو ذره اکسید آهن ارائه شده است. لازم به ذکر است در کار حاضر به منظور اجتناب از پیچیدگی زیاد، از تعریف فاز سوم پرهیز شده و خواص آب مایع حاوی نانوذرات با استفاده از روابط بر پایه مدل مخلوط (بر اساس توزیع چگالی) بیان شده است.

### ۳- معادلات حاکم

با در نظر گرفتن جریان نانوسیال بصورت آرام، پایا و غیرقابل تراکم و فرض خواص ترموفیزیکی ثابت به غیر از چگالی که بصورت تابعی از دما (تقریب بوزینیسک) در معادله مومنتوم بیان می‌شود و با صرف نظر کردن از اتلافات ویسکوز، معادلات بقا بصورت زیر بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی [۵]:

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\vec{m}}{\rho^2} \cdot \nabla \rho \quad (1)$$

که در آن  $m$  شار جرمی سیال در حال تبخیر در سطح مشترک دو فاز بوده و از رابطه زیر تعیین می گردد.

$$m = -\frac{k_l \nabla T}{h_{fg}} \quad (۲)$$

در رابطه فوق  $k_l$  مربوط به ضریب هدایت فاز مایع است.

معادله اندازه حرکت:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \rho \beta_T (T - T_{sat}) \vec{g} - \sigma \kappa \nabla \zeta + \nabla \cdot \mu \nabla \vec{u} + \nabla \cdot \mu \nabla \vec{u}^T + \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} \quad (۳)$$

در روابط فوق  $\rho, \mu, \beta$  به ترتیب چگالی، لزجت و ضریب انبساط حرارتی هستند. همچنین جمله‌ی  $\rho \beta_T (T - T_{sat}) \vec{g}$  مربوط به نیروی شناوری (مدل بوزینسک) بوده و در آن  $T_{sat}$  دمای اشباع سیال است. جمله‌ی  $\sigma \kappa \nabla \zeta$  مربوط به نیروی کشش سطحی و جمله‌ی  $\mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}$  مربوط به نیروی کلویین است که در صورت نبودن گرادیان میدان مغناطیسی برابر صفر خواهد بود. لازم به توضیح است در کار حاضر نیازی به حل معادلات ماکسول جهت تعیین توزیع میدان مغناطیسی نیست و مساله در ادامه با فرض وجود میدان مغناطیسی با گردایان‌های ثابت و مشخص حل شده است. چگالی و لزجت بایستی با توجه به شرایط حباب و تعادل نیروها در سطح مشترک تعیین گردند. بنابراین از تعادل فشار در طرفین سطح مشترک بین دو فاز روابط زیر برای  $\mu, \rho$  بدست می آید:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_V + (\rho_L - \rho_V) \zeta \\ \mu &= \mu_V + (\mu_L - \mu_V) \zeta \end{aligned} \quad (۴)$$

همچنین  $\kappa$  در معادله ۳ بیانگر سطح مشترک بوده و از رابطه زیر تعیین می گردد.

$$\kappa(\varphi) = \nabla \cdot \left( \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \quad (۵)$$

در رابطه فوق  $\varphi$  معرف منحنی سطح مشترک (سطح آزاد حباب) است. در حقیقت  $\varphi$  بیانگر شعاع انحنای منحنی سطح مشترک بوده و بسته به فاصله بین دو گره در شبکه بندی در فرمول‌های زیر مقادیر مشخصی را به خود می گیرد.  $\zeta$  که در عبارت کشش سطحی است تابع هویساید<sup>۱</sup> بوده و از رابطه زیر مشخص می گردد [۴]:

$$\begin{aligned} \zeta &= 1 & \text{اگر} & \varphi \geq +1.5d \\ \zeta &= 0 & \text{اگر} & \varphi \leq -1.5d \\ \zeta &= 0.5 + \frac{\varphi}{(3d)} + \frac{1}{2\pi} \sin \left[ \frac{2\pi\varphi}{(3d)} \right] & \text{اگر} & |\varphi| \leq 1.5d \end{aligned} \quad (۶)$$

که  $d$  فاصله بین دو گره می باشد.

معادله‌ی انرژی:

<sup>۱</sup> Heaviside function

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot kT \quad (7)$$

در روابط فوق  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال می باشد.

### ۳-۱- خواص ترموفیزیکی مخلوط

چگالی مخلوط:

$$\rho_m = \alpha_p \rho_p + (1 - \alpha_p) \rho_l \quad (8)$$

لزجت مخلوط:

$$\mu_m = (1 + 2.5\alpha_p) \mu_l \quad (9)$$

رسانش گرمایی مخلوط:

$$k_m = \left( \frac{k_p + (n-1)k_l - (n-1)(k_l - k_p)\alpha_p}{k_p + (n-1)k_l + (k_l - k_p)\alpha_p} \right) \beta_l \quad (10)$$

رابطه (۱۰) برای اولین بار توسط همیلتون و کراسر [۱۱] ارائه شد که در آن  $n$  ضریب شکل بوده و برای ذرات کروی مقدار آن برابر با ۳ است.

ضریب انبساط حرارتی مخلوط [۱۲]:

$$\beta_m = \left( \frac{1}{1 + \frac{(1-\alpha_p)\rho_l}{\alpha_p\rho_p}} \frac{\beta_p}{\beta_l} + \frac{1}{1 + \frac{\alpha_p\rho_p}{(1-\alpha_p)\rho_l}} \right) \beta_l \quad (11)$$

ظرفیت حرارتی ویژه مخلوط:

$$C_{p,m} = \alpha_p C_{p,p} + (1 - \alpha_p) C_{p,l} \quad (12)$$

با استفاده از روابط بر پایه مدل مخلوط (بر اساس توزیع چگالی)، خواص آب حاوی نانوذره تعیین و در جدول (۲) ارائه شده است:

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی آب حاوی نانوذرات

خواص	آب حاوی نانوذرات
$\rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	۱۱۴۸/۰۸
$c_p \left( \frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \right)$	۳۸۵۸/۰۴۵۸
$k \left( \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right)$	$۸۱۶ \times ۱۰^{-۳}$
$\mu \left( \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right)$	$۲۸۱۰۵ \times ۱۰^{-۷}$
$\beta \left( \frac{1}{\text{K}} \right)$	$۲۹۸۱۲ \times ۱۰^{-۸}$

## ۳-۲- شرایط مرزی

معادلات مذکور با شرایط مرزی زیر حل می‌شوند:

در ورودی:

$$x^* = 0; u = 0.146 \text{ m/s}; v = w = 0 \quad (13)$$

به منظور انجام مقایسه مقدار سرعت برابر  $u = 0.146 \text{ m/s}$  انتخاب شده است. همچنین در دیواره‌ها شرایط مرزی حرارتی دما ثابت در نظر گرفته شده است.

$$u = v = w = 0, T = T_{\text{wall}} = 105 \text{ K} \quad (14)$$

در خروجی نیز شرط فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. عدد بی بعد ناسلت بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{\bar{h}l}{k_l} \quad (15)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{A} \int_0^A h dA \quad (16)$$

جهت تعیین  $\bar{h}$  در رابطه (۱۶) ابتدا باید مقدار  $h$  تعیین گردد.

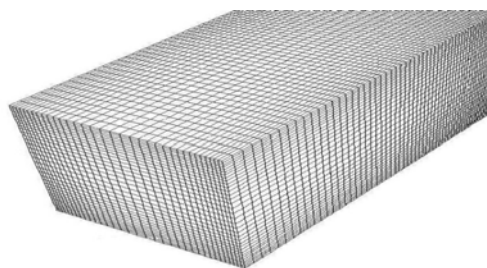
$$h = \frac{-k_l \frac{\partial T}{\partial y_{\text{wall}}}}{T_w - T_{\text{sat}}} \quad \text{برای دیواره های افقی} \quad (17)$$

$$h = \frac{-k_l \frac{\partial T}{\partial z_{\text{wall}}}}{T_w - T_{\text{sat}}} \quad \text{برای دیواره های قائم}$$

بعد از محاسبه مقدار  $h$  از رابطه ۱۷، مقدار  $\bar{h}$  محاسبه خواهد شد.

گام زمانی در حل مسئله از مرتبه  $10^{-6}$  انتخاب شده است (برای گام‌های زمانی  $10^{-7}$  حجم محاسبات افزایش چشمگیری پیدا می‌کند در حالیکه تاثیر آن بر نتایج بسیار اندک و از این رو قابل چشم‌پوشی است). هندسه‌ی مسئله مطابق شکل (۳) در نرم‌افزار *Gambit* تولید و شبکه‌بندی شده است. معادلات دیفرانسیل غیرخطی سه بعدی حاکم بر مسئله نیز با استفاده نرم افزار *ANSYS FLUENT 14* بر اساس روش حجم محدود حل شده‌اند. جهت حل مسئله از حل‌کننده‌ی فشار محور، برای ارتباط فشار و سرعت از اسکیم پیزو و برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. لازم به توضیح است جهت اعمال میدان مغناطیسی به معادله مومنتوم و انرژی، سابروتینی به زبان *C++* نوشته شده و به عنوان *UDF* به نرم افزار اضافه شده است.





شکل ۳- شبکه بندی انجام شده

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- اعتبارسنجی و آزمون استقلال از شبکه

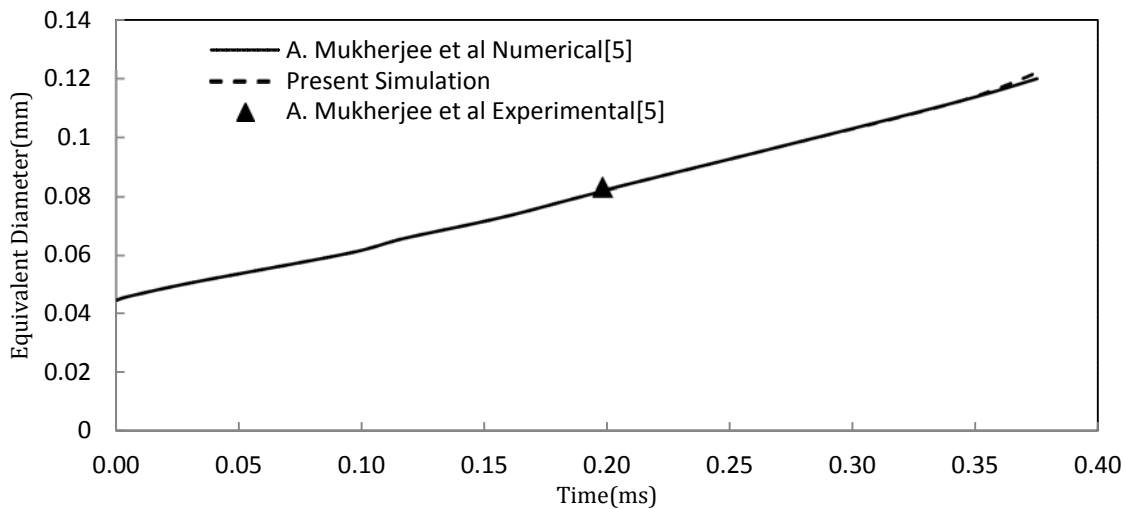
برای نشان دادن صحت مدل حاضر و دقت حل عددی، مقایسه‌ای با نتایج موجود در ادبیات فن انجام شده است. در غیاب میدان مغناطیسی و با استفاده از فروسیال (نانوسیال حاوی اکسید آهن)، نتایج حل عددی حاضر با نتایج تجربی و عددی موخرجی و همکاران [۵] مقایسه شده است. جدول (۳) نتایج حاصل از آزمون استقلال از شبکه را نشان می‌دهد که بیانگر این است که شبکه بندی بهینه شبکه‌ای است که از ۳۲۰، ۸۰ و ۴۰ گره به ترتیب در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  تشکیل شده باشد. نتایج این جدول نشان دهنده این است که افزایش در تعداد گره‌ها به بیشتر از تعداد مذکور تنها باعث تغییرات بسیار ناچیزی در سرعت بی بعد و دمای بی بعد در نقطه مذکور می‌شود. به منظور کاهش حجم محاسبات و به علت تقارن هندسه، میکروکانال را در راستای  $z$  برش داده و تعداد ۴۰ گره برای نصف آن به کار رفته است.

جدول ۳- آزمون استقلال از شبکه

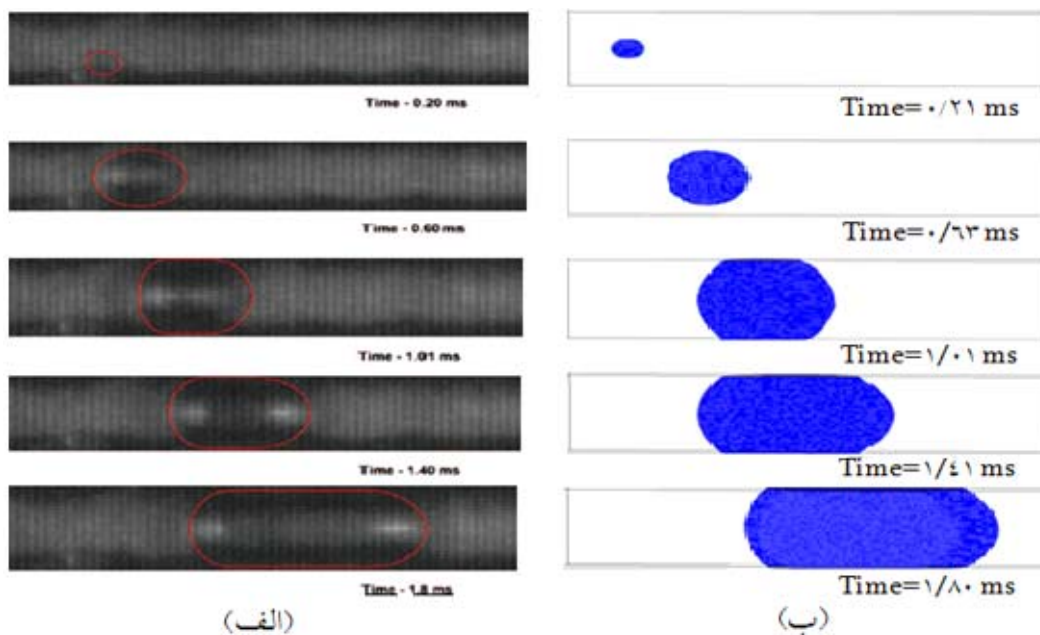
$Re=100, \frac{x}{L}=0.5$			
	تعداد گره $x \times y \times z$	$V/V_0$	$T/T_0$
محور $x$	$300 \times 80 \times 40$	1/145511283	1/004034101
	$320 \times 80 \times 40$	1/145402877	1/004035468
	$340 \times 80 \times 40$	1/145401388	1/004035851
محور $y$	$320 \times 60 \times 40$	1/145508654	1/004037251
	$320 \times 80 \times 40$	1/145402877	1/004034759
	$320 \times 90 \times 40$	1/145392296	1/004034112
محور $z$	$320 \times 80 \times 20$	1/145504389	1/004035141
	$320 \times 80 \times 40$	1/145402877	1/004034759
	$320 \times 80 \times 60$	1/145401263	1/004034266

بعد از انتخاب مناسب‌ترین شبکه بندی، قطر معادل بدست آمده از کار حاضر با نتایج تجربی و عددی ارائه شده در مرجع [۵] مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است تطابق خوبی بین نتایج برقرار است. لازم به توضیح است در مرجع اشاره شده برای بازه زمانی مورد مطالعه (یعنی تا  $0.4$  میکروثانیه) فقط یک داده تجربی گزارش شده بود.

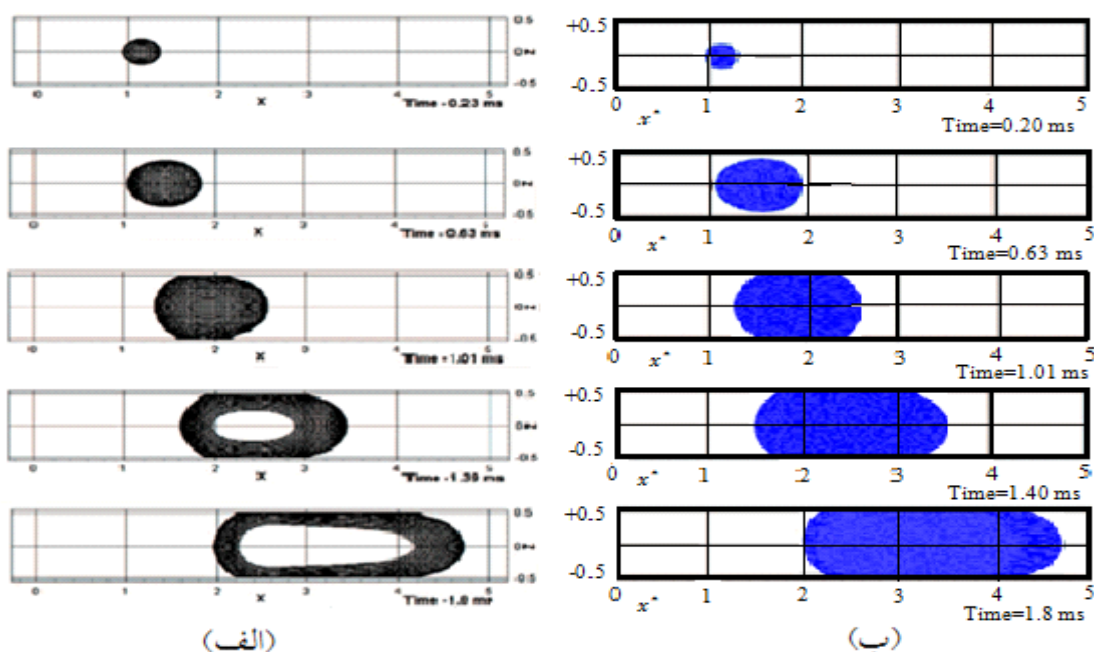
شکل‌های (۵) و (۶) مراحل رشد حباب، حاصل از شبیه سازی را با نتایج تجربی و عددی در مرجع [۵] مقایسه کرده است.



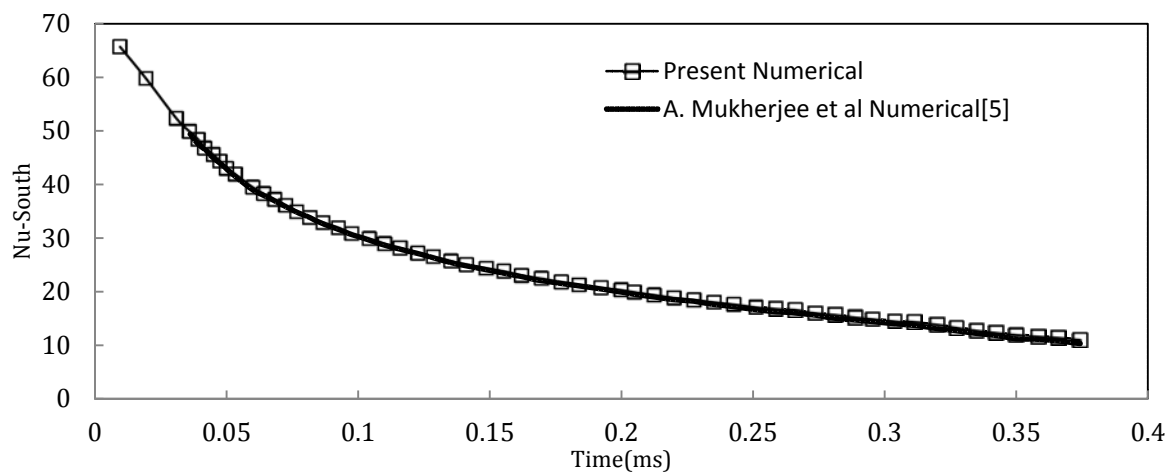
شکل ۴- مقایسه قطر معادل بدست آمده با نتایج عددی و تجربی [۵]



شکل ۵- مقایسه نتایج بدست آمده در زمان‌های یکسان برای (الف) نتایج تجربی [۵] (ب) نتایج کار حاضر

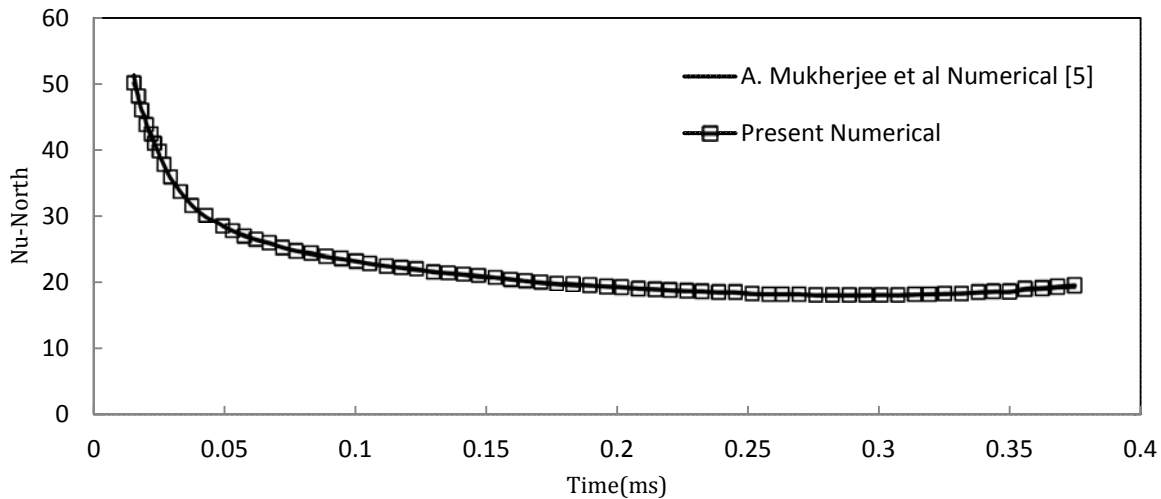


شکل ۶- مقایسه نتایج بدست آمده در زمان‌های یکسان برای (الف) نتایج عددی [۵]، (ب) نتایج کار حاضر

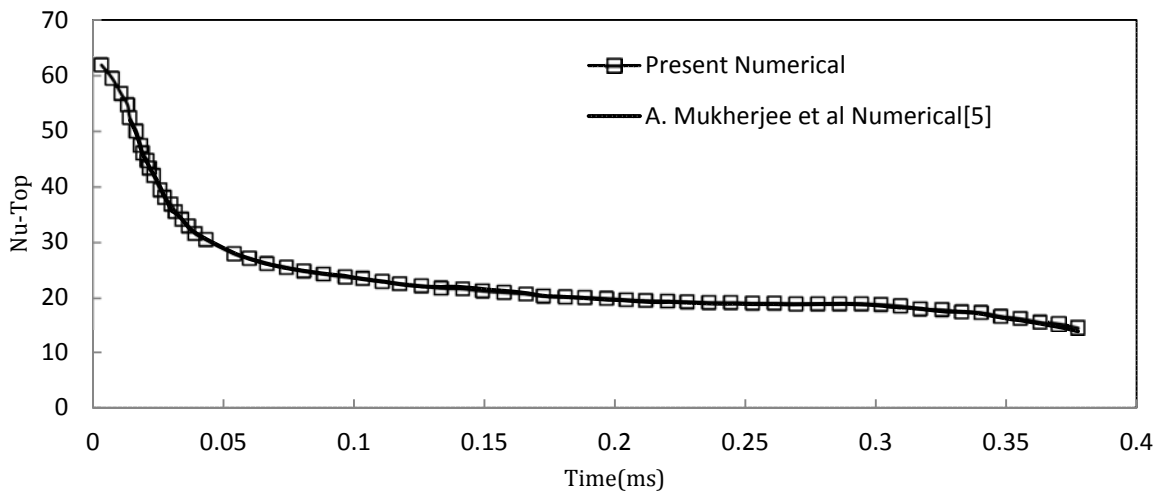


شکل ۷- مقایسه عدد ناسلت در دیواره پایینی میکروکانال با نتایج عددی [۵]

شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) به ترتیب اعتبارسنجی نتایج مقادیر عدد ناسلت روی دیواره‌های پایینی، بالایی و روبرویی را که نشان از وجود تطابق خوبی می‌باشد ارائه کرده است.



شکل ۸- مقایسه عدد ناسلت در دیواره بالایی میکروکانال با نتایج عددی [۵]



شکل ۹- مقایسه عدد ناسلت در دیواره روبرویی میکروکانال با نتایج عددی [۵]

#### ۴-۲- تاثیر افزودن نانو ذرات بر روند رشد قطر معادل حباب

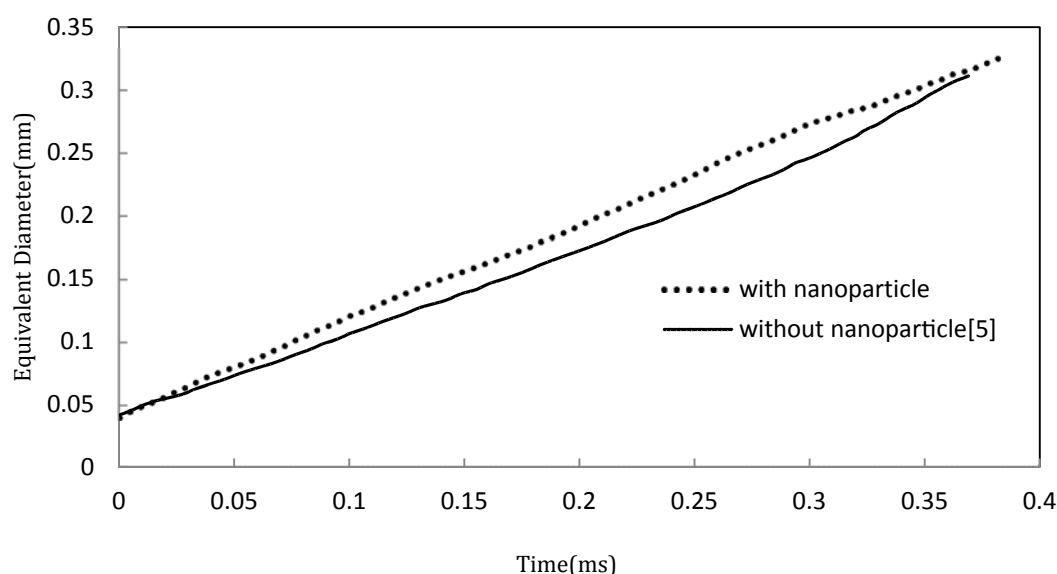
در شکل (۱۰) تاثیر افزودن نانوذرات بر رشد قطر حباب را نشان داده شده است. افزودن نانوذره باعث افزایش قطر معادل حباب می‌شود. با افزودن نانوذره میزان هدایت گرمایی<sup>۱</sup> سیال پایه فزونی یافته و انتقال حرارت از دیواره به سیال زیاد می‌شود. با افزایش انتقال حرارت میزان فعل و انفعالات بین دو فاز مایع و بخار در سطح مشترک دو فاز بیشتر شده و میزان جرم بیشتری از فاز مایع به فاز بخار تبدیل می‌شود در نتیجه کسر حجمی بخار و به تبع آن قطر حباب افزایش می‌یابد. در مورد روند رشد حباب در جریان جوششی در یک میکروکانال نیز بایستی گفت حباب در ابتدای فرآیند رشد، بصورت عرضی رشد کرده تا مقطع میکروکانال را فرا گیرد. ادامه یافتن فرآیند انتقال گرما، منجر به رشد طولی حباب در راستای طولی میکروکانال می‌شود. به همین علت در شکل‌ها از کلمه قطر معادل استفاده شده است.

<sup>۱</sup> Conductivity

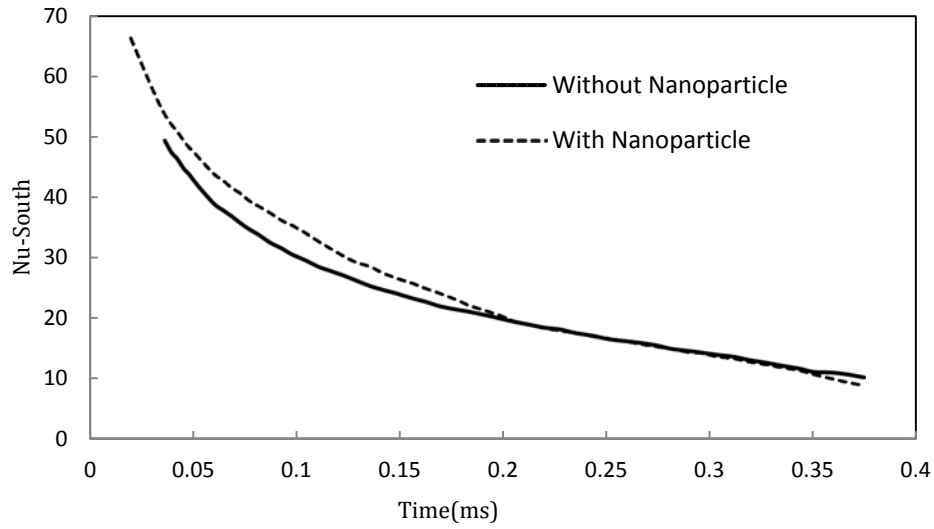
#### ۳-۴- تاثیر افزودن نانوذرات بر اعداد ناسلت دیواره‌ها

در شکل‌های (۱۱) تاثیر افزودن نانوذرات بر اعداد ناسلت دیواره‌ها ارائه گردیده است. مشخص است افزودن نانو ذره باعث افزایش میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت می‌شود. روند تغییرات اعداد ناسلت دقیقا مانند تغییرات قطر بوده و افت عدد ناسلت زمانی اتفاق می‌افتد که قطر حباب به اندازه کافی بزرگ شده و بخش عظیمی از دیواره‌های میکروکانال را پوشش دهد و دیواره به جای فازمایع با فاز بخار انتقال حرارت انجام دهد. دلیل این کاهش را می‌توان به کوچک بودن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گازها نسبت به مایعات نسبت داد.

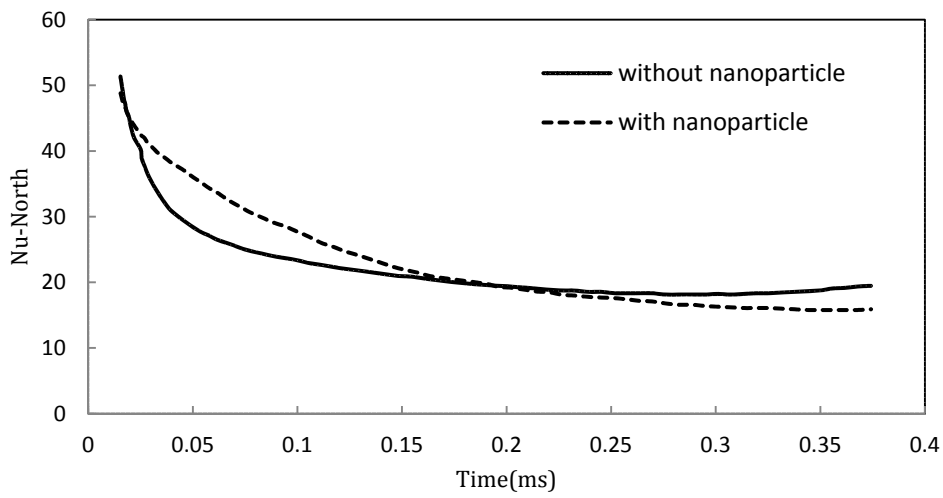
افزودن نانوذره به کار حاضر باعث افزایش قطر حباب به میزان ۱۲ درصد نسبت به حالت اولیه شده در حالیکه متوسط افزایش عدد ناسلت در دیواره‌ها نیز ۲۷ درصد تعیین گردیده است. در شکل (۱۲) رشد حباب در حالت بدون نانوذره و حالت با نانوذره در زمان‌های مشخص شده در مرجع [۵] با هم مقایسه شده است. مقادیر حجم حباب، در هر حالت بر حسب واحد  $10^{-4} \text{ mm}^3$  برای کنترل و مقایسه ارائه گردیده است. با توجه به نتایج شکل (۱۲) مشخص است که افزودن نانوذره باعث افزایش قطر حباب می‌شود.



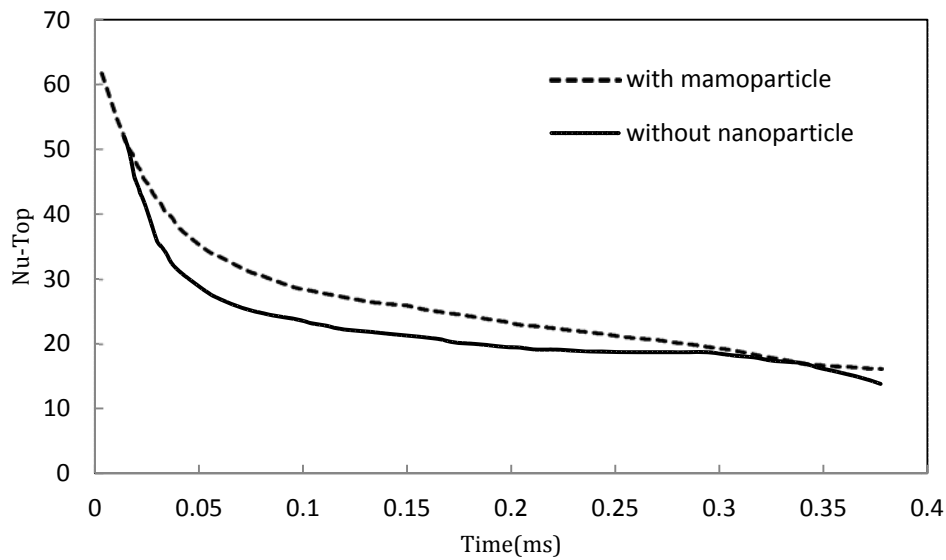
شکل ۱۰- تاثیر افزودن نانوذرات بر روند رشد قطر حباب



(الف)

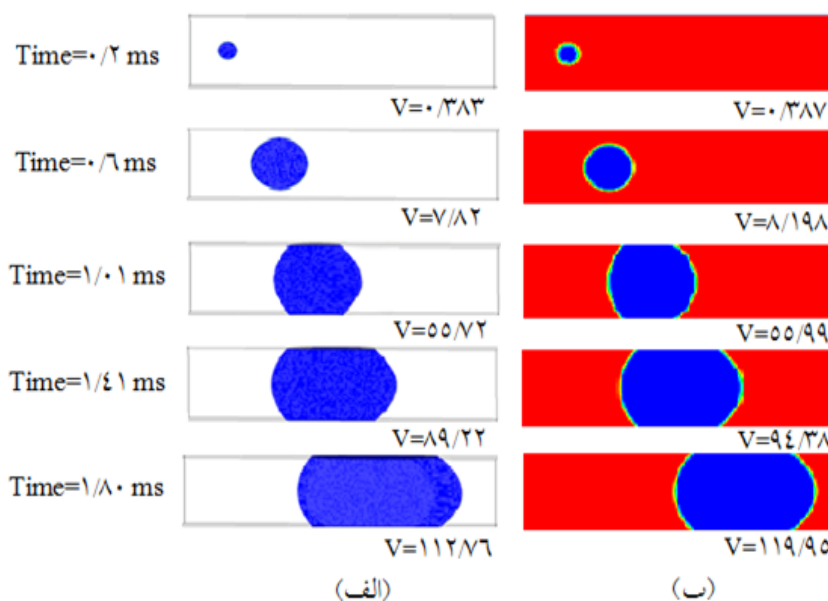


(ب)



(ج)

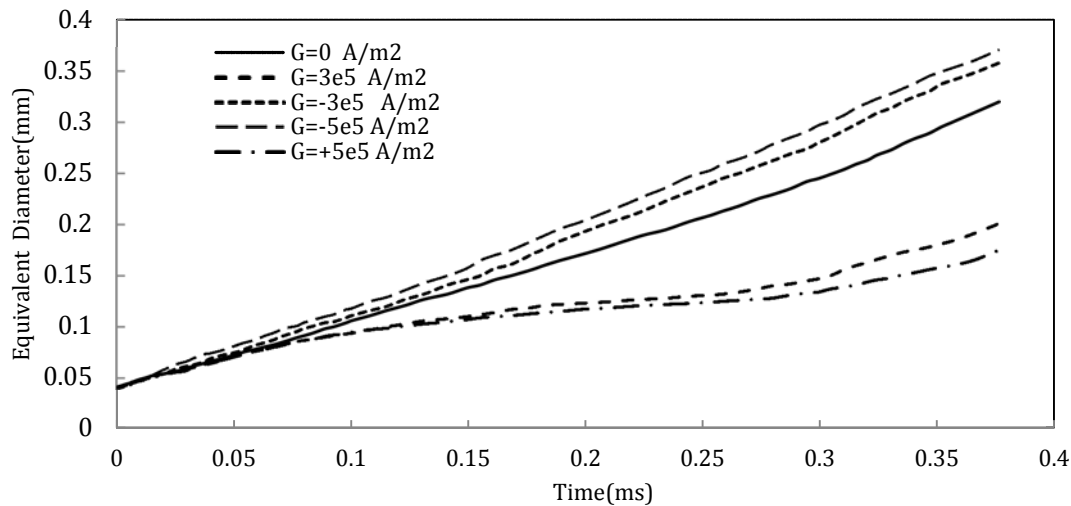
شکل ۱۱- تاثیر افزودن نانوذرات بر اعداد ناسلت دیواره‌ها (الف) دیواره پایینی (ب) دیواره بالایی (ج) دیواره روبرویی



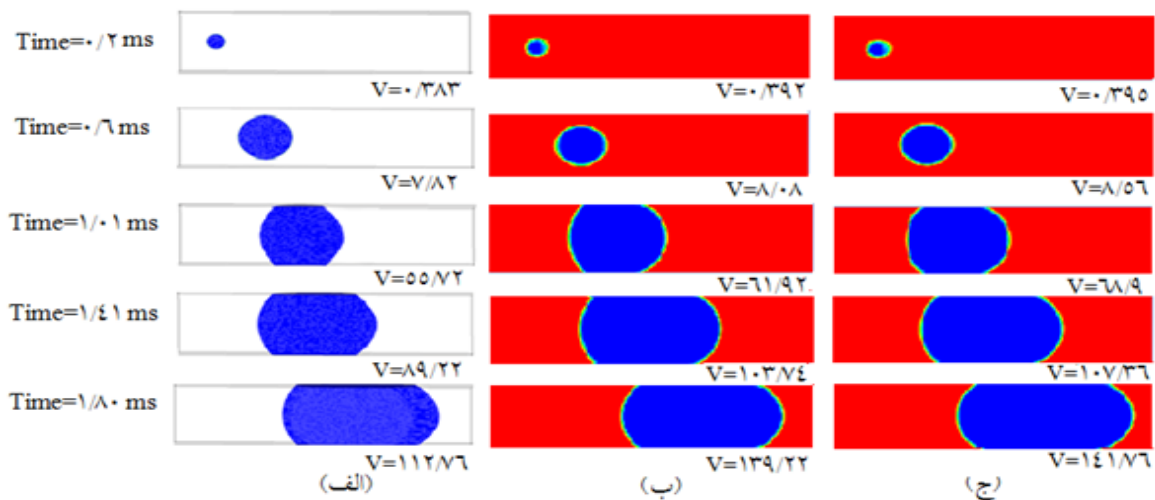
شکل ۱۲- رشد حباب در حالت (الف) بدون نانوذره و (ب) با نانوذره

#### ۴-۴- تاثیر اعمال میدان‌های غیر یکنواخت محوری بر روند رشد حباب

با استفاده از میدان‌های غیر یکنواخت محوری با گرادیان‌های مثبت و منفی می‌توان رشد حباب در جریان جوششی نانو سیال داخل میکروکانال را کنترل نمود. میدان با گرادیان‌های منفی باعث ایجاد نیروی کلویین در خلاف جهت جریان می‌شود. در مقابل میدان با گرادیان مثبت نیروی کلویین خود را در جهت جریان ایجاد می‌کند. اثر میدان با گرادیان منفی بر حرکت سیال از نوع ترمزی و میدان با گرادیان مثبت از نوع شتاب دهنده می‌باشد. بعد از تکرار حل مسئله با گرادیان‌های مختلف میدان، همچنین با توجه به ابعاد میکروکانال در کار حاضر میدان‌های با گرادیان‌های ( $G = -3e5 \text{ A/m}^2$ ;  $G = -5e5 \text{ A/m}^2$ ) و ( $G = +5e5 \text{ A/m}^2$ ;  $G = 3e5 \text{ A/m}^2$ ) انتخاب و به کار حاضر اعمال شده‌اند. در شکل (۱۳) روند رشد قطر حباب در حضور میدان‌های با گرادیان‌های مثبت و منفی ارائه شده است. در حضور میدان با گرادیان‌های منفی نیروی کلویین در خلاف جهت جریان و مومنتم سیال است لذا همچون مانعی در مقابل حرکت حباب عمل خواهد کرد و بنابراین حباب فرصت بیشتری برای انجام فعل و انفعالات با فاز اصلی (مایع) خواهد داشت و میزان بیشتری از سیال پایه به بخار تبدیل خواهد شد. در نتیجه حجم حباب افزایش یافته و به تبع آن قطر حباب نیز زیاد می‌شود.



شکل ۱۳- تاثیر اعمال میدان‌های غیر یکنواخت محوری با گرادیان‌های مختلف بر روند رشد قطر حباب



شکل ۱۴- تاثیر اعمال میدان‌های با گرادیان‌های منفی بر روند رشد حباب حالت (الف) بدون میدان

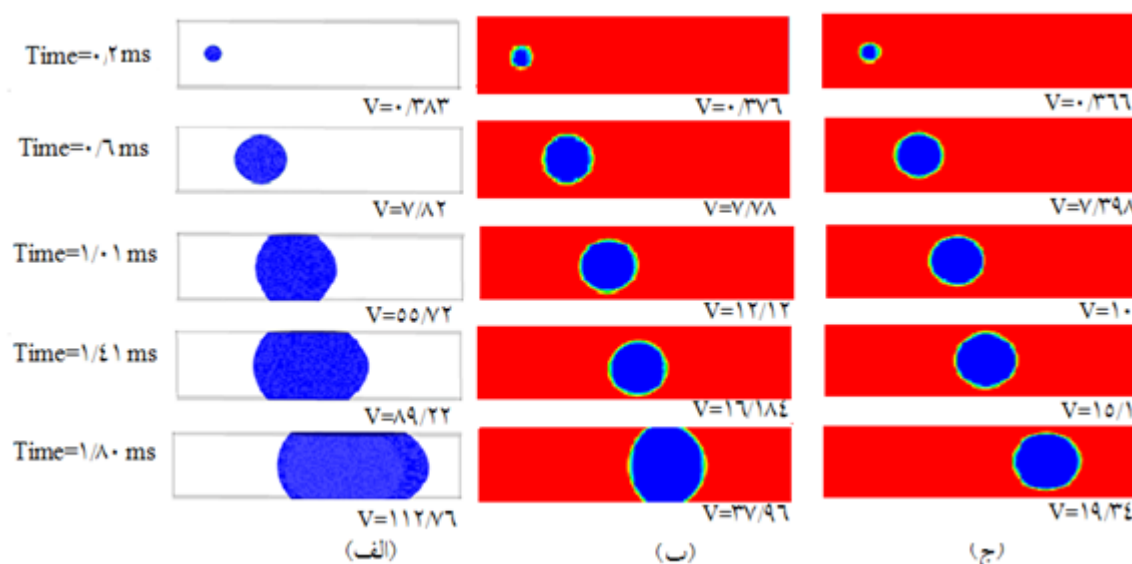
(ب) میدان  $G = -3e5 \text{ A/m}^2$  (ج) میدان  $G = -5e5 \text{ A/m}^2$

همچنین به دلیل افزایش نرخ تبدیل فازها، حباب رشد سریعتری داشته و در کمترین زمان ممکن رشد عرضی خود را تمام کرده و در ادامه رشد طولی حباب آغاز می‌شود. در حالت اعمال میدان با گرادیان‌های مثبت نیروی کلویین در جهت جریان و مومنتم سیال عمل کرده و از این رو به جابه‌جایی سریعتر حباب کمک خواهد کرد. لذا فرصت لازم برای انجام فعل و انفعالات بین دو فاز کمتر شده و نرخ تبدیل بین فازها نیز مسلماً کاهش یافته و حجم حباب و قطر حباب با شیب ملایم، افزایش خواهد یافت. شکل (۱۴) روند رشد حباب در طول میکروکانال تحت تاثیر میدان‌های مغناطیسی با گرادیان‌های منفی را نمایش می‌دهد. حجم حباب در هر حالت با ابعاد  $10^{-4} \text{ mm}^3$  ارائه شده است. با توجه به شکل‌ها مشخص می‌گردد که در هر سه حالت، رشد عرضی در بازه زمانی ۰/۶ تا ۱/۰۱ میلی ثانیه اتفاق می‌افتد اما با اعمال میدان با گرادیان منفی این زمان به ۰/۶ میلی ثانیه نزدیکتر می‌شود. با توجه به مقادیر حجم‌های ارائه شده میزان افزایش حجم حباب، با میزان گرادیان منفی میدان متناسب است.



شکل (۱۵) روند تغییرات حباب در طول میکروکانال تحت تاثیر میدان‌های مغناطیسی با گرادیان‌های مثبت را ارائه کرده است. در حالت اعمال میدان با گرادیان  $G=+3e5 A/m^2$  رشد عرضی در بازه زمانی ۱/۴۱ تا ۱/۸۰ میلی ثانیه اتفاق می‌افتد و در حالت اعمال میدان با گرادیان  $G=+5e5 A/m^2$  رشد عرضی در بازه‌های زمانی ارائه شده نمی‌تواند تمامی مقطع میکروکانال را فرا گیرد. مقادیر حجم‌های ارائه شده در تک تک حالات نشانگر کاهش شدید حجم حباب با افزایش بیشتر گرادیان میدان می‌باشد.

با توجه به نتایج شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) میزان تغییرات قطر حباب در جدول (۴) شرح داده شده است. از نتایج برمی‌آید که تاثیر اعمال میدان با گرادیان مثبت در تغییر حجم حباب و قطر آن از تاثیر میدان با گرادیان‌های منفی بیشتر است. در حضور میدان با گرادیان منفی حباب سریعاً رشد عرضی را به اتمام رسانیده و با سطح دیواره‌های میکروکانال برخورد می‌کند و تا حدودی رشد طولی حباب تحت تاثیر این محدودیت‌ها کمتر می‌شود.



شکل ۱۵- تاثیر اعمال میدان‌های با گرادیان‌های مثبت بر روند رشد  $G=+3e5 A/m^2$  (ب) میدان  $G=+5e5 A/m^2$  (ج) میدان  $G=+5e5 A/m^2$

حباب حالت (الف) بدون میدان (ب) میدان

جدول ۴- میزان تغییرات قطر معادل حباب در حضور میدان‌ها با گرادیان‌های مختلف

وضعیت	درصد تغییرات قطر
حالت اصلی (اولیه)	-----
$G=-3e5 A/m^2$	+۱۳/۷ %
$G=-5e5 A/m^2$	+۱۷/۶ %
$G=+3e5 A/m^2$	-۶۳ %
$G=+5e5 A/m^2$	-۸۷/۵ %

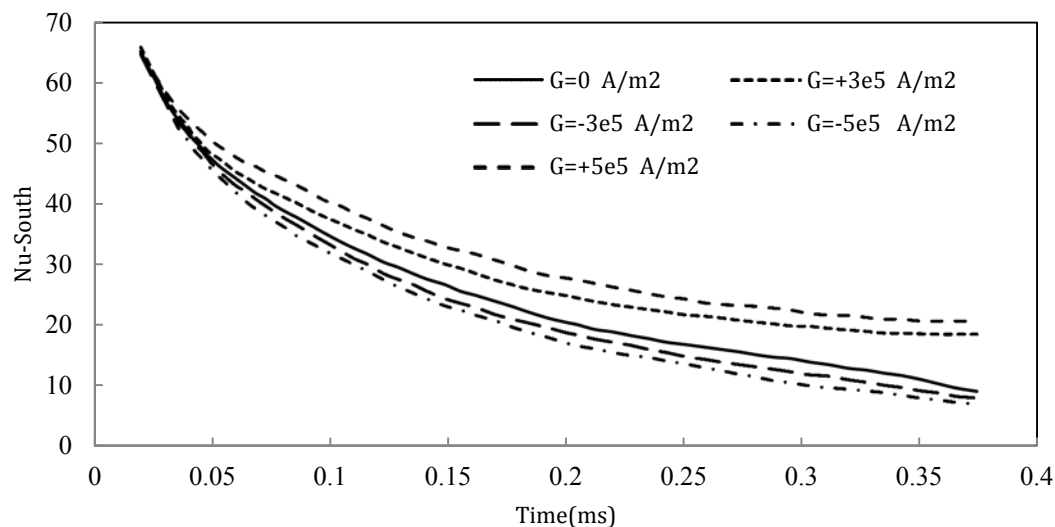
#### ۴-۵- تاثیر اعمال میدان با گرادیان‌های مختلف بر اعداد ناسلت دیواره‌ها

با اعمال میدان با گرادیان‌های منفی، حباب بیشتر رشد نموده و آشفتگی جریان بیشتر شده و پایداری سیال در روی دیواره‌ها کمتر شده در نتیجه حباب بخش زیادی از مساحت دیواره‌ها را پوشش خواهد داد. دیوار با فازی که بر روی آن قرار گرفته است انتقال حرارت انجام خواهد داد بدلیل کمتر بودن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گازها از مایعات، انتقال حرارت از دیواره‌ها کاهش یافته و به علت عدم تخلیه گرمای دیواره‌ها احتمال تخریب ساختار وجود دارد. در حالت اعمال میدان با گرادیان مثبت حباب کمتر رشد می‌نماید و سیال پایه در بیشتر مواقع روی دیواره خواهد بود و پایداری سیال روی دیواره افزایش پیدا می‌کند در این صورت انتقال حرارت از دیواره‌ها بیشتر می‌شود. شکل (۱۶) نتایج مربوط به تغییرات عدد ناسلت دیواره‌ها در حضور میدان‌های با گرادیان‌های مختلف را ارائه کرده است.

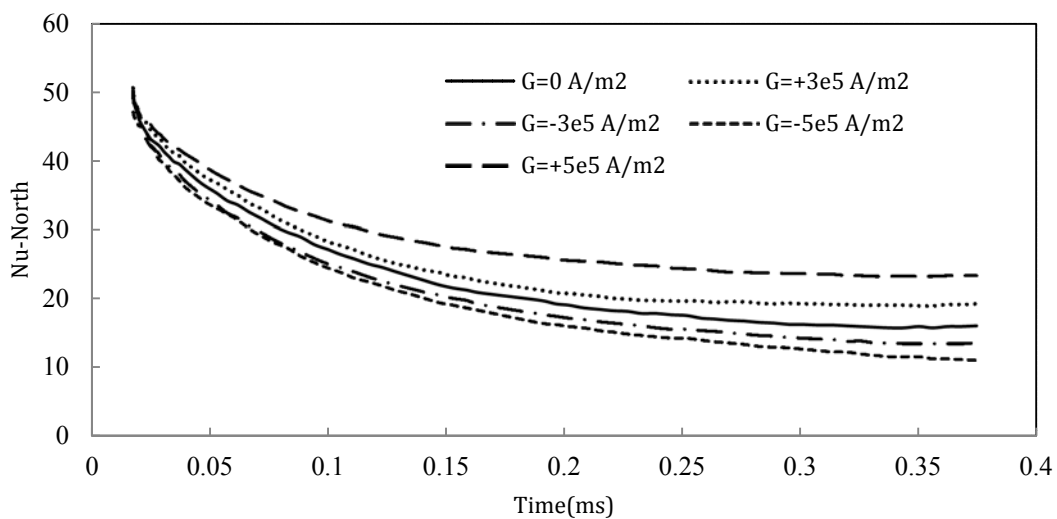
در حضور میدان‌های با گرادیان مثبت انتقال حرارت از دیواره‌ها بیشتر شده در نتیجه‌ی آن سیال می‌تواند گرمای دیواره را جاروب کرده و این موضوع برای سیستم‌های خنک کننده مناسب می‌باشد. در این حالت احتمال تخریب دیواره‌ها کمتر بوده و روند خنک کاری مناسب است. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) تغییرات دمایی دیواره‌ها در حضور میدان‌های با گرادیان‌های مختلف ارائه شده است.

در حضور میدان‌های با گرادیان منفی به دلیل عدم پایداری بیشتر سیال بر روی دیواره و همچنین عدم تخلیه‌ی مناسب گرمای دیواره، دمای دیواره‌ها افزایش یافته و احتمال تخریب ساختار وجود دارد. با افزایش گرادیان‌های میدان منفی گستره دمای بالای دیواره زیاد شده و احتمال تخریب نیز بیشتر می‌شود. در مورد میدان‌های با گرادیان مثبت دمای دیواره‌ها افزایش زیادی پیدا نمی‌کند و احتمال تخریب ناچیز است. با افزایش گرادیان‌های میدان مثبت به دلیل کاهش میزان رشد قطر حباب، عدم ایجاد آشفتگی و پایداری نسبتاً زیاد سیال، میزان تخلیه گرما از دیواره‌ها بیشتر می‌شود.

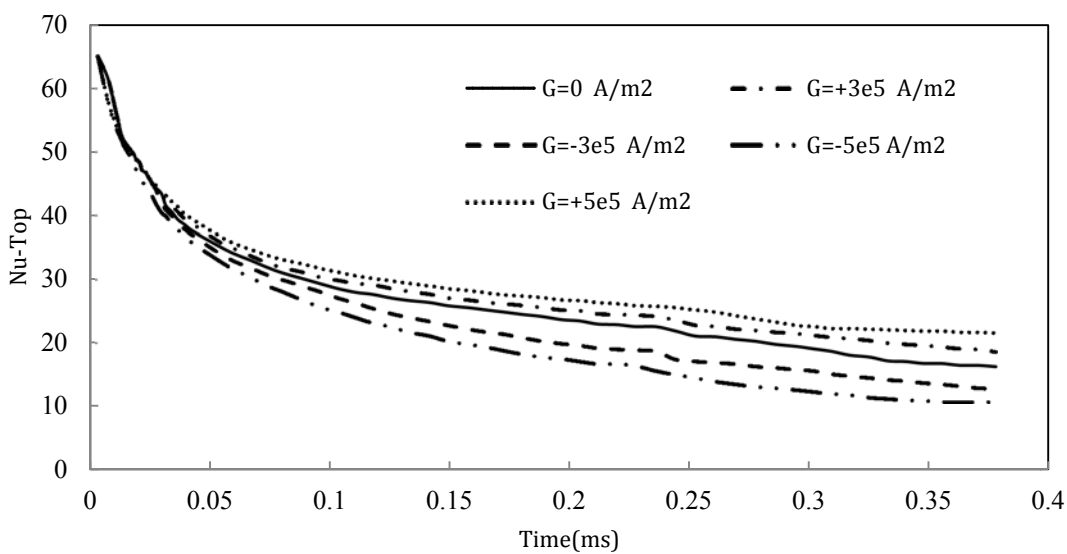
با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی و برای این هندسه میکروکانال و برای جلوگیری از تخریب دیواره‌ها استفاده از میدان با گرادیان  $(G=+5e5 \text{ A/m}^2)$  به عنوان حداقل گرادیان میدان تعیین گردیده است. اگر هدف کاهش بیشتر اندازه حباب باشد استفاده از میدان با گرادیان بالاتر از میدان فوق می‌تواند مفید باشد.



(الف)



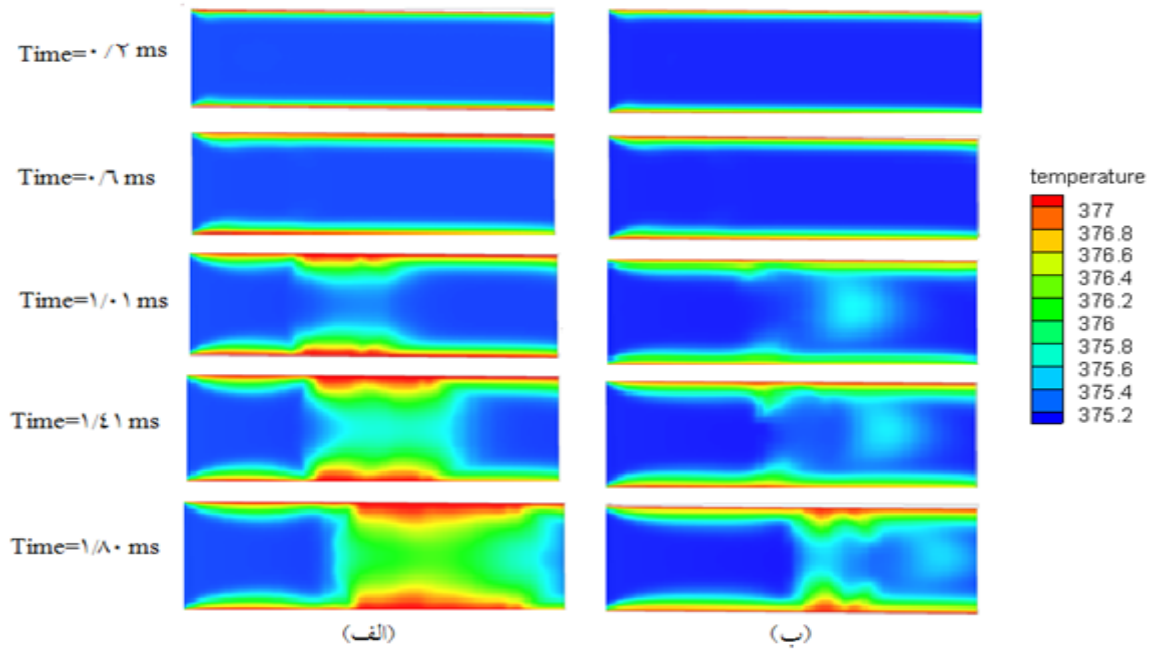
(ب)



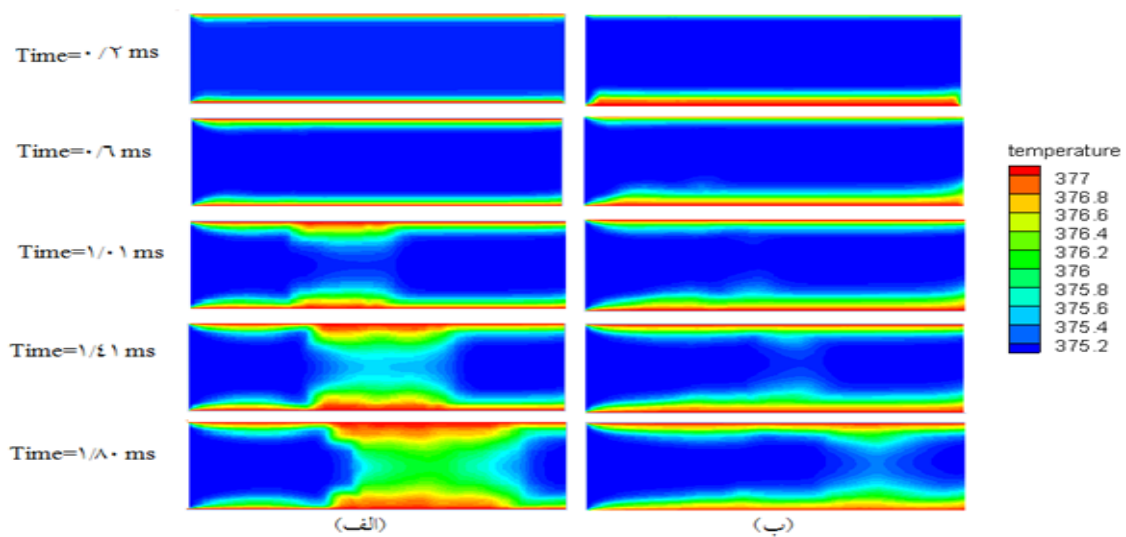
(ج)

شکل ۱۶- تاثیر اعمال میدان‌های مغناطیسی با گرادیان‌های مختلف بر اعداد ناسلت دیواره‌ها

(الف) دیواره پایینی (ب) دیواره بالایی (ج) دیواره روبرویی



شکل ۱۷- تغییرات پروفیل دمایی در دو حالت: (الف)  $G = -3e5 \text{ A/m}^2$  و (ب)  $G = +3e5 \text{ A/m}^2$



شکل ۱۸- تغییرات پروفیل دمایی در دو حالت: (الف)  $G = -5e5 \text{ A/m}^2$  و (ب)  $G = +5e5 \text{ A/m}^2$

## ۵- جمع بندی

در کار حاضر جریان جوششی نانو سیال مغناطیس شونده در داخل یک میکروکانال شبیه سازی شد. بعد از اعتبار سنجی و تطابق خوب نتایج حاصل با نتایج موجود در ادبیات فن، بحث افزودن نانوذرات و اعمال میدان‌های مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. افزودن نانوذرات باعث افزایش هدایت گرمایی سیال می‌شود که به دنبال آن هم میزان انتقال حرارت از دیواره‌ها افزایش می‌یابد. میزان افزایش انتقال حرارت ۲۷ درصد تعیین گردید. همچنین در اثر افزایش انتقال حرارت حجم حباب نیز فزونی یافت. در نتیجه این افزایش حباب قطر حباب ۱۲ درصد افزایش پیدا نمود.

در بحث اعمال میدان‌های مغناطیسی نیز مشخص گردید که در حضور میدان با گرادیان‌های منفی حباب سریع‌تر رشد عرضی را به اتمام رسانده و آشفتگی جریان بیشتر شده و پایداری سیال بر روی دیواره‌ها کمتر می‌شود لذا میزان انتقال حرارت از دیواره‌ها کمتر می‌شود. در بحث استفاده از میدان با گرادیان‌های مثبت نیز رشد عرضی حباب بیشتر طول می‌کشد و آشفتگی جریان کمتر و پایداری سیال نیز بیشتر و انتقال حرارت نیز بیشتر می‌شود. در حالت حضور میدان با گرادیان‌های منفی به دلیل عدم تخلیه مناسب گرمای دیواره احتمال تخریب و آسیب دیدگی دیواره بیشتر است.

## مراجع

- [1] Rosensweig, R. E., and Roland, E., "*Ferrohydrodynamics*", Cambridge University Press, New York, (1985).
- [2] Kandlikar, S.G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., and King, M.R., "*Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*", Elsevier, UK, (2006).
- [3] Mukherjee, A., and Kandlikar, S.G., "Numerical Simulation of Growth of a Vapor Bubble During Flow Boiling of Water in a Microchannel", International Conference on Microchannels and Minichannels, ASME, New York, USA, pp. 565-572, (2004).
- [4] Wu, Y., Yang, C., and Yuan, X., "Numerical Simulation of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling", *Huagong Xuebao/J. Chem. Ind. Eng. (China)* Vol. 53, pp. 479-486, (2002).
- [5] Mukherjee, A., Kandlikar, S.G., and Edel, Z.J., "Numerical Study of Bubble Growth and Wall Heat Transfer During Flow Boiling in a Microchannel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 3702-3718, (2011).
- [6] Kandlikar, S.G., "Nucleation Characteristics and Stability Considerations During Flow Boiling in Microchannels", *Exp. Thermal Fluid Sci.* Vol. 30, pp. 441-447, (2006).
- [7] Lee, P.C., Tseng, F.G., and Pan, C., "Bubble Dynamics in Microchannels", Part I, Single Microchannel. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5575-5589, (2004).
- [8] Young, N.O., Goldstein, J.S., and Block, M.J., "The Motion of Bubbles in a Vertical Temperature Gradient", *J. Fluid Mech.* Vol. 6, pp. 350-356, (1959).
- [9] Cornwell, K., and Kew, P.A., "Boiling in Small Parallel Channels", In: *Proceedings of CEC Conference on Energy Efficiency in Process Technology*, Elsevier, Applied Sciences, Athens, pp. 624-638, (1992).
- [10] Junhong, L., Jianming, G., Zhiwei, L., and Hui, L., "Experiments and Mechanism Analysis of Pool Boiling Heat Transfer Enhancement with Water-based Magnetic Fluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 170-175, (2004).

- [11] Hamilton, R.L., and Crosser, O.K., , "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-component System", I & EC Fundamentals, Vol. 1, pp. 187-191, (1962).
- [12] Khanafer, K., and Vafai, M., " Lightstone, Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3639–3653, (2003).

### فهرست نمادهای انگلیسی

$a$	: عرض ورودی میکروکانال (mm)
$L$	: طول میکروکانال (mm)
$h$	: ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W/m^2.K$ )
$k$	: ضریب هدایت حرارتی ( $W/m.K$ )
$Nu$	: عدد ناسلت
$P$	: فشار ( $Pa$ )
$\vec{H}$	: بردار میدان مغناطیسی (A/M)
$T$	: دما ( $K$ )
$u$	: سرعت در جهت x ( $m/s$ )
$v$	: سرعت در جهت y ( $m/s$ )
$W$	: سرعت در جهت Z ( $m/s$ )

### نمادهای یونانی

$\alpha$	: کسر حجمی بخار
$\mu$	: ویسکوزیته ( $Pa.s$ )
$\beta$	: ضریب انبساط حرارتی ( $1/k$ )
$\nu$	: ویسکوزیته سینماتیکی
$\sigma$	: ضریب کشش سطحی ( $N/m$ )
$\rho$	: چگالی ( $kg/m^3$ )
$\Sigma$	: مجموع

### زیرنویس‌ها

$L$	: فاز مایع
$V$	: بخار
$p$	: ذره

## Abstract

In this research, growth of a vapor bubble in the nucleate boiling process in pure water and ferrofluids (water and 4 vol.%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) was investigated numerically using VOF model and control volume technique. After verifying the results, effects of applying non-uniform axial magnetic fields on growth of the bubble in the boiling of magnetic nanofluids was investigated. Two positive and negative magnetic field gradients have been examined. Based on the obtained results, in the presence of magnetic field with a positive gradient pumping of heat from the side walls is increased and consequently it leads to reduce growth of the bubble unlike the magnetic field with negative gradient. It is concluded that using magnetic fields with positive gradients can increase the cooling efficiency of the micro-systems.