نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و هفتم /زمستان ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 27 / March 2021

مدلسازی عددی میکروکانال مغناطیسی برای جذب نانو ذرات نمک محلول در آب شور

عبدالمحمد واحدی نژاد[۱]

حمیدرضا نظیف*[۲]

چکیده

در این تحقیق یک سیستم نمک‌زدایی آب دریا به روش مغناطیسی-الکتریکی مطالعه و شبیه‌سازی شده است. میدان الکتریکی برای یونیزه نمودن آب دریا و میدان مغناطیسی برای جداسازی، هم‌زمان درنظرگرفته شده اند. معادلات حرکت سیال آب و ذرات نمک با روش اویلر-لاگرانژی مدلسازی شده‌اند. برای جداسازی ذرات نمک با قطر میکرونی، شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی و سرعت ورودی آب دریا به سیستم جداسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پارامترهای موردبررسی شامل میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی، قطر ذرات، سرعت ورودی و نسبت ابعادی میکروکانال است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی درصد جذب ذرات افزایش‌یافته و افزایش قطر ذرات موجب جذب بیشتر آن‌ها گردیده است. همچنین با افزایش نسبت ابعادی کانال درصد خروج ذرات از ناحیه آب تمیز کاهش و مقدار جذب ذرات به سمت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی افزایش‌یافته است. تغییرات سرعت سیال نشان داد که با افزایش سرعت، میزان جذب ذرات در مجاورت دیواره‌ها به مقدار قابل‌توجهی کاهش داشته است. در این پژوهش در میکروکانال، سیال با متوسط سرعت ورودی ۰/۱ m/s موردبررسی قرارگرفته و میزان جداسازی یون‌های نمک در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مختلف با تغیر پارامترهای ورودی مشخص گردیده است.

واژه‌های کلیدی:

نمک‌زدایی، میدان مغناطیسی، مدلسازی، یون‌های نمک

[۱]. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
(email: a_vahedinejad@yahoo.com & a.vahedinejad@iwpco.ir)

[۲*]. هیئت علمی دانشکده فنی مهندسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(email: nazif@eng.ikiu.ac.ir)

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۲/ ۶/ ۹۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۵/ ۹۸/۹

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

مقدمه

در قرن اخیر، استفاده از منابع آب شور در جایگزینی منابع آب شیرین بسیار موردتوجه قرار گرفته است. این در حالی است که منابع آب شیرین محدود است لذا نیازمند به بهره-گیری از فنّاوری برای تأمین آب هستیم.

نمک‌زدایی یا شیرین سازی آب، فرایندی است که در آن مقداری نمک و سایر مواد معدنی از آب جدا می‌گردد. در واحدهای آب‌شیرین‌کن، ازیک‌طرف آب شور واردشده که با صرف انرژی، آب شیرین و پساب شور از طرف دیگر جدا و تخلیه می‌گردند. هرقدر که آب شورتر باشد، برای شیرین کردن آن باید انرژی و تلاش بیشتری صرف گردد. آب شوری که باهدف تولید آب شیرین نمک‌زدایی می‌شود، برای مصرف انسان و یا آبیاری مناسب است. یک محصول دیگر فرایند نمک‌زدایی، نمک است. بیشتر سرمایه‌گذاری‌های اخیر در نمک‌زدایی، بر گسترش راه‌های مقرون به‌صرفه تأمین آب شیرین برای استفاده انسان، متمرکزشده است. در کنار بازیافت آب از پساب، این روش یکی از چندین منابع تأمین آب مستقل از بارش است.

مسئله اساسی در فرایند شیرین سازی آب، انرژی مصرفی زیاد و پساب شوری است که در حین شیرین سازی تولید می‌شود. در نگاه بهینه‌سازی، استفاده از روشی که با مصرف انرژی پایین‌تر و با کمترین تولید پساب شور، توانایی شیرین سازی آب را داشته باشد؛ موردتوجه است.

تجارب مختلف نشـــان داده اســـت که می‌توان آب را با روش‌های گوناگون به نحوی شـــیرین نمود که با حداقل تولید پساب شور کمترین انرژی را مصرف کند. (خبازی[1]، ۱۳۹۲) با توسعه روزافزون تعداد کارخانه تولید آب شیرین از آب شور، کار بر روی ارتقاء سطح کیفی، راندمان تولید، کاهش انرژی مصـرفی در فرایند شـیرین سـازی آب حائز اهمیت اسـت. بنابراین در این بررسـی، هدف این اسـت که ابتدا با بهره‌گیری از مقالات و تجربیات انجام‌گرفته در زمینه روش‌های نوین نمک‌زدایی از آب دریا تأثیر امواج الکتریکی و میدان مغناطیسی بر میزان جداسازی یون‌های محلول در آب بررسی‌شده و با مدلسازی و تحلیل عددی شیرین سازی آب دریا با اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیســـی و نیروی هیدرودینامیکی، پارامترهای عملکرد بهینه جهت جداسازی را به دست آورد. (النعیمت[2]، ۲۰۱۶)

فرآیندهای شیرین سازی، فرآیندهایی به‌منظور خالص‌سازی آب دریا برای مصـارف آشـامیدنی اسـت. یک سـیسـتم آب‌شـیرین‌کن به‌طورکلی آب شـور را به دو جریان تقسـیم می‌کند، یکی جریان آب خالص با درصـد بسـیار کمی از نمک و املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک املاح باقیمانده است.

جـداســـازی نمـک از مخلوط آب‌نمـک، یـک فرآینـد ترمودینامیکی است که نیاز به انرژی دارد.

فناوری‌های آب‌شـیرین‌کن ازلحاظ تغییر فاز به دو دسـته تقسیم می‌شوند؛ دسته اول: فرآیندهایی که در آن‌ها تغییر فاز صورت می‌گیرد، مانند:

- نمک‌زدایی چند اثر[3] (MED)
-نمک‌زدایی ناگهانی چند مرحله‌ای[4] (MSF)
-نمک‌زدایی تراکم بخار[5] (VCD)

دسته دوم: فرآیندهایی که در آن‌ها شیرین‌سازی آب بدون تغییر فاز انجام می‌پذیرد:

-اسمز معکوس[6] (RO)
-الکترودیالیز[7] (ED)

از سیستم‌های الکترودیالیز معکوس[8] که جزء تکنولوژی‌های الکتروشـیمی و سـلول‌های غشـایی بوده، برای جداسـازی یون‌ها از محلول‌های مختلف استفاده می شود. الکترودیالیز (ED) یکی از روش‌های جداسازی ذرات باردار است که در آن آب شور تحت تأثیر ولتاژ جریان مستقیم به‌عنوان نیروی محرکه فرآیند، قرار می‌گیرد.

1 khabbazi
2 Alnaimat
3 Multi effect distillation
4 Multi stage flash distillation
5 Vapor compression distillation
6 Reverse osmosis
7 Electro dialysis
8 Reverse Electro dialysis

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

در این تحقیق در سیستم نمک زدا علاوه بر اعمال جریان الکتریسیته، جریان آب شور تحت تأثیر میدان مغناطیسی نیز قرار می‌گیرد. بنابرین ذرات باردار به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی، مغناطیسی و الکتریسیته قرارگرفته و با مدلسازی عددی حرکت ذرات در شرایط فوق پارامترهای جداسازی ذرات باردار موردبررسی قرارگرفته است.

نتایج حاکی از آن است که میزان تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌تواند نقش مهمی در جداسازی یون‌ها ایفا کند. همچنین تغییرات هندسی[1] سیستم جداساز نیز می‌تواند نقش کلیدی در افزایش درصد جداسازی داشته باشد، ازاین‌رو در این پژوهش میزان تغییرات ژئومتری سیستم جداساز نیز موردبررسی قرار گرفته است.

وجود ذرات مختلف با سایزهای متفاوت بخش جدایی‌ناپذیر آب‌های شور بوده است. در این پژوهش محدوده وسیعی از ذرات موجود در آب موردبررسی قرار گرفته است.

در مطالعه حاضر، تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر مقدار جداسازی یون‌های نمک محلول در آب بررسی‌شده است. در بخش دیگری از این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی بر میزان جدایش ذرات‌های محلول در آب در قطرهای متفاوت پرداخته‌شده است.

تاریخچه

زارزو و پرتز[2] در سال ۲۰۱۸ جنبه‌های مربوط به انرژی و نمک‌زدایی و فن‌آوری‌های مختلف موجود را موردبررسی قراردادند. آن‌ها کارشان عمدتاً بر روی اسمز معکوس تمرکز داشت که بیشترین کاربرد را در تکنولوژی دارد. در سال ۲۰۱۶ یک مدل تحلیلی الکترومغناطیسی - مکانیکی (EMSR) برای حل پارامترهای عملیاتی برای فرایند نمک‌زدایی به‌صورت عددی ارائه‌شده است (النعیمت[3]، ۲۰۱۶). در این مدل جریان سیال و حرکت ذرات باردار تحت نیروهای هیدرودینامیکی، الکترواستاتیکی قرار گرفته است. النعیمت نشان داد که با کاهش سرعت جریان ورودی، زمان ماند ذرات بیشتر شده و راندمان جداسازی افزایش می‌یابد. همچنین او نشان داد، دو برابر شدن نیروهای الکتریکی و مغناطیسی باعث افزایش سرعت حرکت عرضی ذرات شده و زمان جذب ذرات را تقریباً دو برابر کاهش می‌دهد. بااین‌حال، دو برابر کردن سرعت جریان محوری، سرعت عرضی را تنها ۲۵٪ را افزایش می‌دهد. به‌وضوح نشان داده‌شده است که ترکیب نیروهای الکتریکی و مغناطیسی می‌تواند به‌طور مؤثر برای جدا کردن نمک‌های محلول شده از آب دریا استفاده شود.

ویسنیسکی و روزانسکا[4] درسال ۲۰۱۴، تحقیقی در رابطه با حذف یون‌ها با روش غشاهای الکترودیالیز ساده و انتخاب‌گر ارائه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دانسیته[5] جریان به‌تدریج عبور یون‌های دو ظرفیتی از غشای انتخاب‌گر زیاد شده که این باهدف اولیه استفاده از این نوع غشاها تطابق ندارد، درنتیجه باید دانسیته جریان را کمتر از دانسیته جریان محدودکننده در نظر گرفت تا در هزینه برق با استفاده از غشاهای انتخاب‌گر صرفه‌جوئی شود. دانسیته جریان محدودکننده فاکتور مهمی برای به دست آوردن مقاومت و جریان اعمالی محسوب می‌شود که به خصوصیت غشا و محلول الکترولیت و سرعت جریان عبوری و دما و ساختار الکترولیز بستگی دارد. در مقاله‌ای که توسط (زو و همکاران[6]، ۲۰۱۳) انجام شد از غشاهای انتخاب‌گر هم آنیونی آنیونی و هم کاتیونی استفاده شده است.

در سال ۲۰۱۲ نیکولاس و پتنت[7] یک کانال دارای مانع با حضور سیال و نانو ذرات تحت میدان مغناطیسی را مطالعه کردند که هدف آن‌ها جداسازی کاتیون‌ها از آنیون‌ها بود. (لایک و همکاران[8]، ۲۰۱۲) در تحقیقاتشان جریان پایدار و پالسی در یک کانال در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

1 Geometric
2 Zarzo and Prats
3 Alnaimet
4 JWisniewski
5 Density
6 XuaAnd Marissa
7 Nichols And Patent
8 Layek

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

خارجی را گزارش دادند. آن‌ها نشان دادند که منطقه جداسازی جریان با افزایش مقادیر پارامتر مغناطیسی کاهش می‌یابد. مطالعات آن‌ها حاکی از متراکم‌تر شدن سرعت محوری می‌شود. همچنین الگوی جریان و شکل ظاهری با تغییر پارامتر مغناطیسی قابل‌تغییر است. آن‌ها دریافتند که افزایش میدان مغناطیسی باعث گستردگی سرعت محوری و تغییرات در تنش برشی دیواره در هر دو حالت پایدار و پالسی می‌گردد.

فولرانی[1]، ۲۰۰۹ یک مدل برای پیش‌بینی جذب میکرو/ نانو ذرات مغناطیسی در یک سیستم میکروسکوپیک[2] ارائه دادند. این مدل برای بررسی پارامتری جذب ذرات شامل پارامترهایی مانند اندازه ذرات، خواص مواد، جریان اعمال شده، ابعاد میکرو کانال، خواص سیال و سرعت جریان، بود. او نشان داد با افزایش سرعت محوری جریان اثرات میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد.

یک سیستم دوبعدی مغناطیسی از ذرات معلق در روغن سیلیکون به‌عنوان یک بستر برای تجزیه‌وتحلیل زیست‌محیطی توسط لهمان و همکاران[3] در سال ۲۰۰۶ ارائه شد. پارامغناطیس در داخل قطرات، باعث حرکت مغناطیسی انجام شود آن‌ها نشان دادند با افزایش مغناطیس پذیری ذرات مقدار انحراف و جذب قطرات مغناطیسی افزایش می‌یابد.

مشکل اساسی جریان سیالات بیومغناطیسی در یک کانال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در سال ۲۰۰۴ توسط لوکوپالوس و تزیرتزیلاکیس[4] مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مربوط به میدان سرعت و دما، اصطکاک پوسته و نرخ انتقال حرارت نشان می‌دهد که حضور میدان مغناطیسی تأثیر قابل‌توجهی بر میدان جریان می‌گذارد.

محمدی و کاویانی[5] در سال ۲۰۰۴ به دنبال روشی برای استفاده از روش‌های مناسب برای تصفیه آب دریا، یک سلول الکترودیالیز تجربی بسیار کوچک طراحی و ساختند و آن را برای بررسی اثرات شرایط عملیاتی مختلف مانند سرعت جریان، ولتاژ و غلظت، بر روی رفتار آب دریا با الکترودیالیز استفاده کردند.

یک بررسی نظری راجع به پاسخ ذرات کروی به یک جریان مایع یک‌بعدی، حرکت یک‌ذره کروی در یک جریان مایع دوبعدی یک سیلندر دایره‌ای و حرکت یک‌ذره در ایرفویل[6] توسط مرسی و الکساندر[7] در سال ۱۹۷۲ موردبررسی قرار گرفت.

معادلات حاکم

در این تحقیق جریان آب آرام (عدد رینولدز کمتر از ۵۰) و ذرات نمک محلول در آن با روش اویلر-لاگرانژی مدلسازی شده است. برای جریان آب به‌عنوان فاز پیوسته معادله ناویر-استوکس شامل بقای جرم و مومنتوم درنظرگرفته می‌شود. این در حالتی است که برای مدلسازی ذرات نمک به‌عنوان فاز ناپیوسته معادله مومنتوم ذرات (قانون نیوتون) فرض شده است. اثر متقابل ذرات بر فاز پیوسته به‌صورت جملات منبع نیرو درنظرگرفته می‌شود، حال‌آنکه نیروی سیال پیوسته بر ذرات از جملات نیروی مختلف تشکیل شده است. فرض اساسی در استفاده از این مدل، مدل اویلر-لاگرانژی، با درصد حجمی (کمتر از ۵٪) است. لذا این مدلسازی از کوپل دوطرفه بهره‌مند است. بدین معنی که اثرات ذرات برهم نادیده فرض شده است. لذا حضور ذرات در حرکت فاز پیوسته (آب) مؤثر دیده شده است.

معادلات حاکم برای فاز پیوسته آب تراکم ناپذیر به روش اویلری به‌صورت زیر است:

(۱)

$$\nabla.\left(\rho\vec{v}_f\right)=0$$

(۲)

$$\nabla.\left(\rho\vec{v}_f\vec{v}_f\right)=-\nabla p+\nabla.\left(\mu\nabla\vec{v}_f\right)+\overrightarrow{Forces}$$

(۳)

1 Furlani
2 Microscopic
3 Lehmann
4 Loukopoulos and Tzirtzilakis
5 Mohammadi And Kaviani
6 Airfoil
7 Morsi, And Alexander

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

$$\vec{v}_p = \frac{d\vec{X}_p(x,y,z,t)}{dt} = \frac{dx_p}{dt}\hat{\imath} + \frac{dy_p}{dt}\hat{\imath} + \frac{dz_p}{dt}\hat{\imath}$$

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{du_p}{dt}\hat{\imath} + \frac{dv_p}{dt}\hat{\jmath} + \frac{dw_p}{dt}\hat{k} \quad (۴)$$

در معادلات اخیر، ρ چگالی مخلوط سیال، P فشار سیال و $\vec{v}$ بردار سرعت جریان است. Forces جمله منبع معادله مومنتوم و ناشی از حضور ذرات در فاز پیوسته است. وقتی‌که ذرات از میان حجم کنترل شبکه ایجادشده مفروض عبور می‌کند، برای سیال آب می‌توان نوشت:

(۵)

$$\overrightarrow{Forces} = \sum_{i=1}^{p} \frac{m_i}{\delta v}\,\vec{F}$$

که P تعداد ذرات موجود در حجم کنترل سلول δV است.

معادله حرکت ذره با به‌کارگیری قانون دوم نیوتون به‌صورت زیر است:

(۶)

$$\vec{v}_p = \frac{d\vec{X}_p(x,y,z,t)}{dt} = \frac{\partial x_p}{\partial t} + \frac{\partial x_p}{\partial x}u_p\hat{\imath} + \frac{\partial x_p}{\partial y}v_p\hat{\jmath} + \frac{\partial x_p}{\partial z}w_p\hat{k}$$

(۷)

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F} = \vec{F}_D + \vec{F}_B + \vec{F}_M + \vec{F}_E + \vec{F}_m + \vec{F}_g$$

که $\vec{F}_D$، $\vec{F}_B$، $\vec{F}_M$، $\vec{F}_E$، $\vec{F}_m$، $\vec{F}_g$ نیروی پسا[1] ، نیروی بروآنی[2] ، نیروی مغناطیسی[3]، نیروی الکتریکی[4]، نیروی مگنس[5] و نیروی وزن هستند. اکثر نیروهایی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، برای ذرات بزرگ کاربرد دارند و برای ذرات در مقیاس نانو قابل‌چشم‌پوشی هستند.

نیروی پسا به دلیل سرعت نسبی بین ذره و سیال روی ذره اثر می‌کند. به‌ویژه هنگامی‌که عدد رینولدز کمتر از ۱۰۰ باشد، نیروی پسا نیروی غالب برای حرکت ذره است. نیروی پسا از رابطه زیر به دست می‌آید.

(۸)

$$\vec{F}_D = \frac{18\,\mu_f C_D Re_p}{24\rho_p d_p^2}(\vec{v}_f - \vec{v}_p) = \frac{1}{\tau_p}(\vec{v}_f - \vec{v}_p)$$

که Re_p عدد رینولدز ذره، $\vec{v}_f$ ، $\vec{v}_p$ به ترتیب سرعت سیال و سرعت ذره و ρ_p چگالی ذره، d_p قطر ذره ، μ_f ویسکوزیته سیال و τ_p زمان ماند ذره[6] به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

(۹)

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p}{\mu_f}|V_p - V_f|$$

$$\tau_p = \frac{4}{16}\frac{\rho_p\, d_p^2}{\mu_f\, C_p\, Re_p}$$

(۱۰)

C_D ضریب پسا است.

نیروی برآونی (F_B) به‌وسیله برخورد تصادفی ذرات با مولکول‌های سیال ایجاد می‌شود. این نیرو به برخورد تصادفی ذرات و اتم‌های غوطه‌ور در داخل سیال یا گاز دلالت دارد.

(۱۱)

$$F_{Bi} = \xi_i\sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}}$$

که ξ_i عدد تصادفی گاوسی مستقل-واریانس واحد است. اجزای نیروی برآونی طی فرایند نویزوایت گاوسین[7] با شدت طیفی $S_{n,ij}$[8] مدلسازی می‌شوند و Δt تغییرات زمان را نشان می‌دهد.

مغناطیس دائمی در ابعاد میکروسکپی می‌توانند یک میدان مغناطیسی به‌اندازه کافی بزرگ (بزرگ‌تر از ۰/۵ تسلا) برای اشباع مغناطیسی ذرات مغناطیسی فراهم آورند. در این وضعیت ذرات مانند یک آهنربای (مغناطیس) دائمی عمل می‌کنند. برای محاسبه میدان مغناطیسی وارد بر ذره منابع و روابط زیادی بسته به نوع میدان و اندازه ذرات و پارامترهای دیگر وجود دارد. برای محاسبه نیروی مغناطیسی وارد بر ذره از معادله زیر استفاده می‌شود.

(۱۲)

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

در رابطه بالا q بار یک ذره، B میدان مغناطیسی و v سرعت ذره است. نیروهای مغناطیسی و الکتریکی در جهت z وارد

[1] Drag Force
[2] Brownian Force
[3] Magnetic Force
[4] Electric Force
5 Magnous Force
[6] Particle relaxation time
[7] Gaussian white noise process
[8] Spectral intensity

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

می‌شوند و بر روی ذرات داخل آب تأثیر می‌گذارند مطابق رابطه (۱۳) نیروی الکتریکی که توسط میدان الکتریکی ایجاد می‌شود به‌صورت زیر به دست می‌آید:

(۱۳)

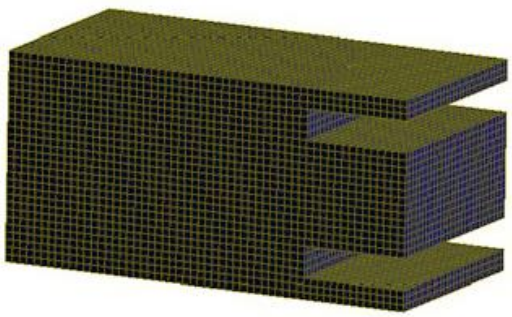
$$\vec{F}_E = q\vec{E}$$

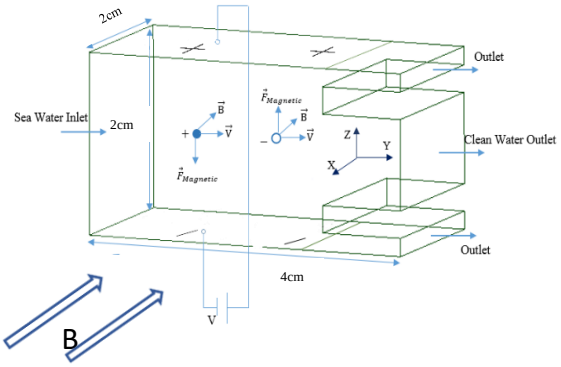
در رابطه بالا E میدان الکتریکی، q بار الکتریکی ذره و $\vec{F}_E$ نیروی الکتریکی وارد بر ذره است.

شبیه‌سازی

هندسه و ایجاد شبکه

شکل (۱) شماتیک و ابعاد هندسی و نحوه عملکرد جداسازی را نشان می‌دهد. این جداساز دارای یک ورودی آب دریا و سه خروجی است. به‌طوری‌که در خروجی، آب تصفیه‌شده از ناحیه خروجی میانی خارج می‌شود. میدان الکتریکی سبب یونیزه شدن آب دریا می‌گردد. به‌طوری‌که یون‌های نمک مثبت و منفی مطابق شکل ایجاد می‌گردند. اکنون برای هدایت بهتر این یون‌ها به‌طرف خروجی‌های B نیاز به حضور یک میدان مغناطیسی است. جهت نیروهای اعمالی بر ذرات باردار، مطابق شکل به‌صورت اجمالی نمایش شده است. اگر این نیروها فرصت کافی برای هدایت ذرات به خروجی‌های بالایی و پایینی داشته باشد، جداسازی به‌خوبی انجام خواهد شد. لذا در این میان، شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، قطر ذرات، سرعت آب ورودی و رژیم جریان دارای اهمیت فراوانی است. به‌عنوان پیش‌فرض مطابق مرجع (۲) ابعاد این دستگاه جداسازی با مقطع ۲ x۲ و طول ۴ سانتیمتر درنظرگرفته شده است.





شکل (۱): شکل شماتیک و ابعاد و شبکه‌بندی کانال موردبررسی

جدول (۱): خواص آب خالص و ذرات نمک

پارامتر	واحد	آب خالص	ذرات نمک
چگالی	(kg/m^3)	۹۹۸,۲	۲۱۶۰
ویسکوزیته نیوتونی	$kg/(m.s)$	۰,۰۰۱۰۳	-
نفوذپذیری مغناطیسی	h/m	1.275 e-6	1.35 e-6
چگالی بار	(C)	-	۰,۳

بررسی استقلال حل از شبکه

در روش عددی تحقیق موجود که معادلات حاکم بر حرکت سیال پیوسته آب و ذرات به روش حجم محدود گسسته سازی می‌شوند، نیاز به ایجاد شبکه محاسباتی است. برای حصول اطمینان از عدم وابستگی جواب‌ها به‌اندازه شبکه و المان‌های مورداستفاده برای استقلال حل از شبکه محاسباتی ضروری است. چهار نوع شبکه‌بندی با ابعاد مختلف مطابق جدول (۲) ایجاد گردیده است. متوسط سرعت سیال خروجی به‌عنوان معیار مقایسه‌ای انتخاب‌شده است. ملاحظه می‌گردد که برای تعداد المان ۶۷۸۲۶ (ردیف سوم) با افزایش تعداد المان‌ها، سرعت خروجی تغییری ندارد. لذا شبکه ردیف سوم به‌عنوان مبنای محاسباتی درنظرگرفته شده است.

جدول (۲) جدول بررسی استقلال حل از شبکه

ردیف	تعداد المان‌ها	تعداد گره‌ها	سرعت سیال خروجی (m/s)
۱	۲۵۸۹۰	۳۲۱۹۰	۱,۲
۲	۴۱۸۸۶	۴۶۱۲۱	۱,۸۹
۳	۶۷۸۲۶	۷۵۹۸۳	۱,۸۱
۴	۹۰۳۴۷	۹۹۵۶۴	۱,۸۱

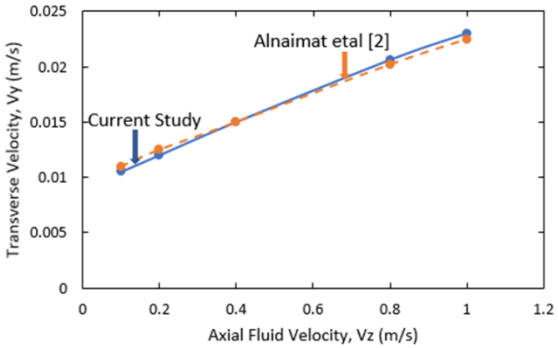
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

اعتبارسنجی

با مقایسه مطالعه حاضر با پژوهش انجام‌شده توسط در سال ۲۰۱۶ النعیمت و همکاران تحقیقی برای یک کانال تحت میدان مغناطیسی و الکتریکی ارائه دادند که برای اعتبار سنجی از این مقاله استفاده شده است (النعیمت، ۲۰۱۶). در شکل (۲) با نمودار سرعت محوری سیال در جهت z نسبت به‌سرعت عرضی با تحقیق مذکور مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات سرعت عرضی با افزایش سرعت سیال دارای منحنی‌های تقریباً یکسانی است. تغییرات ایجادشده در این نمودارها می‌تواند ناشی از نوع مدلسازی و همچنین افزایش میزان تعداد سلول (کاهش شدید اندازه سلول‌ها و همچنین کاهش شدید قطر سلول در نزدیکی دیواره) باشد.

لازم به ذکر است که هندسه این کانال به‌صورت متقارن در مقاله مرجع، شبیه‌سازی‌شده است. هرچند وجود جاذبه در جهت z سبب ایجاد خطا در تقارن می‌گردد. لذا تحقیق حاضر تمام هندسه به‌طور کامل درنظرگرفته شده است.



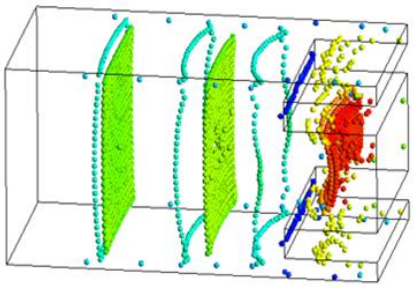
شکل (۲): نمودار اعتبارسنجی کار النعیمت و همکاران با این تحقیق

بحث و بررسی نتایج

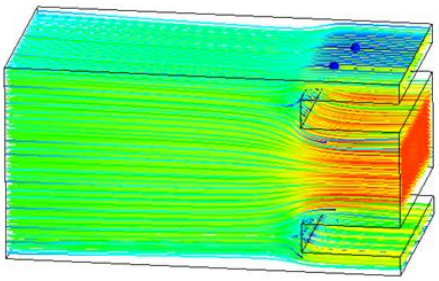
تأثیر میدان مغناطیسی برجذب ذرات

در این بخش تأثیر میدان مغناطیسی در جذب ذرات بررسی می شود. سرعت سیال و ذرات در ورود نیز ثابت و برابر با ۱m/s درنظرگرفته شده‌اند. قطر ذرات ثابت و برابر با ۱ میکرومتر می‌باشند. ذرات به‌صورت دائمی همراه با آب با عدد رینولدز ۱۰ وارد جاذب می‌گردند. همچنین میدان الکتریکی ثابت فرض شده است. ابتدا در غیاب میدان مغناطیسی و الکتریکی رفتار جداساز بررسی می‌گردد.

شکل (۳-الف) توزیع ذرات درون کانال را نشان می‌دهد که به‌صورت یکنواخت همراه با جریان آب درون جاذب در حرکت است و در قسمت خروجی‌ها ذرات در حال خارج شدن به همراه سیال هستند ذرات با سرعت ۱ m/s تزریق‌شده و سرعت آن‌ها در خروجی تقریباً به مقدار m/s ۲ می‌رسد. در شکل (۳-ب) خطوط سرعت ذرات را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها مشخص است که بدون اعمال نیروی مغناطیسی و الکتریکی ذرات به‌صورت موازی و یکنواخت و در یک‌جهت حرکت کرده و از کانال خارج می‌شوند.



(الف) توزیع ذرات



(ب) خطوط جریان ذرات

شکل (۳): توزیع ذرات در کانال با میدان مغناطیسی B=0 و میدان الکتریکی V=0

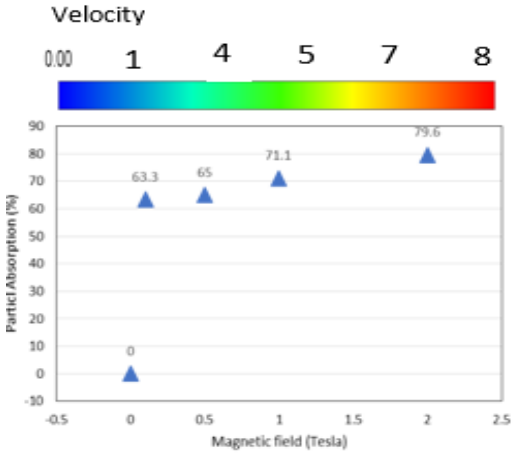
جدول (۳): درصد جذب ذرات در میدان الکتریکی V=1 و میدان مغناطیسی‌های متفاوت

Reynolds Number	Magnetic Field (Tesla)	Electric Voltage (Volt)	Particle Diameter (nm)	Particle Absorption (%)
۱۰	۰	۰	۱۰۰۰	۰
	۰,۱	۱		۶۳,۳
	۰,۵			۶۵
	۱			۷۱,۱
	۲			۷۹,۶

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

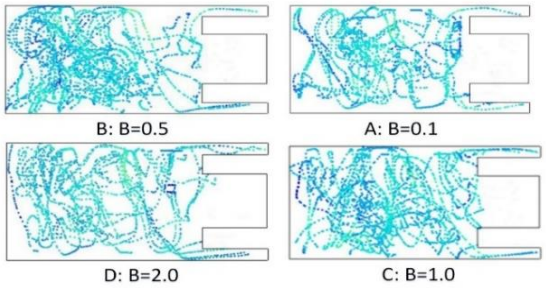
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

وجود میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی بر روی حرکت و جذب ذرات تأثیر گذاشـــته و باعث آشـــفتگی در جریان می‌گردد. در شکل (۴) درصد افزایش جذب ذرات با افزایش میدان مغناطیسی برای درک بهتر با نمودار نشان داده‌شده است.



شکل (۴): نمودار درصد جذب ذرات با افزایش میدان مغناطیسی در V=1Volt

در شکل (۵) مسیر حرکت نانو ذرات در داخل کانال تحت میدان مغناطیسی‌های متفاوت در صفحه y-z قابل‌رؤیت است. در این اشکال مسیر حرکت نانو ذرات دیده می‌شود. مشاهده می‌شود پس از آشفتگی‌های زیاد، ذرات در امتداد کانال به سمت دیواره‌های بالا و پایین جذب‌شده و نهایتاً بیشتر خطوط جریان ذرات به سمت خروجی‌های بالا و پایین می‌رود؛ و از این نواحی خارج می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با شروع اعمال میدان مغناطیسی در مقادیر کم، تعداد کمی از خطوط ذرات جذب دیواره‌ها شده و از مقاطع بالا و پایین تخلیه می‌گردد. با افزایش میدان مغناطیسی تعداد خطوط ذراتی که به سمت دیواره‌ها جذب‌شده و نهایتاً از مقاطع بالا و پایین تخلیه می‌گردند افزایش می‌یابد. در این اشکال محور اعداد سرعت را برحسب m/s نشان می‌دهد. از اعداد داخل شمارگر مشخص است که با افزایش میدان مغناطیسی سرعت ذرات نیز افزایش می‌یابد. ماکزیمم سرعت در میدان مغناطیسی ۲ تسلا حدود ۸۸ و در میدان مغناطیسی ۰/۱ برابر با ۶۸ متر بر ثانیه است.



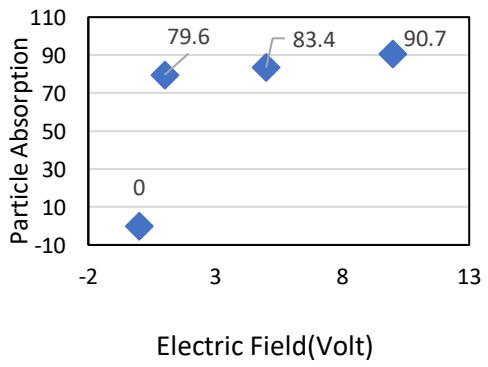
شکل (۵): مسیر حرکت ذرات با اعمال میدان مغناطیسی متفاوت در شرایط dp=1000nm و V=1Volt در صفحه y-z

تأثیر میدان الکتریکی برجذب ذرات

در بخش قبلی میدان مغناطیسی بر دو دیواره کانال باوجود میدان الکتریکی ثابت واردشده و درصد جذب ذرات به دست آمد در این بخش میدان الکتریکی به‌صورت متغیر بر دو سمت دیگر دیواره‌ها وارد می‌شود درحالی‌که میدان مغناطیسی با یک مقدار ثابت و برابر با ۲ تسلا وارد می‌شود؛ و سرعت سیال و ذرات در یک مقدار ثابت برابر با ۰/۱m/s و قطر ۱ میکرومتر نگه‌داشته می‌شوند تا تأثیر میدان الکتریکی هم‌زمان با میدان مغناطیسی سنجیده شود. افزایش جذب ذرات با افزایش میدان الکتریکی در جدول (۴) نشان داده‌شده است.

جدول (۴): درصد جذب ذرات در میدان مغناطیسی B=2 و میدان الکتریکی‌های متفاوت

Reynolds Number	Magnetic Field (T)	Electric Voltage (v)	Particle Diameter (nm)	Absorption (%)
۱۰	۰	۰	۱۰۰۰	۰
	۲	۱		۷۹,۶
		۵		۸۳,۴
		۱۰		۹۰,۷



[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

شکل (۶):نمودار درصد جذب ذرات با افزایش میدان الکتریکی در B=2Tesla

شکل (۶) بردار سرعت حرکت ذرات را برای چهار ولتاژ متفاوت نشان می‌دهد. این تحلیل برای سرعت سیال و ذرات برابر با ۱ m/s با رینو لدز ثا بت و قطر ذرات ۱ میکرومتر انجام‌شده است. با شروع اعمال میدان مغناطیسی و الکتریکی به دلیل افزایش تأثیر نیروهای مغناطیسی نسبت به نیروهای بین‌مولکولی یون‌های مثبت و منفی آزاد شده و درنتیجه حرکت چرخ شی و آ شفته ذرات تحت میدان تشکیل می‌گردد. در این اشکال با افزایش شدت میدان مغناطیسی تعداد یون‌های بیشتری آزادشده که این یون‌ها به سمت قطب‌های با بار مخالف جذب می‌گردند. درواقع به علت وجود نیروهای مغناطیسی و الکتریکی ذرات قبل از رسیدن به خروجی به دیواره‌ها نزدیک می‌شوند. همان‌طور که نشان داده‌شده است با افزایش میدان الکتریکی خطوط جریان ذرات به ناحیه خروجی آب شیرین وارد نشده و بیشترین جذب ذرات و تصفیه آب اتفاق می‌افتد. مقدار غلظت ذرات با اعمال میدان‌های مغناطی سی متفاوت نمودار شکل (۷) میزان جدایش ذرات در خروجی در شرایط اعمال میدان مغناطی سی ۰/۲ ت سلا و ولتاژهای متفاوت در بازه میدان‌های الکتریکی ۰/۲ تا ۲ ولت را ن شان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش مقدار ولتاژ، میزان جدایش به‌طور مح سو سی افزایش‌یافته ا ست. این روند در میزان غلظت ذرات در خروجی قابل‌مشاهده است. همچنین مشاهده می‌شود در کمترین میزان ولتاژ، مقدار غلظت ذرات، کاملاً وابسته به حرکت سیال در کانال بوده است، ولی باکمی ناهنجاری در ق سمت مرکزی کانال مواجه شده ا ست. همان‌طور که در شمارگرهای B و C دیده می شود، مسیر حرکت و غلظت ذرات به سمت خروجی‌ها هدایت‌شده ا ست که نشان‌دهنده جدایش کامل در این مقطع ا ست. در شکل D شمارگر سرعت سیال نشان داده‌شده است همان‌طور که انتظار می‌رود، میدان مغناطی سی برای سیال تأثیر محسوسی نداشته است؛ که این امر به‌وضوح در شکل D مشاهده می‌شود. نکته قابل‌ذکر این‌که به دلیل تجمع ذرات در جداکننده‌ها دبی بیشتری از سیال در خروجی مرکزی کانال مشاهده می‌شود. بطوریکه در شکل (۸) مشاهده می‌شود با کاهش میدان مغناطیسی از ۰/۲ تسلا به ۰/۰۲ تسلا، شاهد کاهش محسوسی در میزان جدایش ذرات شده‌ایم. این میزان در کمترین مقدار ولتاژ یعنی ۰/۲ ولت تقریباً اثر جدایش از بین رفته است و ذرات کاملاً از رفتار سیال پیروی می‌کنند.

تأثیر تغییر قطر ذرات بر میزان جذب آن‌ها

در این بخش میزان جذب ذرات با افزایش قطر آن‌ها در یک عدد رینولدز ثابت ۱۰ موردبررسی قرار می‌گیرد. ذرات با پنج قطر ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰، ۵۰ و ۱۰ نانومتر از ورودی تزریق می‌شوند. میزان جذب ذرات در میدان مغناطیسی و الکتریکی ثابت با قطرهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. در جدول ۶ نتایج حاصل مشاهده می‌گردد.

جدول (۶): میزان جذب ذرات در میدان‌های مغناطیسی مختلف و قطرهای متفاوت ذرات با Re=10

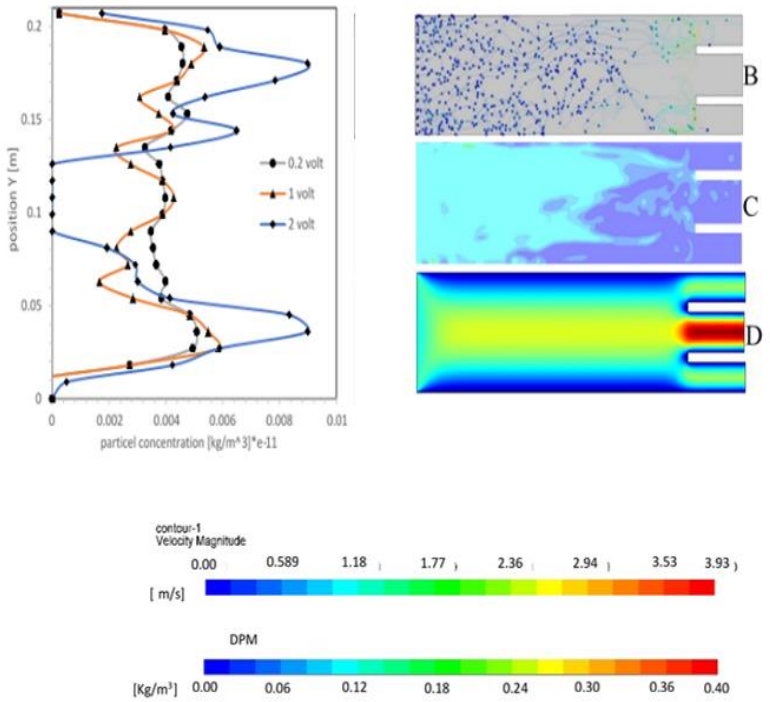
Magnetic Field (T)	Electric Voltage (v)	Particle Diameter (nm)	Absorption (%)
۰,۱	۱	۱۰۰۰	**۶۳,۳**
		۵۰۰	**۵۹,۸**
		۱۰۰	**۵۰,۲**
		۵۰	**۴۷,۲**
		۱۰	**۴۵,۸**
۱	۱	۱۰۰۰	**۷۱,۷**
		۵۰۰	**۶۸**
		۱۰۰	**۶۲,۹**
		۵۰	**۵۹,۹**
		۱۰	**۵۸,۵**
۱	۱۰	۱۰۰۰	**۹۰,۷**
		۵۰۰	**۸۷,۱**
		۱۰۰	**۸۲,۵**
		۵۰	**۷۸,۱**
		۱۰	**۷۶,۷**

از نتایج جدول بالا می‌توان دریافت که با افزایش قطر ذرات درصد جذب آن‌ها نیز افزایش می‌یابد گرچه تأثیر این افزایش به‌اندازه تأثیر افزایش میدان مغناطیسی برجذب ذرات نیست. در نمودارهای اشکال ۹ و ۱۰ نیز مقایسه جذب این ذرات در میدان مغناطیسی و الکتریکی متفاوت آورده شده است. مشخص است که با افزایش قطر و افزایش میدان مغناطیسی و الکتریکی درصد جذب ذرات افزایش قابل‌توجهی می‌یابد و به حدود ۹۰٪ می‌رسد. مشاهده گردید در ذرات کوچک‌تر

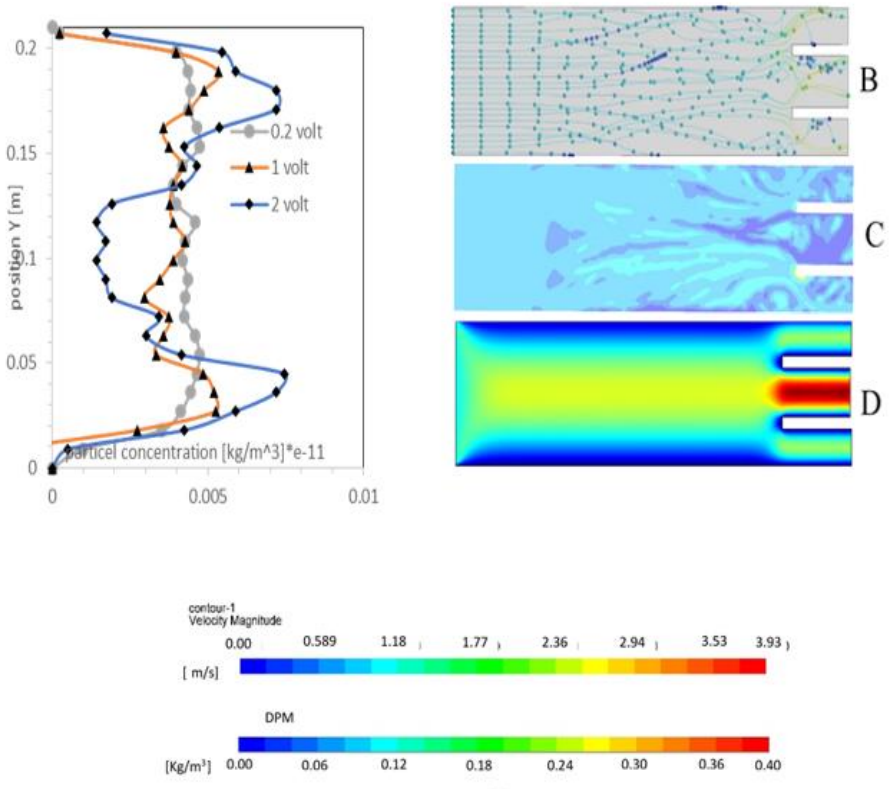
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

ازnm ۱۰۰ به علت حضور نیروهای بین‌مولکولی ذرات و الکترومغناطیس حدود ۵ درصد به‌طور ناگهانی کاهش مولکول‌های آب، راندمان جذب ذرات با روش می‌یابد.



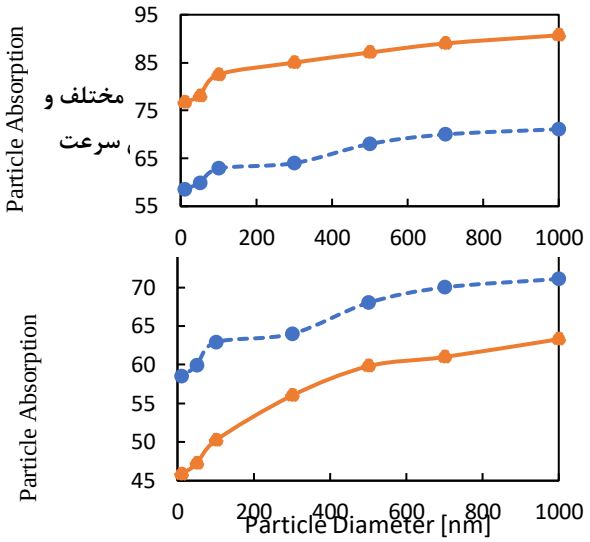
شکل (۷): A- میزان جدایش ذرات در خروجی در B=0.2 tesla، B -مسیر حرکت ذرات C -مقدار غلظت ذرات D -شمارگر سرعت



شکل (۸): A-میزان جدایش ذرات در خروجی در B=0.02 tesla، B - مسیر حرکت ذرات C -مقدار غلظت ذرات D -شمارگر سرعت

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

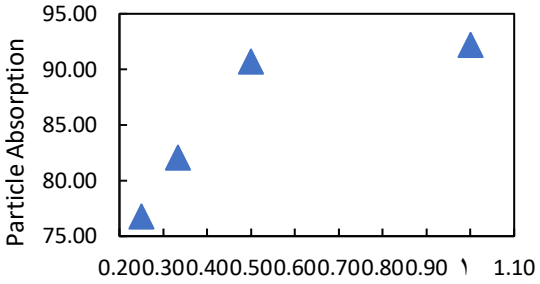


شکل (۱۰): درصد جذب ذرات در میدان‌های مغناطیسی مختلف و قطرهای متفاوت ذرات، V_p=V_f=0.1 m/s, V=1v

تأثیر تغییر هندسه جاذب بر درصد جذب ذرات ۱µm

در این بخش تغییر نسبت ابعادی جاذب موردبررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. مقاطع خروجی جاذب شامل یک خروجی میانی آب تصفیه‌شده و دو خروجی بالا و پایین، جهت تخلیه کنسانتره[1] ذرات نمک است. در این بخش ابعاد کانال را تغییر داده و درصد جذب ذرات در شرایط یکسان بررسی می‌شوند. بدین‌صورت که نسبت ابعادی a/b به‌صورت کل ارتفاع کانال جاذب نسبت به عرض کانال درنظرگرفته می‌شود.

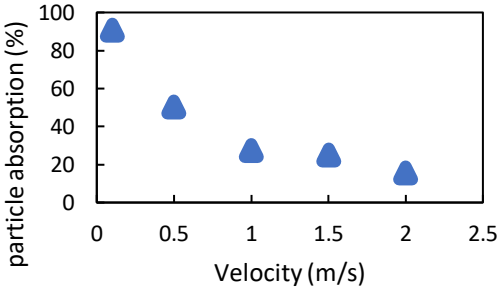
در این بخش تأثیر نسبت ابعادی را برای بهترین حالت که در آن نیروی مغناطیسی و الکتریکی و قطر ذرات بهینه ترین حالت را دارند برای بررسی نسبت ابعادی انتخاب می شوند؛ که قطر ذرات ۱۰۰۰nm و مقدار میدان مغناطیسی و الکتریکی به ترتیب ۱ تسلا و ۱۰ ولت درنظرگرفته شده اند. نتایج برای چهار نسبت ابعادی مختلف a/b =1, 1/2, 1/3, 1/4 موردبررسی قرار گرفتند و نتایج در شکل (۱۱) آورده شدند. در شکل مشخص است که با کاهش نسبت ابعادی مقدار جذب ذرات نیز کمتر می‌شود.



شکل(۱۱): درصد جذب ذرات در نسبت‌های ابعادی مختلف، dp=1µm, Vp=V_f=0.1 m/s, B= 2T, V=10v

تأثیر سرعت سیال ورودی

در تمام تحلیل‌های قبلی سرعت ورودی سیال ثابت و برابر با ۱ m/s و رینولدز ۱۰ انجام‌شده‌اند. حال هدف این است که تأثیر سرعت ورودی سیال بر روی جذب ذرات سنجیده شود. در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که تحلیل برای پنج سرعت ورودی متفاوت سیال انجام‌شده است این نتایج در یک میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی ثابت برابر به ترتیب برابر با ۲ تسلا و ۱۰ ولت و قطر ثابت ذرات برابر ۱ میکرومتر به‌دست‌آمده‌اند. با توجه به نمودار شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد هر چه سرعت ورودی سیال بیشتر شود درصد جذب ذرات کاهش می‌یابد. درواقع با کاهش سرعت سیال میدان فرصت بیشتری برای جذب ذرات در دیواره‌ها دارد. با افزایش سرعت به ۲ متر بر ثانیه مشاهده می‌گردد که تقریباً اکثر ذرات حدود ۱۵٪ از خروجی خارج‌شده و جذب دیواره‌ها نمی‌گردند.



شکل (۱۲): درصد جذب ذرات با افزایش سرعت ذرات

1 concentrate

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

نتیجه‌گیری

- در نگاه بهینه‌سازی، استفاده از روشی که با مصرف انرژی پایین‌تر و با کمترین تولید پساب شور، توانایی شیرین سازی آب را داشته باشد؛ موردتوجه است. تجارب مختلف نشان داده است که می‌توان آب را با روش‌های گوناگون به نحوی شیرین نمود که با حداقل تولید پساب شور کمترین انرژی را مصرف کند. الکترودیالیز یکی از روش‌های جداسازی ذرات باردار است که در آن آب شور تحت تأثیر ولتاژ جریان مستقیم به‌عنوان نیروی محرکه فرآیند، قرار می‌گیرد. در این تحقیق در سیستم نمک زدا علاوه بر اعمال جریان الکتریسیته، جریان آب شور تحت تأثیر میدان مغناطیسی نیز قرار می‌گیرد. بنابرین ذرات باردار به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی، مغناطیسی و الکتریسیته قرار گرفته و با مدل عددی شبیه‌سازی‌شده و حرکت ذرات در شرایط فوق، پارامترهای جداسازی ذرات باردار و همچنین راندمان جداسازی موردبررسی قرار گرفته است. درواقع نکته قابل‌ذکر به‌عنوان نوآوری در این تحقیق اعمال نیروهای مغناطیسی بر مسیر حرکت ذرات باردار و حامل بار الکتریکی است. و نشان داده شد با اعمال هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی راندمان جداسازی به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد.
- درصد جذب ذرات در میدان‌های مغناطیسی مختلف موردبررسی قرار گرفت است و مشاهده شد که افزایش جذب ذرات با افزایش میدان مغناطیسی اتفاق می‌افتد.
- میدان الکتریکی به‌صورت متغیر بر دو سمت دیگر دیواره‌ها واردشده درحالی‌که میدان مغناطیسی با یک مقدار ثابت و برابر با ۲ تسلا واردشده و سرعت سیال و ذرات در یک مقدار ثابت برابر با ۰/۱ m/s و قطر ۱ میکرومتر نگه‌داشته شدند. افزایش جذب ذرات با افزایش میدان الکتریکی به دست آمد.
- میزان جذب ذرات با افزایش قطر آن‌ها در یک عدد رینولدز ثابت ۱۰ موردبررسی قرار گرفت ذرات با سه قطر ۱۰۰۰ نانومتر، ۱۰ نانومتر و ۱۰۰ نانومتر از ورودی تزریق‌شده میزان جذب ذرات در میدان مغناطیسی و الکتریکی ثابت با قطرهای مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. از نتایج مشخص شد که با افزایش قطر ذرات درصد جذب آن‌ها نیز افزایش می‌یابد گرچه تأثیر این افزایش به‌اندازه تأثیر افزایش میدان مغناطیسی برجذب ذرات نیست.
- تغییر نسبت ابعادی موردبررسی قرار گرفت به این صورت که قطر ذرات ۱۰۰۰ nm و مقدار میدان مغناطیسی و الکتریکی به ترتیب ۱ تسلا و ۱۰ ولت درنظرگرفته شده‌اند. نتایج برای ۳ نسبت ابعادی مختلف a/b =۱/۲، a/b =۱/۳ و a/b =۱/۴ مورد بررسی قرار گرفتند و مشخص شد که با کاهش نسبت ابعادی مقدار جذب ذرات نیز کمتر می‌شود.
- تأثیر سرعت ورودی سیال بر روی جذب ذرات سنجیده شود. تحلیل برای ۵ سرعت ورودی متفاوت سیال انجام‌شده است این نتایج در یک میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی ثابت برابر به ترتیب برابر با ۲ تسلا و ۱۰ ولت و قطر ثابت ذرات برابر ۱ میکرومتر به‌دست‌آمده‌اند. هر چه سرعت ورودی سیال بیشتر می‌شود درصد جذب ذرات کاهش می‌یابد. درواقع با کاهش سرعت سیال میدان فرصت بیشتری برای جذب ذرات در دیواره‌ها دارد. با افزایش سرعت به ۲ متر بر ثانیه مشاهده می‌گردد که تقریباً اکثر ذرات حدود ۱۵٪ از خروجی خارج‌شده و جذب دیواره‌ها نمی‌گردند.

منابع

۱-خبازی خادر، ح. ۱۳۹۲ بررسی فنی و اقتصادی استفاده ترکیبی از دستگاه ECR با دستگاه RO_{BW}

2. Alnaimat, F. Alhseinat, E. Banat, F. & Mittal, (2016). Electromagnetic–mechanical desalination: Mathematical modeling. Desalination, 380, 75-84.

3. S. Alexander Stern Richard D. Noble, "Membrane Separation Technology Principlesand Applications". ELSEVIER, 2003.

4- Nichols, T. O. (2012). U.S. Patent No. 8,110,175. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

5. Mohammadi, T. & Kaviani, A. (2003). Water shortage and seawater desalination by electrodialysis. Desalination, 158(1-3), 267-270.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

6. Furlani, E. P. Sahoo, Y. Ng, K. C. Wortman, J. C. & Monk, T. E. (2007). A model for predicting magnetic particle capture in a microfluidic bioseparator. *Biomedical Microdevices*, *9*(4), 451-463.

7. Zarzo, D. & Prats, D. (2018). Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? Desalination, 427, 1-9.

8. Bandyopadhyay, S. and G. C. Layek. "Study of magnetohydrodynamic pulsatile flow in a constricted channel." Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 17.6 (2012): 2434-2446.

9-JWisniewski A.rozomska "Institute of Environment Protection Engineering Wrocław University of Technology 50-370" Wroclaw, Poland

10. Xua, b, c, Marissa Capitoa,c, Tzahi Y. Catha,CaMSF "Selective removal of arsenic and monovalentions from brackish water reverse osmosis concentrate" 2013.

11. Loukopoulos, V. C. and E. E. Tzirtzilakis. "Biomagnetic channel flow in spatially varying magnetic field." International Journal of Engineering Science 42.5-6 (2004): 571-590.

12. Lehmann, U. Hadjidj, S. Parashar, V. K. Vandevyver, C. Rida, A. & Gijs, M. A. (2006). Two-dimensional magnetic manipulation of microdroplets on a chip as a platform for bioanalytical applications. Sensors and Actuators B: Chemical, 117(2), 457-463.

13. Morsi, S. A. J. & Alexander, A. J. (1972). An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. Journal of Fluid mechanics, 55(2), 193-208.

14. Mohammadi, T. Moheb, A. Sadrzadeh, M. & Razmi, A. (2004). Separation of copper ions by electrodialysis using Taguchi experimental design. Desalination, 169(1), 21-31.

15. E.E. Tzirtzilakis, V.D. Sakalis, N.G. Kafoussias, and P.M. Hatzikonstantinou, "Biomagnetic fluid flow in a 3D rectangular duct," Int. J. Numer. Methods Fluids, pp. 44- 1279, 2004.

16. T.R. Troutt, J.N. Chung, C.T. Crowe, "Numerical models for two-phase turbulent flows," Annu Rev FluidMech, pp. 28, 11–43, 1996.

17. Y. He, D.W.L. Zhang, "Flow and migration of nanoparticle in a single channel," Heat Mass Transfer, pp. 45:1061–1067, 2009.

18. J. W. Havercort, S. Kenjeres, C. R. Kleijn, "Computational Simulations of Magnetic Particle Capturein Arterial Flows", Annals of Biomedical Engineering,10.1007/s10439-009-9786,2009.

19- T.F. Kong, E H S, H.S. Sugiarto, H.F. Liew, X. Wang, W.S. Lew, N.T. Nguyen, Y. Chen, An efficient microfluidic sorter: implementation of double meandering micro striplines for magnetic particles switching, Microfluid. Nanofluid. 10 (2011) 1069–1078.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و هفتم /زمستان ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 27 / March 2021

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.4.8]

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۲/ ۶/ ۹۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۵/ ۹۸/۹