

## کاربرد فیلتراسیون غشایی در صنعت ماءالشعیر

لیلا پیوسته رودسری<sup>۱</sup>، پریوش هراتیان<sup>۲</sup>، سارا شهراب وندی<sup>۳</sup>، سجاد الله گانی<sup>۱</sup>، البرز بوسنانی<sup>۱</sup>

- ۱- کمیته تحقیقات دانشجویان، انتیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران  
۲- مری گروه علوم و صنایع غذایی، انتیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران  
۳- نویسنده مسئول: استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، انتیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: sohrabv@sbmu.ac.ir

### چکیده

ماءالشعیر یکی از نوشیدنی‌های پرمصرف جهان به شمار می‌آید. یکی از دلایل با اهمیت در این محبوبیت، طعم مطلوب و رنگ جذاب ماءالشعیر است. به منظور دستیابی به رنگ و شفافیت مطلوب در این نوشیدنی، فراوری جداسازی غشایی رو به گسترش است. در اثر استفاده از این نوع فراوری، درشت-مولکول‌های محلول عامل طعم و ویژگی‌های فراسودمند ماءالشعیر به خوبی حفظ می‌شود در حالی که ذرات کلوئیدی عامل کدورت و سلول‌های مخمر از فراورده جدا می‌شود. بنابراین طی چند سال اخیر مطالعات بسیاری در خصوص فرآیند "میکروفیلتراسیون جریان متقاطع" به عنوان یک روش جداسازی در صنعت ماءالشعیرسازی انجام شده است. شفافسازی و پاستوریزه کردن یکی از کاربردهای عمده میکروفیلتراسیون جریان متقاطع در صنایع ماءالشعیرسازی است. این نوع جداسازی مشکلات عمده‌ای نظیر انسداد غشا را به همراه دارد. یکی از محدودیت‌های اساسی استفاده از فرایندهای غشایی، میزان جریان عبوری فراورده از غشا است و این موضوع به طور وارون تحت تأثیر لایه موقت تشکیل شده از ترکیباتی است که نمی‌توانند از فیلتر غشایی عبور نمایند. این پدیده که پلاریزاسیون غلظتی نامیده می‌شود در مراحل ابتدایی فیلتراسیون، سبب کاهش سریع جریان عبوری از غشا می‌شود. بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی اثر شاخص‌های موثر بر فیلتراسیون (مانند دما، فشار، نوع و اندازه منفذ غشا) و مکانیسم انسداد غشایی است.

**واژگان کلیدی:** انسداد غشایی، جریان، غشا، میکروفیلتراسیون

### مقدمه

گسترش است لذا می‌تواند جایگزین مناسبی در روش‌های قدیمی تغليظ، جداسازی و شفاف سازی به شمار آید (۳). مشخص شده است که ویژگی‌های اصلی غشا، مواردی نظیر مقاومت به دماهای بالا، حلال‌های آلی و عوامل مکانیکی را شامل می‌شود. غشاهای مورد استفاده باید به مشکلات بیولوژیکی و استریلیزاسیون با بخار مقاوم باشند به طوری که احتمال آسودگی باکتریایی غشا به حداقل برسد (۴). تحقیقات نشان می‌دهند فیلتراسیون نهایی ماءالشعیر، ضمن عبور درشت-مولکول‌های محلول عامل طعم و نیز حفظ ویژگی‌های فراسودمند (functional properties) آن سبب جداسازی ذرات کلوئیدی عامل کدورت نظیر کمپلکس پروتئین-پلیفلن، بتاگلوكان و سلول‌های مخمر می‌شود (۶). از مزایای عده استفاده از غشاهای در صنایع غذایی می‌توان به

ماءالشعیر یک نوشیدنی سلامت بخش است که از تخمیر عصاره آبی مالت یا جایگزین‌های مالت با رازک به دست می‌آید. ماءالشعیر از نظر میزان مصرف در دنیا پس از چای در رتبه دوم قرار دارد و محبوبیت آن روز به روز در حال افزایش است (۲). که این موضوع می‌تواند به دلیل طعم مطلوب و رنگ جذاب ماءالشعیر باشد (۱). هرچند صنعت ماءالشعیرسازی پیشینه تاریخی دارد با این حال این صنعت، در مسیر فناوری‌های مدرن گام برمی‌دارد؛ زیرا تولیدکنندگان این محصول همواره در تلاش هستند تا با به کارگیری آخرین روش‌های روز دنیا به بالاترین کیفیت در محصول و بیشترین سودآوری دست یابند (۲). امروزه، فناوری جداسازی غشایی (نظیر اسمز معکوس، اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون) در صنایع غذایی، رو به

نماید. این فن آوری در کنار نابودی ریززنده‌های عامل فساد ماءالشعیر از نظر اقتصادی مقرن به صرفه است، به طوری که میکروفیلترها امروزه به عنوان یک روش تجاري، جایگزین روش پاستوریزاسیون متدال و سیستم‌های قدیمی غير-پیش‌رونده (dead-end) systems شده‌اند. جدول ۱ به برخی از مزايا و معایب اين روش در مقایسه با پاستوریزاسیون رايچ اشاره می‌کند (۲). در کنار تمام مزايا گفته شده در خصوص اين فن آوری، کاربرد صنعتي اين روش داراي دو مشكل عمده نظير "کنترل مکانيسم انسداد غشایي" و "کنترل ميزان جريان عبوری از غشا" است. بنابراین در اين مقاله سعی شده است به مفهوم پديده‌های ياد شده در غشا و نيز شاخص‌های مختلف موثر بر فیلتراسیون ماءالشعیر پرداخته شود.

جداسازی ریززنده‌ها و مولکول‌های مضار و کمینه مصرف انرژي و آسيب حرارتی محصول اشاره نمود (۷).

متداول آن است قبل از مرحله مشروط‌سازی (conditioning)، از پاستوریزاسیون سریع (flash pasteurization) (با استفاده از مبدل‌های صفحه‌ای) به منظور نابودی ریززنده‌های ماءالشعير استفاده شود، بنابراین ماندگاري محصول بسته به نوع فرایند می‌تواند تا ۶ ماه افزایش يابد. امروزه پتانسیل میکروفیلتراسیون جريان متقطع (crossflow microfiltration) به عنوان یک روش جداسازی مناسب در صنعت ماءالشعير مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهند استفاده از اين روش در مقایسه با فرایندهای حرارتی متداول می‌تواند از آسيب رساندن به ویژگی‌های حسي محصول جلوگيري

**جدول ۱. مقایسه میکروفیلتراسیون جريان متقطع و پاستوریزاسیون حرارتی**

نوع فرآيند	ويژگی‌های كيفی محصول	دمای فرآيند	پايداري محصول
ميكروفيلتراسيون	- حذف ریززنده‌ها - خواص حسی مطلوب - خواص تغذیه‌ای مطلوب	- عدم نیاز به دمای بالا	- پايداري بيشتر محصول از جنبه‌های بیولوژیکی، کلوقیدی، رنگ، آroma و طعم، پايداري کف
پاستوریزاسیون	- حذف ریززنده‌ها - خواص حسی ضعیفتر - افت خواص تغذیه‌ای	- نیاز به دماهای بالا	- عدم پايداري محصول

گيرند. شاييان ذكر است استفاده از غشاها در مقیاس وسیع تا زمان ابداع غشاهاي نامتقارن (asymmetric membrane) گسترش زیادي پیدا نکرد. يكى از ویژگی‌های مهم غشاهاي متقارن، زياد بودن ميزان جريان عبوری از غشا بود که اين موضوع در آن زمان اهمیت زیادي داشت. بعدها غشاهاي اسمز معکوس به منظور خالص‌سازی و نمک‌زدایي (desalting) آب مورد استفاده گستره‌ده قرار گرفت و از آن زمان به بعد، غشاهاي نظير اولترافیلترها به منظور تبخیر در مواد غذائي، جايگزين برخى از فرایندهای مرسوم مانند تغليظ شدند (۷). در آغاز قرن بیستم، برای اولین بار مشاهده شد يك غشا می‌تواند در نتيجه ايجاد گراديان،

### فیلتراسیون غشایی ماءالشعیر

**روند تحول غشا:** مطالعات نشان می‌دهند قرن‌ها قبل مصري‌ها از يك نوع توري سفالی به منظور شفاف‌سازی شراب استفاده می‌کردند. بنابراین به نظر مى‌رسد شايد اين فيلترهای سفالی، اولین غشاهاي مورد استفاده در فراوری مواد غذائي بوده‌اند. استفاده از فراوری غشایي در مقیاس آزمایشگاهی در ابتدای قرن ۲۰ در سترون سازی مواد غذائي آغاز شد و میکروفیلترها توanstند به عنوان يكى از بزرگ‌ترین کاربردهای غشایی نظير استريليزاسیون سرد محصولات لبنی و انواع ديگر غذاها مورد توجه همگان قرار

ذرات با توجه به اندازه منافذ غشا تعیین‌کننده عبور یا عدم عبور مولکول‌ها از غشا است. مشخص شده است که اسمرز وارون و پروپوراسیون قادر به جداسازی ترکیباتی مانند کلرید سدیم و آب (با اندازه‌های نزدیک به هم) هستند. در چنین مواردی پیوستگی غشا با مولکول مورد نظر و نیز سرعت نفوذ مولکول به درون غشا از اهمیت خاصی برخوردار است به طوری که ترکیبات با تمایل بیشتر به مواد سازنده غشا نسبت به سایر مولکول‌ها می‌توانند به راحتی در غشا حل شوند. بنابراین مواد سازنده غشا به عنوان یک فاز استخراج عمل می‌کند. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، اختلاف در ضریب دیفوزیون ترکیبات در طول غشا سبب جداسازی ترکیبات می‌شود که این موضوع بر اساس تئوری حلایت- دیفوزیون (solution-diffusion theory)، از دو عامل حلایت و پراکندگی (تعیین‌کننده گزینش پذیری غشا) پیروی می‌کند (۱۳، ۷).

بررسی‌ها نشان می‌دهند استفاده از خاک دیاتومه در فیلتراسیون، یک عملیات مرسوم در صنعت ماء‌الشعیرسازی به شمار می‌آید که متاسفانه این فرایند طی چند سال اخیر به دلیل مشکلات زیست- محیطی، بهداشتی و ملاحظات اقتصادی با چالش‌های جدی رو به رو شده است. بنابراین میکروفیلتراسیون جریان متقاطع به عنوان فرایند جایگزین، توسعه یافته است. از سایر مزایای میکروفیلتراسیون نسبت به فیلتراسیون با خاک دیاتومه می‌توان به بهبود کیفیت و طعم ماء‌الشعیر، تضمین تولید محصول استریل، عملیات مداوم و اتوماسیون کامل دستگاه اشاره نمود (۶). بنابراین میکروفیلتراسیون جریان متقاطع یک روش بسیار مناسب به منظور شفافسازی، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون نوشیدنی‌ها از جمله ماء‌الشعیر و لبنتیات به شمار می‌آید و در صنعت تولید شراب و ماء‌الشعیر، این روش نسبت به سایر روش‌های مرسوم شفافسازی مانند خاک دیاتومه ترجیح داده می‌شود زیرا در روش جدید مشکل باقی‌مانده‌های ایجاد شده در محصول برطرف شده و بنابراین نیاز به استفاده از کمک فیلترها برطرف می‌شود (۱۴). شکل ۱ میکروفیلتراسیون ماء‌الشعیر را به‌وضوح نشان می‌دهد.

سبب جداسازی دو ترکیب متفاوت شیمیایی مایع با اعمال خلا به یک طرف غشا (سبب نفوذ ترکیب مورد نظر به درون غشا و سپس عمل تبخیر در طرف دیگر) شود که این پدیده "پروپوراسیون" (pervaporation) نام‌گذاری شد. در این پدیده، جداسازی بر اساس اختلاف میزان جذب حلال‌ها و ضرایب دیفوزیون در غشا انجام می‌شود. در مقیاس صنعتی، پروپوراسیون به طور ویژه در جداسازی مخلوط‌هایی کاربرد دارد که به وسیله روش‌های مرسوم مانند تقطیر یا استخراج به سختی قابل جداسازی (نظیر ترکیبات آزوتروپ مانند مخلوط آب/الکل و محصولات شیمیایی با نقاط جوش نزدیک به هم مانند مخلوط استیک اسید/آب) هستند (۸).

**انتخاب غشا:** از آن‌جا که غشا اثر قابل توجه‌ای بر فیلتراسیون دارد، انتخاب غشای مناسب یکی از مهم‌ترین مراحل فرآیند به‌شمار می‌آید و هنوز تلاش‌های زیادی برای بهبود و اصلاح غشاهای ادامه دارد. مطالعات نشان می‌دهند گزینش پذیری و کارائی غشا نه تنها متأثر از ویژگی‌های ظاهری مانند ضخامت، تخلخل یا ماهیت چگال (dense)، اندازه منافذ و هندسه غشا و تخلخل لایه تشکیل شده روی غشا است بلکه به‌وسیله ویژگی‌های غیر ملموس غشاء مانند دمای گذر شیشه‌ای، نوع ترکیب، آب- دوستی یا آب- گریزی و نیز بار سطح آن، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۸). بنابراین در هر فرایند غشایی، تمام ویژگی‌های بهینه غشا اعم از ماهیت و ساختار آن مورد توجه است. در پروپوراسیون، غشاهای مورد استفاده، ضخیم و چگال هستند، درحالی که غشاهای مورد استفاده در نانوفیلتراسیون می‌توانند چگال و در حد نانو متخاصل باشند (۱۱، ۱۲، ۸).

طبقه‌بندی بر اساس اندازه مولکولی محصول در حال جداسازی، یک نوع طبقه‌بندی نامناسب در انواع غشاهای به‌شمار می‌آید. در نانوفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون، جداسازی محصول از طریق غشاهای متخاصل انجام می‌شود. این موضوع در حالی است که در اسمرز معکوس از غشاهای ضخیم و چگال استفاده می‌شود. در اولترا- و میکروفیلتراسیون که مکانیسم ساده غربال‌گری، عامل جداسازی درشت- مولکول‌ها به‌شمار می‌آید، قطر

کاهش نیرو محركه می شود (۷). در این حالت ممکن است غلظت ترکیبات محلول خصوصاً پروتئین ها در سطح غشا به حدی برسد که سبب تشکیل لایه ژلی شود. تشکیل این لایه تحت عنوان پدیده انسداد غشایی مطرح است که پدیده ای غیرقابل برگشت بوده و در بهترین حالت می تواند به صورت جزئی برگشت پذیر باشد (۷). بنابراین کاهش مستقیم و قابل برگشت جریان عبوری از غشا به عنوان پلاریزاسیون غلظتی تعریف می شود در حالی که کاهش غیرقابل برگشت و طولانی مدت جریان، انسداد غشایی نامیده می شود. تحقیقات نشان می دهند هر دو پدیده اساساً در تمام فرایندهای غشایی مطرح بوده اما اثرات ناشی از آن ها در میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و اسمز وارون بارزتر است (۷). اشکال مختلف انسداد منفذ غشا می تواند با اندازه و شکل ذرات جامد و محلول و نیز اندازه منفذ غشا در ارتباط باشد (۱۸).

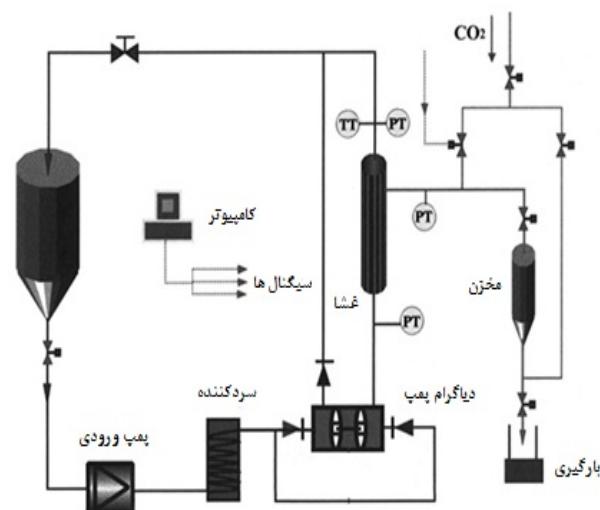
انسداد غشایی به چهار حالت مختلف زیر طبقه بندی می شود (۱۵):

الف. بلوکه شدن کامل حفرات غشا: این نوع انسداد زمانی اتفاق می افتد که ذرات ورودی بزرگتر از اندازه منفذ غشا بوده و این موضوع سبب بستن بخشی از منفذ و در نتیجه کاهش سطح غشا شود. بنابراین با توجه به سرعت جریان متقاطع، جریان عبوری از غشا می تواند با افزایش فشار اعمال شده افزایش یابد.

ب. بلوکه شدن ناقص حفرات غشا: این نوع پدیده مانند حالت قبل زمانی اتفاق می افتد که ذرات جامد یا درشت-مولکول ها به درون یک منفذ باز دسترسی یافته و سبب بستن آن شوند. با این تفاوت که ممکن است یک حالت دینامیک بلوکه شدن/نشدن اتفاق بیفتند و نیز ذرات عبوری با تشکیل یک پل در ورودی حفرات بدون بلوکه کردن کامل، سبب انسداد شوند.

پ. تشکیل کیک (cake formation): این نوع انسداد زمانی ایجاد می شود که ذرات یا درشت-مولکول ها قادر به ورود به درون منفذ نبوده و سبب تشکیل کیک بر روی سطح غشا شوند. بنابراین مقاومت کلی فیلتر غشایی به دلیل وجود مقاومت کیک ایجاد شده، افزایش می یابد.

ت. بلوکه شدن داخلی منفذ (internal pore blocking): این نوع بلوکه شدن در اثر ورود ذرات به درون منفذ غشا، رسوب بر سطوح منفذ یا جذب سطحی آن ها به وجود می آید.



شکل ۱. فرایند میکروفیلتراسیون ماء الشعیر

### مکانیسم انسداد غشایی (Fouling)

یکی از محدودیت های اساسی در فرایندهای غشایی، کاهش میزان جریان عبوری از غشا بوده که این میزان به طور وارون تحت تأثیر لایه موقت تشکیل شده از ترکیبات عبور نکرده از فیلتر غشایی است. نتیجه کلی این پدیده (concentration polarization) می شود سبب کاهش سریع جریان عبوری از غشا در شناخته می شود سبب کاهش تدریجی مراحل ابتدایی فیلتراسیون و به دنبال آن کاهش تدریجی جریان تا میزان مشخص و پایدار است. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. پلاریزاسیون غلظتی و انسداد غشایی

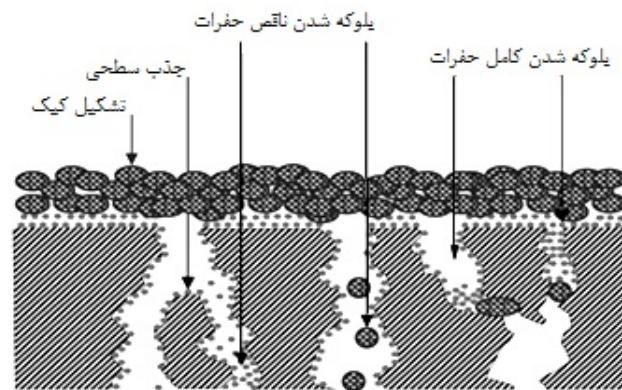
پدیده یاد شده مربوط به واکنش های فیزیکوشیمیایی ترکیبات تجمع یافته در غشا مانند جذب سطحی دیواره منفذ و مسدود کردن آن ها بوده که این موضوع سبب پلاریزاسیون غلظتی می شود (۱۵) در واقع مقاومتی کاملاً برگشت پذیر است که با فشار اسمزی افزایش یافته و منجر به

**فاکتورهای کلیدی انسداد غشایی:** انسداد غشایی مهم‌ترین عامل محدودکننده در استفاده از میکروفیلتراسیون در صنعت ماءالشعیر به شمار می‌آید زیرا ترکیبات متنوعی نظیر پروتئین‌ها، پلی‌فنل‌ها، کربوهیدرات‌ها (بتاگلوكان و پنتوزان)، ریز- و درشت-مولکول‌های عامل کدورت، ترکیبات نیتروژن‌دار با وزن مولکولی بالا، سلول‌های مخمر، نمک‌های اگرالات و مقادیر جزئی از مواد معدنی در ماءالشعیر منجر به ایجاد این پدیده شوند (۲۰، ۲۱). لازم به ذکر است با وجود این که اندازه برخی از این ترکیبات کوچک‌تر از اندازه متوسط منافذ میکروفیلترها بوده، ولی درشت-کلوئیدهای ایجاد شده (به دلیل ترکیب این ذرات با یکدیگر، کمپلکس‌های پروتئینی، پلی‌فنل‌ها، کربوهیدرات‌ها و یون‌های فلزی و نیز پلی‌ساقاریدهای سنگین وزن) اثر مستقیمی بر کاهش جریان و انسداد غشایی دارند (۹). مواد معدنی نادر (trace mineral) مانند  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Cu}^{2+}$  (از مسدودکننده‌های اصلی غشا) نقش مهمی به عنوان ترکیبات پل‌ساز (bridging agent) در منافذ غشا ایفا می‌کنند. البته باید اشاره کرد تمام ترکیبات ماءالشعیر تأثیر منفی بر ایجاد پدیده یاد شده ندارند به طوری که حضور و حذف مخمرها با استفاده از سانتریفیوژ به ترتیب سبب افزایش و کاهش جریان می‌شود (۲۲). پروتئین‌ها به خودی خود تأثیری بر انسداد غشایی ندارند (۲۴)، در حالی که وجود اتانول به عنوان یک حلآلی و یک عامل مرطوب‌کننده (wetting agent)، به عبور ذرات محلول و بنابراین افزایش سرعت جریان کمک می‌کند (۲۱).

**مقایسه سیستم‌های قدیمی غیرپیش‌رونده (dead-end) با سیستم‌های جریان متقطع:** اولین سیستم‌های فیلتراسیون غشایی به صورت غیرپیش‌رونده بودند. این سیستم به مایعات اجازه عبور داده در حالی که ترکیبات مورد نظر (هدف) پشت غشا باقی می‌مانند. با استفاده از این روش، انسداد غشایی (خصوصاً تشکیل کیک) و پلاریزاسیون غلظتی اتفاق می‌افتد و این پدیده منجر به کاهش بسیار شدید جریان عبوری و در نتیجه کاهش کارایی فرایند می‌شود. اما از آن‌جا که در روش جریان متقطع، پمپ‌شدن جریان ورودی به طور موازی با غشا انجام می‌شود ضخامت لایه هیدرولیک پایدار تشکیل شده کاهش می‌یابد و نهایتاً کاهش تمایل به پلاریزاسیون غلظتی و انسداد غشایی رخ می‌دهد. در این روش، میزان فشار عبوری از غشا و دفعات شستشو (نوع وارون) از شاخص‌های اساسی در کاهش

و بنابراین سبب کاهش حجم منفذ می‌شود. گزارشات نشان می‌دهند عبور نامنظم و تصادفی ذرات از میان منافذ غشا، سبب پایداری و ثبات ذرات درون منفذ شده و بدین ترتیب مقاومت کلی غشا در نتیجه کاهش اندازه منافذ افزایش می‌یابد. علاوه بر این موضوع، در صورت بلوکه شدن داخلی منافذ، مکانیسم انسداد غشایی مستقل از سرعت جریان متقاطع است. چهار حالت مکانیسم انسداد غشایی یاد شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

سلول‌های مخمر و ذرات کلوئیدی  
ترکیبات محلول شامل پروتئین، پلی‌فنل و کربوهیدرات



شکل ۳. مکانیزم انسداد غشایی در میکروفیلتراسیون جریان متقاطع ماءالشعیر

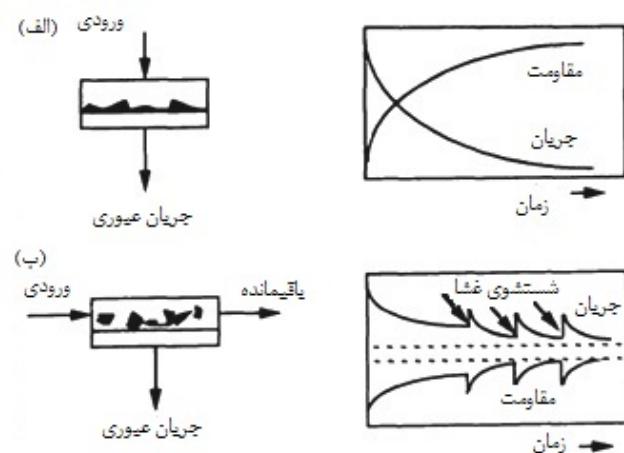
نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهند ماهیت ذرات موجود در ماءالشعیر اثر عمده‌ای بر مکانیسم انسداد غشایی دارد، بنابراین طیف گسترده‌اندازه ذرات موثر بر کدورت ماءالشعیر سبب ایجاد اشکال در فرآیند شفاف‌سازی ماءالشعیر با استفاده از فرایندهای غشایی می‌شود. به طوری که اثر ترکیبات کلوئیدی عامل کدورت در انسداد غشایی ارتباط تنگاتنگی با پراکندگی اندازه ذرات، واکنش‌های فیزیکوشیمیایی و ساختار غشا دارد (۲). پدیده انسداد غشایی در رسیدن به جریان مطلوب از دیدگاه اقتصادی، به صرفه نبوده و نمی‌تواند تضمین کننده کیفیت کامل محصول باشد بنابراین به منظور غلبه بر این مشکل، مطالعات بسیاری در زمینه راه‌کارهای موثر در افزایش جریان فیلتراسیون انجام شده است. می‌توان پدیده یادشده را با کاهش واکنش‌های سطحی غشا و ذرات محلول سرکوب نمود. نیز با کنترل شرایط هیدرودینامیک ورودی نظیر استفاده از دستگاه‌های متلاطم‌کننده (turbulent promoters)، ایجاد جریان‌های ناپایدار (unsteady flows)، غشاهای چرخنده (rotating membranes) و یا تزریق هوا سبب بهبود جریان شد (۱۶).

**تأثیر برخی از پارامترهای مهم بر فیلتراسیون**  
 تحقیقات نشان می‌دهند عوامل مختلف درونی و محیطی که متعاقباً به آن‌ها پرداخته می‌شود، بر فیلتراسیون غشایی موثر است. شکل ۵ به مهم‌ترین شاخص‌های موثر بر فیلتراسیون اشاره می‌نماید. هرگونه تغییر در این موارد (به دلیل تأثیری که بر پدیده انسداد غشایی دارد) می‌تواند بر کنترل میزان جریان عبوری از غشا که از دیدگاه اقتصادی مورد توجه صاحبان صنعت قرار دارد موثر باشد.

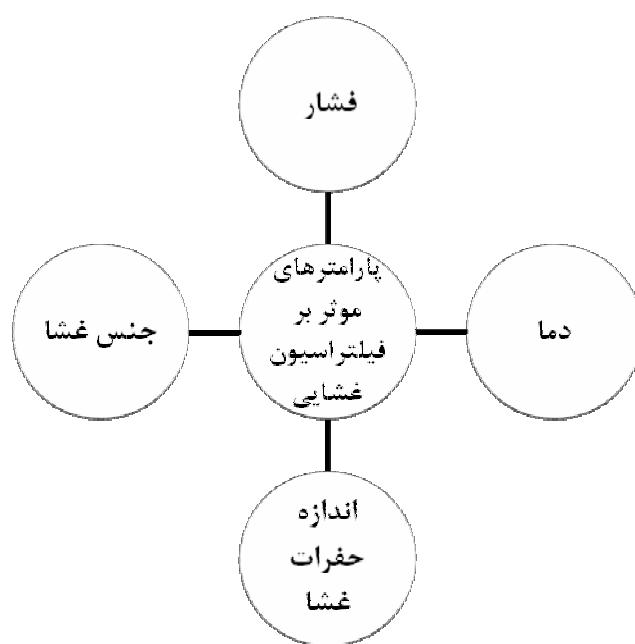
**تأثیر فشار:** فیلتراسیون تحت خلایک روش سنتی است که در آن می‌توان به بیشینه اختلاف فشار ۱ بار در طول غشا دست یافت که در عمل دست‌یابی به این میزان از خلایک استفاده از تجهیزات تجاری فیلتراسیون ممکن نیست. نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهند که با افزایش فشار، سرعت فیلتراسیون افزایش می‌یابد اما ارتباط بین فشار و فیلتراسیون از نوع خطی نیست (۲۳). گزارش شده است که افزایش فشار جریان عبوری از غشا حتی با وجود پدیده انسداد غشایی، سبب افزایش مقدار جریان‌های ابتدایی و انتهایی می‌شود. اثر دیگر افزایش فشار غشا، کاهش غلظت کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها در جریان نفوذی است که این موضوع مربوط به تشکیل یک لایه لجن بر روی سطوح غشا بوده و در نتیجه سبب محدودیت عبور این ترکیبات می‌شود.

.(۲۴)

انسداد غشایی، افزایش جریان و کاهش مصرف انرژی به شمار می‌آیند. تفاوت این دو سیستم در شکل ۶ به خوبی نشان داده شده است (۷).



شکل ۶. مقایسه سیستم‌های (الف) dead-end و (ب) جریان متقاطع



شکل ۵. مهم‌ترین پارامترهای موثر بر فیلتراسیون غشایی

میکروفیلتراسیون سوسپانسیون مخمر به وسیله غشا با سطوح صاف کمتر از نشان دار است همچنین نرخ برش بالا در غشاهای نشان دار به همراه سطح ناهموار در غشا سبب کاهش، تجمع ذرات بر سطح غشا می‌شود. بنابراین غشاهای سرامیکی با سطوح شکل دار مارپیچ دارای برخی از مزیت‌ها به شرح زیر نسبت به غشاهای با سطوح صاف هستند:

الف. با وجود این که در این نوع غشا جریان عبوری محدود می‌شود اما سرعتی مشابه جریان اولیه ورودی داشته و میزان آن بیشتر از سطوح صاف است.

ب. مصرف انرژی در هر واحد حجم نفوذی در غشاها نشان دار کمتر بوده و با افزایش سرعت جریان متقطع کاهش می‌باید (۱۰).

**تأثیر اندازه حفرات غشا:** مقایسه مقاومت ثابت به دست آمده در میکروفیلتراسیون انواع ماءالشعیر خام و شفاف شده نشان می‌دهد مکانیسم انسداد غشاوی بر اساس قطر منافذ غشا متفاوت است. به طوری که در غشاهای  $1/4$  میکرونی، مقاومت مخمرها عامل انسداد غشاوی به شمار می‌آید و این موضوع نسبت به سرعت جریان متقطع بسیار حساس است در حالی که در غشاهای با قطر منافذ کمتر از ۱ میکرون، عامل اصلی انسداد غشاوی، رسوب یا جذب سطحی ترکیبات ماءالشعیر مانند پلیفلن‌ها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها است. از آن جا که حضور سلول‌های مخمر منجر به کاهش مقاومت در برابر انتقال مواد و افزایش قطر ذرات بیشتر یا کمتر از ۱ میکرون، به ترتیب میزان مقاومت با توجه به نوع سلول‌های مخمر و ذرات کلوئیدی بیشتر تغییر می‌کند. نتایج مطالعات نشان می‌دهند کاربردهای میکروفیلتراسیون در صنعت ماءالشعیر شامل شفافسازی (حذف سلول‌های مخمر و مواد معلق) و استریلیزاسیون سرد است. بنابراین اگر هدف از فیلتراسیون، شفافسازی محصول باشد، غشاهایی با حفرات بزرگ (بیشتر از ۱ میکرون) به دلیل سرعت جریان نفوذی بالا و حذف کمتر تر کارکردهای اساسی ماءالشعیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که اگر هدف فرآیند فیلتراسیون، پاستوریزاسیون نیز باشد، مطالعات نشان می‌دهند هیچ غشاوی نمی‌تواند عمل پاستوریزاسیون سرد را با حفظ ویژگی‌های کیفی ماءالشعیر به طور همزمان تضمین کند و در صورت استفاده از جریان‌های عبوری در غشاهای کمتر از ۱ میکرون جریان عبوری بسیار کم بوده و بنابراین از نظر اقتصادی مقرن به صرفه نخواهد بود (۲). در شکل ۶،

تأثیر دما: تحقیقات نشان می‌دهند با افزایش دمای فرآیند، سرعت فیلتراسیون افزایش می‌باید. معلوم شده است که دمای فیلتراسیون می‌تواند بر حجم نمونه موثر باشد (۲۳).

**تأثیر نوع غشا:** از آن جا که غشاهای پلیمری قدیمی دارای معایبی نظیر طول عمر کوتاه، مقاومت پایین به دما و مواد شیمیایی، تغییر طعم محصول بهدلیل استخراج پلیمرها و تراکم‌پذیری (compressibility) ساختار غشا بوده در صنعت نوشیدنی‌های الکلی منع شده‌اند. در برابر این گونه غشاها، فیلترهای سرامیکی با مزایایی مانند قابلیت شستشو در دماهای بالا و مقاومت به دما، فشار و عوامل پاک‌کننده فعال وجود دارند (۱۹). غشاهای سرامیکی نسبت به انواع پلیمری، دارای انسداد کمتری هستند زیرا می‌توانند روش‌های مختلف شستشو و پاک‌کنندگی را تحمل نمایند. با این حال جریان عبوری از این نوع غشا معمولاً کم بوده و این نوع غشا تها در فیلتراسیون ماءالشعیر با مقاومت کم به جریان عبوری، مطلوب بهنظر می‌رسند (۱۷). گزارشات نشان می‌دهند هرچند مواد اولیه ساخت غشاهای پلیمری مورد استفاده دارای قیمت پایین‌تری هستند ولی با این حال به مرور زمان در حضور رطوبت متورم شده و این امر منجر به تغییر ساختار غشا می‌شود (۱۶). البته این نوع تورم می‌تواند به‌دلیل ورود حلal به درون غشا (حاصل از گرادیان شیمیایی) رخ دهد و سبب افزایش نفوذ پذیری و کاهش گزینش پذیری غشا شود (۱۳). هرچند این ویژگی می‌تواند به عنوان یک مزیت تلقی شود زیرا در اثر این پدیده، ساختار فیلترها متراکم‌تر می‌شود (۴).

نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهند نوشیدنی‌های فیلتر شده با ترکیبات سلولزی و همی‌سلولزی در غشا، بیشترین سرعت فیلتراسیون و غشاهای با ترکیب سلولز نیترات و نایلون کمترین سرعت را از خود نشان می‌دهند (۲۳).

مطالعات نشان می‌دهند تأثیر سطوح ناهموار بر سطح غشا که از آن‌ها با عنوان غشاها نشان دار (stamped membranes) باد می‌شود، بر انسداد غشاوی از طریق بررسی مدت زمان کاهش جریان قابل ارزیابی است به‌طوری که ناپایداری‌های هیدرودینامیک تولید شده در غشاهای نشان دار سبب سرکوبی سرعت انسداد غشاوی می‌شود. مصدق این نتیجه، بررسی دوره زمانی جریان در میکروفیلتراسیون سوسپانسیون مخمر است. گزارش یاد شده نشان داد که مدت زمان جریان ثابت نفوذی

می‌افتد که این موضوع یک مانع اصلی در راه رسیدن به یک جریان اقتصادی مطلوب و ثبات در کیفیت جریان بهشمار می‌آید. به نظر می‌رسد حضور سلول‌های مخمر و فشردگی رسوب حاصل از پروتئین‌ها و پلی‌فنل‌ها سبب کاهش سطح غشا می‌شود بنابراین استفاده از غشاهای پلی استری با منافذ میکرونی در محدوده ۰/۱ تا ۱ میکرون در فیلتراسیون ماءالشعیر میکرونزی در محدوده ۰/۱ تا ۱ میکرون در فیلتراسیون ماءالشعیر مناسب به نظر می‌رسد. این فیلترهای غشایی برای پایدارسازی میکروبی ماءالشعیر و جداسازی ترکیبات کدورت‌زا و حذف میکروب‌های مضر و نیز ایجاد یک جریان اقتصادی با صرف هزینه کم، مطلوب است.

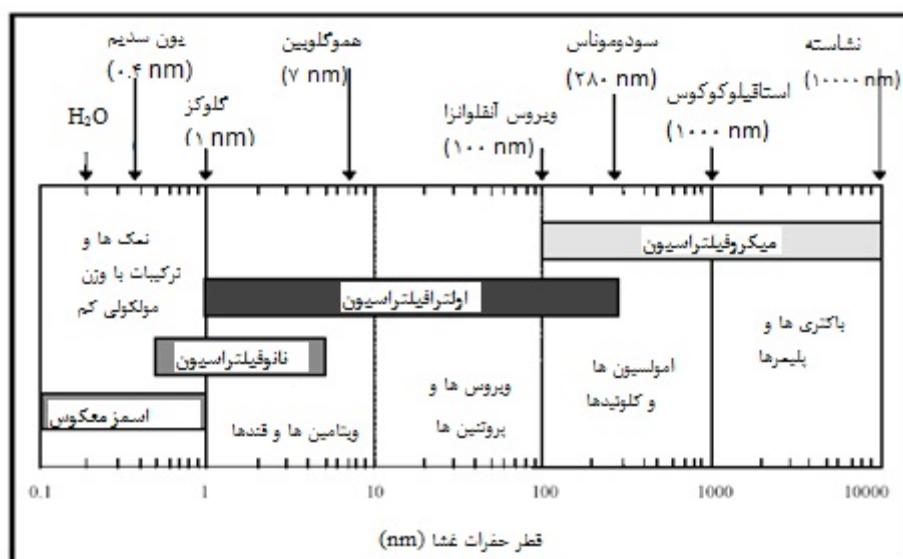
#### سپاسگزاری

این مقاله از طرح دانشجویی کمیته‌ی تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی استخراج شده است. همچنین لازم است از حمایت‌های صمیمانه جناب آقا دکتر امیر محمد مرتضویان تشکر به عمل آید.

گسترده اندازه قطر حفرات غشاهای مورد استفاده در انواع روش‌های فیلتراسیون نشان داده شده است (۷).

#### نتیجه‌گیری

از آن جا که ایجاد کدورت در ماءالشعیر یکی از مشکلات کیفی اساسی در این محصول به شمار می‌آید و سبب کاهش ماندگاری آن می‌شود بنابراین شفافسازی ماءالشعیر و پاستوریزه کردن ماءالشعیر شفافسازی شده با استفاده از روش میکروفیلتراسیون جریان متقطع در صنایع غذایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. شفافسازی ماءالشعیر به روش میکروفیلتراسیون، مستلزم به تله‌اندازی ذرات کلوئیدی (نقطیر سلول‌های مخمر، کلوئیدهای عامل کدورت) در پشت غشا و عبور درشت‌مولکول‌های محلول مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و ترکیبات عامل طعم و رنگ است تا بتواند محصولی سالم و با کیفیت تولید کند. البته در اثر عبور ترکیبات درشت‌مولکول از میان غشا پدیده انسداد اتفاق



شکل ۶. گسترده قطر حفرات در انواع روش‌های فیلتراسیون

#### References

1. Kaneda H, Takashio M, Shinotsua K, Okahata Y. Adsorption to or desorption of beer components from a lipid membrane related to sensory evaluation. *J Biosci Bioeng* 2001; 92(3): 221-226.
2. Fillaudeau L, Carrère H. Yeast cells, beer composition and mean pore diameter impacts on fouling and retention during cross flow filtration of beer with ceramic membranes. *J Memb Sci* 2002; 196: 39-57.
3. Blanpain P, Hermia J, Leonel M. Mechanisms governing permeate flux and protein rejection in the microfiltration of beer with a cyclopore membrane. *J Memb Sci* 1993; 84: 37-51.
4. Bruggen BV, Jansen JC, Figoli A, Geens J, Boussu K, Drioli E. Characteristics and performance of a 'universal' membrane suitable for gas separation, pervaporation and nanofiltration applications. *J Phys Chem B* 2006; 110(28):13799–13803.

5. Chi-Sheng Wu J, En-Hsien Lee. Ultrafiltration of soybean oil/hexane extract by porous ceramic membranes. *J Memb Sci* 1999; 154: 251-259.
6. Van Hoof SCJM, Noordman T, Berghuis O, Mol M, Peet C, Broens L. Membrane filtration for bright beer: An alternative to kieselguhr. *MBAA Tech Quart* 2000; 37(2):273-276.
7. Cuperus FP and Nijhuis HH. Applications of membrane technology to food processing. *Food Sci Tech Mys.* 1993; 4: 277-282.
8. Verhoef A, Figoli A, Leen B, Bettens B, Drioli E, Bruggen BV. Performance of a nanofiltration membrane for removal of ethanol from aqueous solutions by pervaporation. *Sep Purif Rev.* 2008; 60: 54-63.
9. Blanpain P, Fillaudeau L, Lalande L. Investigation of mechanisms governing membrane fouling and protein rejection in the sterile microfiltration of beer with an organic membrane. *Trans Inst Chem Eng* 1999; 77(C): 75-88.
10. Stopka J, Bugan SG, Broussous L, Schlosser S, Larbot A. Microfiltration of beer yeast suspensions through stamped ceramic membranes. *J Sep Purif Rev* 2001; 25: 535-543
11. Liu J, Teo WK, Chew CH, Gan LM. Nanofiltration membranes prepared by direct microemulsion copolymerization using poly (ethylene oxide) macromonomer as a polymerizable surfactant. *J Appl Polym Sci* 2000; 77(12): 2785-2794.
12. Sekulić J, Elshof JE, Blank DHA. A microporous Titania membrane for nanofiltration and pervaporation. *Adv Mater* 2004; 16(17): 1546-1550.
13. Barri`ere B, Leibler L. Permeation of a solvent mixture through an elastomeric Membrane, The case of pervaporation. *J Polym Sci Part B* 2003; 41(2): 183-193.
14. Czekaj P, Lópes F, Güell C. Membrane fouling during microfiltration of fermented beverages. *J Memb Sci* 2000; 166: 199-212.
15. Oliveira RC and Barros ST. Beer clarification with polysulfone membrane and study on fouling mechanism. *Braz Arch Boil Technol* 2011; 54(6): 1335-1342.
16. Semenova S.I, Ohya H, Soontarapa K. Hydrophilic membranes for pervaporation, an analytical review. *Desalination* 1997; 110(3): 251-286.
17. Kuiper S, Rijn CV, Nijdam W, Raspe O, Wolferen HV, Krijnen G, et al. Filtration of lager beer with microsieves: flux, permeate haze and in-line microscope observations. *J Memb Sci* 2002; 196: 159-170.
18. Barros ST, Andrade CMG, Mendes ES, Peres L. Study of fouling mechanism in pineapple juice clarification by ultrafiltration. *J Memb Sci* 2003; 215: 213-224.
19. Stopka J, Schlosser Š, Dömény Z, Šmogrovičov D. Flux decline in microfiltration of beer and related solutions of model foulants through ceramic membranes. *J Environ Sci* 2000; 9(1): 65-69.
20. Fane AG, Kim KJ, Hodgson PH, Leslie G, Fell CJD, Franklin ACM, et al. Strategies to minimise fouling in the membrane processing of biofluids. *Proc Bioproc* 1992; 17(21): 304-320.
21. Taylor M, Faraday DBF, O'Shaughnessy C.L, Underwood B.O and Reed R.J.R. Quantitative determination of fouling layer composition in microfiltration of beer. *J Sep Purif Rev* 2001; 22-23: 133-142.
22. Gan Q. Beer clarification by cross-flow microfiltration – effect of surface hydrodynamics and reversed membrane morphology; School of Chemical Engineering, The Queen's University of Belfast, Daid Keir Building, Stranmillis Road, Belfast BT9 5AG, UK. *Chemical Engineering and Processing* 2001; 40: 413-419.
23. Hammond J, Brennan M, Price A. The control of microbial spoilage of beer. *J inst brew* 1999; 105(2):113-120.
24. Thomassen JK, Faraday DBF, Underwood BO, Cleaver JAS. The effect of varying transmembrane pressure and crossflow velocity on the microfiltration fouling of a model beer. *Sep Purif Rev* 2005; 41:91-100.
25. Gan Q, Howell JA, Field RW, England R, Bird MR, Mc Kechinie MT. Synergetic cleaning procedure for a ceramic membrane fouled by beer microfiltration. *J Memb Sci* 1999; 155:277-289.

## Application of membrane filtration in beer industry

*Peivasteh Roudsari L<sup>1</sup>, Haratian P<sup>2</sup>, Sohrabvandi S<sup>\*3</sup>, Lalegani S<sup>1</sup>, Boustanti A<sup>1</sup>*

1. *Students' Research Committee, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.*
2. *Lecturer , Dep. of Food Science and Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences, Food Science and Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran*
3. *\*Corresponding Author: Assistant Prof, Dept. of Food Technology Research, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences, Food Science and Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. E-mail: sohrabv@sbmu.ac.ir*

### Abstract

Beer is the second most consumed beverage in the world behind tea, and it continues to be a popular drink. One of the important reasons is that beer is a drink with a pleasant flavor, an attractive color and clarity. To attain these characteristics, Membrane separation technology has become widely used in the food processing industry. The final filtration has, therefore, to achieve a balance between allowing the passage of dissolved macromolecules that give the beer its flavor and functional properties while removing particles, such as yeast cells and turbidity colloids and reducing the components that result in turbidity of the bottled beer. Moreover the potential of cross-flow microfiltration as a separation method for brewing is a subject of intensive study. Clarification of rough beer (RB) and pasteurization of clarified beer (CB) by cross-flow microfiltration (CFMF) stand as potential applications of membranes in the food industry. An important limitation in the performance of membrane processes is fouling mechanism and the general effect of these phenomena, known as concentration polarization that in this study is described briefly. Also, the effect of important parameters on filtration such as temperature, pressure, type of membrane, pore size and the use of stamped membrane are studied.

**Keywords:** Flux, Fouling, Membrane, Microfiltration