دانـــشگاه یـــزد

دانشکده فنی و مهندسی

گروه نساجی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

تکنولوژی نساجی

پوشش الکترومغناطیسی منسوجات بی بافت به روش نانوالکتروریسی و بررسی عملکرد منسوج حاصل به عنوان فیلتر ذرات فلزی

استادان راهنما:

دکتر پدرام پیوندی

دکتر محسن هادی زاده

پژوهش و نگارش: بهناز شکاری

اسفند ماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

اسطوره های زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم

پدر و مادر عزیزم

به امید آنکه رضایت پشتوانه های زندگیم که بزرگترین الطاف الهی است، همواره برایم جاودان گردد.

سپاسگذاری:

اعتراف می‌کنم که نه زبان شکر تو را دارم و نه توان تشکر از بندگان تو، اما بر حسب وظیفه از کلیه اساتید گرانقدرم که در طول سالهای به یاد ماندنی شاگردیشان، مرا در راه رسیدن به اهدافم یاری نموده اند تشکر می‌نمایم. بر خود واجب می دانم از اساتید ارجمند آقایان دکتر پدرام پیوندی و دکتر محسن هادیزاده که اینجانب را در این پایان‌نامه راهنمایی و هدایت کرده و همواره از ایده‌های خوب آنان بهره‌مند گردیده‌ام، خاضعانه سپاسگزاری کنم.

همچنین از مدیریت محترم شرکت آبسار کویر یزد جناب آقای مهندس میرجلیلی و پرسنل زحمتکش این مرکز که کمک شایانی در انجام این پروژه نمودند، قدردانی به عمل می آورم.

چکیده

امروزه با به کارگیری فناوری‌های جدید از جمله نانو تکنولوژی به سادگی می‌توان آب آلوده را برای استفاده های مختلف و حتی برای مصارف خانگی بازیافت نمود. بدین ترتیب فیلتر نمودن آب با فیلترهای نانومتری، تحولی عظیم در بازیافت و استفاده مجدد از آب‌های صنعتی و کشاورزی ایجاد کرده است. نانو مواد، خواص سطحی و مغناطیسی متفاوتی نسبت به همان مواد در اندازه های بزرگ نشان می دهند که در این میان نانو ذرات Fe_3O_4 توجهات زیادی را نه تنها در زمینه مغناطیسی بلکه در زمینه دارویی و جداسازی آسان فلزات جلب کرده است.

در این تحقیق به معرفی روشی آسان و مقرون به صرفه برای پاکسازی محلول های آبی از فلزات سنگینی همچون کروم پرداخته شده است؛ به این ترتیب که پلیمر پلی‌اکریلونیتریل به همراه ذرات مغناطیسی Fe_3O_4، با استفاده از روش الکتروریسی به وبی از نانو الیاف تبدیل گردیده که بر روی یک لایه بی بافت قرار می گیرد و این نانو الیاف تحت تأثیر عامل‌های مختلفی از جمله غلظت نانوذرات در محلول، فاصله و زمان الکتروریسی دست خوش تغییر می‌شود. سپس راندمان فیلتر های تهیه شده با استفاده از عبور محلولی که حاوی یون های کروم (VI) با غلظت PPM ۵۰ بود مورد بررسی قرار گرفت.

در نهایت توسط روش آماری به بررسی عامل‌های مؤثر پرداخته شد به طوری که نتایج تحلیل آماری، نشان داد که از بین ۳ عامل: غلظت، که از پارامترهای محلول به شمار می آید و زمان و فاصله الکتروریسی که جز پارامترهای فرآیند است، تنها غلظت نانوذرات در سطح ۰/۰۵ بر روی راندمان تصفیه فیلتر تاثیر گذار می باشد.

Abstract

Nowadays to apply novel technologies such as nano technology can recovery wastewater for different utilizations even domestic using. In this manner water filtration with nanofilters, creat a great transition in recovery and renewed using from industrial agriculture using. Nanoparticles show various surface and magnetic properties as compared with same material in big size. Furthermore nanoparticles has attracted more attention not only in magnetic but in medicinal field and easy removal of material.

In this paper a method of easy and economical is recommended for purification aqueous solution from heavy metal of hexavalent chromium, so electrospinning was used to produce a magnetic coating of Polyacrylonitrile (PAN) include Fe_3O_4 magnetic nanoparticles on nonwoven substrate. Electrospinning nanofibers change via factors such as: nanoparticles concentration in solution, distance and time of electrospinning. Then efficiency of prepared filters is examined by passing of aqueous solution contaminated with Chromuim ions concentration 50 PPM. Subsequently statistic experimental showe that concentration of magnetic nanoparticles only efficient parameter on filteration efficiency.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول ۱

فیلتراسیون ۱

۱-۲ هدف از فیلتراسیون ۲

۱-۳ مکانیزم های تصفیه ۶

۱-۴ جنس فیلترها ۱۰

۱-۵ خواص فیلترها ۱۰

۱-۵-۱ خواص مکانیکی ۱۱

۱-۵-۱-۱ سختی ۱۱

۱-۵-۱-۲ استحکام ۱۱

۱-۵-۱-۳ مقاومت در برابر تنش-کرنش ۱۲

۱-۵-۱-۴ استحکام لبه ها ۱۲

۱-۵-۱-۵ مقاومت در برابر سایش ۱۲

۱-۵-۱-۶ استحکام در برابر ارتعاش ۱۳

۱-۵-۱-۷ ابعاد فیلترها ۱۳

۱-۵-۱-۸ نصب فیلتر ۱۳

۱-۵-۲ خواص کاربردی ۱۳

۱-۵-۲-۱ استحکام شیمیایی ۱۳

۱-۵-۲-۲ استحکام حرارتی ۱۴

۱-۵-۲-۳ استحکام بیولوژیکی ۱۴

۱-۵-۲-۴ استحکام دینامیکی ۱۴

۱-۵-۲-۵ خواص جذب حجمی ۱۴

۱-۵-۲-۶ خواص جذب سطحی ۱۵

۱-۵-۲-۷ قابلیت تر شدن ۱۵

۱-۵-۲-۸ سلامت و جنبه های ایمنی ۱۶

۱-۵-۲-۹ خصوصیات الکترواستاتیکی ۱۶
۱-۵-۲-۱۰ قابلیت بازیافت ۱۷
۱-۵-۲-۱۱ قابلیت استفاده مجدد ۱۷
۱-۵-۳ خواص مخصوص تصفیه ۱۷
۱-۵-۳-۱ کوچکترین ذرات به دام افتاده ۱۸
۱-۵-۳-۲ راندمان نگهداری ذراتی با اندازه های متفاوت ۱۸
۱-۵-۳-۳ مقاومت در برابر جریان ۲۱
۱-۵-۳-۴ ظرفیت نگهداری ضایعات ۲۴
۱-۵-۳-۵ تمایل به انسداد ۲۴
۱-۶ تصفیه الکتریکی ۲۵
۱-۷ فیلترهای آنتی باکتریال ۲۵
فصل دوم ۲۷
مغناطیس ۲۷
۲-۱ مغناطیس ۲۸
۲-۲ نیروی میدان مغناطیسی ۲۸
۲-۳ شار ۳۰
۲-۴ میدان مغناطیسی ۳۱
۲-۵ نیرو محرکه مغناطیسی ۳۲
۲-۶ تئوری مغناطیس شدن ۳۳
۲-۷ منحنی مغناطیس شوندگی و حلقه هیسترزیس ۳۵
۲-۸ انواع مواد مغناطیسی ۳۷
۲-۸-۱ دیامغناطیس ۳۷
۲-۸-۲ پارامغناطیس ۳۷
۲-۸-۳ فرومغناطیس ۳۸
۲-۸-۴ آنتی فرومغناطیس ۳۹
۲-۸-۵ فری مغناطیس ۳۹

۲-۹ نانوذارت مغناطیسی ۳۹
۲-۱۰ کاربرد نانو ذرات مغناطیسی ۴۰
۲-۱۰-۱ ذخیره اطلاعات ۴۰
۲-۱۰-۲ فروسیال‌ها (محلول‌های مغناطیسی) ۴۱
۲-۱۰-۳ نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی ۴۱
۲-۱۰-۴ دارو رسانی هدفمند ۴۱
۲-۱۰-۵ MRI ۴۲
۲-۱۰-۶ تصفیه آب های آلوده ۴۲
فصل سوم ۴۳
الکتروریسی حاوی نانوذرات ۴۳
۳-۱ نیروهای وارد بر ذرات ۴۴
۳-۱-۱ نیروی ثقل ۴۴
۳-۱-۲ نیروی ارشمیدس ۴۴
۳-۱-۳ نیروی کششی ۴۴
۳-۱-۴ نیروی مغناطیسی ۴۶
۳-۱-۵ نیروی الکترواستاتیکی ۴۶
۳-۲ الکتروریسی ۴۷
۳-۳ پارامترهای محلول ۴۹
۳-۳-۱ وزن مولکولی و ویسکوزیته محلول ۴۹
۳-۳-۲ کشش سطحی ۵۰
۳-۳-۳ اثر دی الکتریک محلول ۵۱
۳-۳-۴ ضریب هدایت الکتریکی محلول ۵۲
۳-۴ شرایط فرآیند ۵۲
۳-۴-۱ ولتاژ و میدان الکتریکی ۵۲
۳-۴-۲ نرخ تغذیه ۵۵
۳-۴-۳ تاثیر جمع کننده ۵۵

۳-۴-۴ فاصله نازل از جمع کننده ۵۶
۳-۵ روش های الکتروریسی ۵۷
۳-۶ کامپوزیت ها ۵۸
۳-۷ خصوصیات کامپوزیت ها ۵۸
۳-۸ نانوکامپوزیت ها ۵۹
۳-۹ کاربرد نانوذرات Fe_3O_4 به عنوان جاذب یون های فلزی ۵۹
فصل چهارم ۶۵
تجربیات ۶۵
۴-۱ مشخصات مواد مصرفی ۶۶
۴-۱-۱ پلی اکریلو نیتریل (PAN) ۶۶
۴-۱-۲ دی‌متیل فرم‌آمید ۶۷
۴-۱-۳ مگنتیت ۶۸
۴-۱-۴ منسوج بی بافت ۶۹
۴-۲ مشخصات دستگاه ها ۷۰
۴-۲-۱ حمام اولتراسونیک ۷۰
۴-۲-۲ دستگاه الکتروریسی ۷۱
۴-۲-۳ دستگاه جذب اتمی ۷۲
۴-۳ روش انجام آزمایش ۷۵
۴-۳-۱ طراحی آزمایش ۷۵
۴-۳-۲ تهیه محلول الکتروریسی ۷۷
۴-۳-۳ الکتروریسی ۷۷
۴-۴ مورفولوژی نانو الیاف کامپوزیتی ۷۷
۴-۵ اندازه گیری راندمان تصفیه ۸۰
فصل پنجم ۸۷
نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۷
۵-۱ نتیجه گیری ۸۸
۵-۲ پیشنهادات ۸۸

فهرست شکل ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل۱- ۱ تصفیه توسط صاف کردن سطحی [۲]..... ۶

شکل۱- ۲ تصفیه با صاف کردن عمقی [۲]..... ۷

شکل۱- ۳ مکانیزم تصفیه عمقی [۲]..... ۷

شکل۱- ۴ مکانیزم تصفیه قالبی [۲]..... ۸

شکل۱- ۵ ارتباط بین اندازه ذرات و راندمان دو نوع فیلتر (نمدی و سیم بافته شده) [۲]..... ۱۸

شکل۱- ۶ یک نخ از الیاف کوتاه ریسیده شده [۲]..... ۲۰

شکل۱- ۷ نرخ افزایش فشار با طول عمر فیلتر [۲]..... ۲۴

شکل۲- ۱ نیروی الکترومغناطیسی بین دو بار الکتریکی متحرک [۵]..... ۲۹

شکل۲- ۲ میدان مغناطیسی عبوری از سطح [۴]..... ۳۱

شکل۲- ۳ میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم حامل جریان [۴]..... ۳۱

شکل۲- ۴ منحنی مغناطیس شوندگی مواد تجاری [۷]..... ۳۴

شکل۲- ۵ منحنی مغناطیس شوندگی و حلقه هیسترزیس [۹]..... ۳۶

شکل۲- ۶ یک ماده دیا مغناطیس [۳]..... ۳۷

شکل۲- ۷ دیاگرام نمادین گشتاورهای مغناطیسی در چهار نوع ماده مغناطیسی [۳]..... ۳۹

شکل ۳- ۱ ارتباط ضریب کششی در برابر عدد رینولدز ذرات کروی [۱۳]..... ۴۵

شکل ۳- ۲ نمای شماتیکی از الکتروریسی [۱۴]..... ۴۸

شکل ۳- ۳ [A] در ویسکوزیته بالا، مولکولهای حلال در سرتاسر مولکولهای پلیمر درهم تابیده شده پخش شدهاند. [B] با ویسکوزیته کم، مولکولهای حلال مایل به جمع شدن تحت کشش سطحی هستند [۱۵]..... ۵۱

شکل ۳- ۴ فرورفتگیهای بوجود آمده در الکتروریسی کاپرولاکتان در نرخ تغذیه بالا (۸میلی لیتر بر ساعت) [۱۵]..... ۵۶

شکل ۳- ۵ تاثیر اندازه نانوذرات Fe_3O_4 روی میزان جداسازی یون ها با استفاده از [۱۸]..... ۶۳

شکل ۳- ۶ تصویر SEM مخلوط نانوذرات با بزرگنمایی ۱۰۰,۰۰۰ [۲۱]..... ۶۳

شکل۴- ۱ ساختار شیمیایی پلیاکریلونیتریل..... ۶۶

شکل۴- ۲ منحنی چگالی شار مغناطیسی بر حسب مغناطیس شوندگی نانوذرات Fe_3O_4..... ۶۹
شکل۴- ۳ تصویر منسوج بی بافت مورد استفاد به عنوان لایه زیری ۷۰
شکل۴- ۴ حمام اولتراسونیک ۷۱
شکل۴- ۵ دستگاه الکتروریسی مورد استفاده..... ۷۲
شکل۴- ۶ دستگاه جذب اتمی..... ۷۳
شکل۴- ۷ تصویر SEM حاصل از الکتروریسی ۹٪ PAN و ۹٪ نانو ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با بزرگنمایی ۵۰۰..... ۷۸
شکل۴- ۸ تصویر SEM حاصل از الکتروریسی ۹٪ PAN و ۹٪ نانو ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با بزرگنمایی ۲۰۰۰..... ۷۸
شکل۴- ۹ تصویر SEM حاصل از الکتروریسی ۹٪ PAN و ۹٪ نانو ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با بزرگنمایی ۸۰۰۰..... ۷۹
شکل۴- ۱۰ تصویر SEM حاصل از الکتروریسی ۹٪ PAN و ۹٪ نانو ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با بزرگنمایی ۶۴۰۰۰..... ۷۹
شکل۴- ۱۱ تاثیر زمان تماس مستقیم نانوذرات Fe_3O_4 روی جذب یون های کروم ۸۳

فهرست جداول

عنوان جدول **صفحه**

جدول۱- ۱ دسته بندی مجموعه فیلتر کردن [۱] ۵

جدول۱- ۲ نقش مکانیزم های تصفیه در تصفیه عملی [۲] ۹

جدول۱- ۳ میزان تخلخل برخی از فیلترها [۲] ۲۲

جدول۴- ۱ بعضی از مشخصات پلی‌اکریلونیتریل ۶۷

جدول۴- ۲ مشخصات DMF ۶۸

جدول۴- ۳ بعضی از مشخصات نانوذرات Fe_3O_4 ۶۸

جدول۴- ۴ مشخصات حمام اولتراسونیک ۷۱

جدول۴- ۵ جدول مربوط به مقادیر عامل‌های مختلف الکتروریسی ۷۶

جدول۴- ۶ غلظت یون های کروم موجود در محلول بعد از فیلتر شدن توسط نمونه های تولید شده ۸۲

جدول۴- ۷ Tests of Between-Subjects Effects ۸۴

جدول۴- ۸ Tests of Between-Subjects Effects ۸۴

فصل اول

فیلتراسیون

۱-۱ تعریف فیلتر[۱]

در Filtration Dictionary and Glossary، واکمن[۲] فیلتر را به عنوان "هر جسم قابل نفوذی که در تصفیه استفاده شده و جامدات بر روی یا داخل آن ته نشین می شوند." تعریف می کند. سودرلند[۳] و پورچاز[۴] استدلال کردند که این تعریف به اندازه کافی گسترده نیست. در یک تعریف جامع تر درباره فیلتر آمده است:

"یک فیلتر جسمی است که تحت شرایط عملی فیلتراسیون قابل نفوذ برای یک یا اجزای بیشتری از یک مخلوط، محلول یا سوسپانسیون است و غیر قابل نفوذ برای اجزاء باقیمانده" [۱].

اجزاء باقیمانده ممکن است ذرات جامد، قطرات مایع، مواد کلوئیدی، گونه های یونی یا مولکولی در محلول باشند، در حالی که مایع تصفیه شده معمولاً سیال، حلال و شاید همراه با بعضی اجزای دیگر خواهد بود.

در تعاریف فیلتر ذکر شده در بالا، ماهیت خود فیلتر تعریف نشده است. یک فیلتر هر وسیله ای است که عمل جداسازی را در بین اجزاء سوسپانسیون یا محلول، در یک سیالی که ممکن است مایع یا گاز باشد انجام دهد. به گونه ای که جداسازی توسط وسایل مکانیکی، بدون تغییر فاز (مانند ذوب کردن یک جامد یا تبخیر یک مایع) صورت می گیرد.

۱-۲ هدف از فیلتراسیون

دو دلیل عمده برای فیلترها و جداکننده ها وجود دارد که عبارتند از:

۱. جدا کردن ناخالصی ها از سیال[۵]

۲. جمع آوری مواد با ارزش از سیال[۶]

---

[۱] Media fiter
[۲] Wakeman
[۳] Sutherland
[۴] Purchas
[۵] Clarification
[۶] Harvesting

حالت اول معمولاً برای فیلترهای متخلل ظریف کاربرد دارد و هدف آن جدا کردن ناخالصی های تا حد ممکن کم می باشد. در حالت دوم هدف بازیابی مواد جامد با ارزش از یک سوسپانسیون تا حد امکان بوده و از فیلترهای ضخیم تر استفاده می شود.

از طرف دیگر این تقیسم بندی به طور کامل دقیق نیست، بعضی از فرآیند های مورد دوم ضایعات جامد را برای عملیات بعدی جدا می کنند در حالی که بعضی از مورد اول تنها برخی از ذرات جامد معلق را جدا می کنند. فیلتر کردن همچنین ممکن است به منظور دسته بندی یک جامد معلق به دو اندازه جداگانه استفاده شود.

در بیشتر موارد هدف یک فیلتر حفاظت می باشد که این هدف ممکن است برای حفاظت یک محیط داخلی از آلودگی های بیرون یا برای حفاظت محیط بیرون از آلودگی های داخلی باشد. فیلترهای هوا با راندمان بالا در ابتدا برای تاسیسات هسته ای به منظور تامین یک سد در برابر گرد و خاک های رادیواکتیو و آلودگی های نفوذ کرده به دنیای بیرون استفاده می شدند. امروزه این فیلترها در محیط های عاری از آلودگی برای جلوگیری از ورود آلودگی ها از دنیای بیرون استفاده می شوند.

جریان سیالی که فیلتر می شود ممکن است مایع یا گاز باشد. برای فیلترهای گازی، سیال اغلب هوا است هرچند کاربردهای دیگری نیز وجود دارند که گازهای دیگری به غیر از هوا فیلتر می شوند از قبیل فیلترهای برای سوخت های گازی مانند گاز طبیعی و پروپان و فیلترهای مخصوصی برای تولید گازهای بخصوصی مانند اکسیژن، نیتروژن، هلیوم، هیدروژن و غیره؛ و اما، فیلتر کردن مایعات در واقع می تواند تقسیم شود به تصفیه سیال های آبی و سیال های هیدروکربنی. سیال های هیدروکربنی سوخت ها، روغن های موتور، سیال های هیدرولیکی، سیال های خنک کننده فلزات حین عملیات کاری و روغن های خوراکی به حساب می آیند [۲].

بدیهی است که در طراحی یک فیلتر باید موارد زیر در نظر گرفته شود:

۱. خواص سیالی که فیلتر می شود از قبیل ویسکوزیته سیال، دما و خواص شیمیایی آن مانند خاصیت خوردگی

۲. خصوصیت های آلودگی شامل اندازه و غلظت ذرات

۳. عملکرد مطلوب فیلتر:

الف) راندمان تصفیه

ب) مقاومت در برابر جریان

ج) عمر فیلتر

د) اندازه

اولین کاری که یک فیلتر باید انجام دهد تصفیه آلودگی ها موجود در سیال است. فیلتر های طراحی شده جهت جداسازی ذرات بزرگ مانند دانه های گرده، باکتری های بزرگتر و گرد و غبار با فیلترهایی که برای ذرات کوچکتر مانند ویروس ها، دود دخانیات و دودهای دیگر به کار می روند متفاوت خواهد بود. به طور کلی، ذرات کوچکتر نیاز به الیاف ظریفتری در فیلتر برای تصفیه دارند و بالطبع گران قیمت تر خواهند بود. همچنین ثابت شده است که فیلترهای الکتریکی[۱] تولید شده با تکنیک بارداری الکتریکی راندمان تصفیه ذرات را افزایش می دهند. در تصفیه مایع فیلترهای باردار شده با کاتیون به عنوان یک روش موثر اصلاح عملکرد فیلتر مایع معرفی شده است.

در جدول (۱-۱) مایمن[۲] و همونوف[۳]، ۱۰ قسمت اصلی و ۳۶ زیرمجموعه فیلتر کردن را تعیین کرده اند. با توجه به جدول می توان پی برد که فیلتر کردن نقش مهمی در زندگی حفاظتی، تولید مواد، تجهیزات و محیط ایفا می کند [۱].

[۱] Electret

[۲] Mayman

[۳] Homonoff

جدول۱- ۱ دسته بندی مجموعه فیلتر کردن [۱]

بخش های تصفیه هوا		بخش های تصفیه مایع	
ساختمان/ کیفیت هوای داخلی	تجاری مسکونی سازمانی	فیلترهای کارتریج برای مایعات	استخر و چشمه آب معدنی فرآیندهای صنعتی و شیمیایی مسکونی (آب و دیگر مصارف خانگی) پزشکی (خون) دارویی و آرایشی هنر خط نویسی و طراحی (فرآایند عکاسی،جوهرها) تجهیزات زندگی (مانند روغن و گاز)
حمل و نقل	اتومبیل ها		
فرآیندهای صنعتی	تولید انرژی جمع آوری گردوغبار		
حفاظت شخصی	ماسک صنعتی ماسک طبی دستگاه تنفس مصنوعی	حمل و نقل	سوخت اتومبیل ها هواپیمایی
کیسه های جاروبرقی		براده برداری و فلزی کاری	مایع سرد کننده روغن های برش کاری
موارد دیگر		مواد خوراکی	لبنیات کیسه چای فوری و فیلتر قهوه آشامیدنی ها روغن ها (حیوانی،گیاهی،چربی ها)

۱-۳ مکانیزم های تصفیه

بر حسب روشی که یک ذره به وسیله یک فیلتر به دام انداخته می شود و از سیال جدا می شود، چهار مکانیزم اصلی را می توان در نظرگرفت که به طور خلاصه در زیر آمده است:

الف) صاف کردن سطحی[۱]: اگر اندازه ذره از روزنه های یک فیلتر بزرگتر باشد روی سطح آن ته نشین شده و باقی می ماند و اگر ذره ای از روزنه های فیلتر کوچکتر باشد از میان سوراخ های آن عبور می کند همانطور که به صورت طرح گونه در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. این مکانیزم در غربال ها، مش های منو فیلامنت با بافت ساده و در تصفیه با غشا ها نقش اصلی را بازی می کند.

شکل۱- ۱ تصفیه توسط صاف کردن سطحی [۲]

ب) صاف کردن عمقی[۲]: در یک فیلتر نسبتاً ضخیم بسته به قطر سوراخ های فیلتر ذرات در امتداد سوراخ ها عبور می کنند تا زمانی که به نقطه ای برسند که پهنای سوراخ به اندازه ای تنگ شود که ذرات در آن گیر بیافتند. شکل (۱-۲) این مکانیزم را نشان می دهد.

[۱] Surface straining

[۲] Depth straining