



شرکت مهندسین آب، فاضلاب و کوار

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



1265P-NWWCE

فرایند شیرین سازی آب دریا؛ روش‌ها، مزایا و چالش‌ها بر پایه قاره‌های مختلف

علی کمالی^۱، محمدحسین صراف زاده^۲، محمدرضا بیت‌الله پور^۱، نازگل رزاقی کاشانی^۱،
حمیدرضا رشیدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش محیط زیست، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده

مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس

دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- پژوهشگر پسادکتر مهندسی محیط زیست، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی

شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

sarrafzdh@ut.ac.ir

خلاصه

با افزایش میانگین دمای کره‌ی زمین و بوجود آمدن تغییر اقلیم و همچنین مصرف بی‌رویه‌ی آب‌های زیرزمینی، جوامع امروزی با خطری بسیار اساسی و مهم به نام کمبود آب مواجه شده‌اند. با این نوع مصرف و بدون دوراندیشی شاید دور از ذهن نخواهد بود که در آینده‌ای نه چندان دور شاهد اختلافات اجتماعی بر سر منابع آبی باشیم. راهکارهای بسیاری برای مقابله با این مشکل ارائه شده‌اند که شیرین سازی آب دریا به دلیل وجود مقادیر بسیار زیاد آب شور در سطح جهان به عنوان یکی از راه‌حل‌های مقابله با بحران آب معرفی شده است. در این مقاله ابتدا به بررسی روش‌های مهم و پرکاربرد در سطح جهان پرداخته و سپس با متمرکز شدن بر قاره‌ی آسیا و آمریکا به فعالیت‌های انجام گرفته در این دو قاره پرداخته شده است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که امتیازات بومی هر منطقه از نظر دسترسی به منابع انرژی مختلف نقش تعیین‌کننده‌ای در رواج فناوری و فرایندهای مختلف شیرین سازی آب در آن منطقه داشته است.

کلمات کلیدی: شیرین سازی آب دریا، بحران آب، منابع انرژی، آسیا، آمریکا

۱. مقدمه

آب در تمام جنبه‌های زندگی مهم و اساسی بوده و نقش بسیار پر رنگی در بقای انسان‌ها و همچنین پیشبرد فعالیت‌های اقتصادی ایفا می‌کند [۱]. امروزه نیاز به آب شیرین به دلیل افزایش جمعیت جامعه بشری و ارتقای سطح زندگی مردم، توسعه صنایع و پیشرفت کشاورزی روز به روز در حال افزایش است. متأسفانه منابع آب شیرین طبیعی در دسترس خیلی کمتر از درخواست جامعه است و طبق پیش‌بینی سازمان ملل متحد تا پایان سال ۲۰۲۵ نزدیک به ۱.۸ میلیارد نفر از مشکل کم آبی رنج خواهند برد. این شرایط جامعه بشری را به سمت راهی برای تأمین آب شیرین مورد نیاز از راه‌های جایگزین سوق می‌دهد [۲].

دسترسی به آب شیرین تبدیل به یک مشکل بسیار مهم جهانی شده است. به طوریکه از ۲.۵۳٪ آب شیرین در دسترس تنها ۰.۳۶٪ آن به طور مستقیم در دسترس ما قرار دارند و مابقی آن به صورت کوه‌های یخی در قطب‌ها قرار دارند. کمبود آب به دلیل افزایش جمعیت به عنوان یک تهدید اساسی به حساب می‌آید و پیش‌بینی شده است که در سال‌های آینده تهیه آب شیرین به مهم‌ترین مشکل جوامع به‌خصوص مناطق خشک جهان تبدیل خواهد شد. آب و انرژی دو جز جدایی ناپذیر جوامع برای پیشبرد تمدن به حساب می‌آیند به همین جهت برای حل مشکل کم آبی راه‌های بی‌شماری از

جمله سدسازی، باروری ابرها، شیرین سازی آب دریا (نمک زدایی) و بازیابی آب مصرفی (آب خاکستری) تاکنون اتخاذ شده است ولی با توجه به اینکه تنها منبع بی پایان آب، اقیانوس ها و دریاها هستند بهترین راه توسعه و پیشرفت در زمینه تهیه منابع آب، شیرین سازی آب دریاها می باشد [۳].

۲. شیرین سازی (Desalination)

در اوایل قرن بیستم میلادی فرآیند تبخیر و میعان به عنوان یکی از اصلی ترین روش های شیرین سازی شناخته می شد. در خلال جنگ جهانی دوم به دلیل کمبود آب آشامیدنی، سرمایه گذاری بسیار زیادی برای پیشرفت تکنولوژی شیرین سازی و صنعتی سازی آن صورت گرفت به طوریکه سرانجام اولین نوع صنعتی شده و پیشرفته آن در سال ۱۹۶۰ بر مبنای روش حرارتی ابداع گردید [۶].

با توجه به اینکه سوخت مصرفی برای شیرین سازی، سوخت های فسیلی است باعث ایجاد اثرات مخرب زیست محیطی، هزینه زیاد و کاهش منابع زیرزمینی می شود که یافتن راهی برای جایگزینی سوخت شیرین سازها بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله می توان استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به عنوان اصلی ترین منبع جایگزینی معرفی کرد [۳]. فرآیند شیرین سازی، آب دریا را به دو جریان اصلی آب آشامیدنی و شورآبه (حاوی غلظت بالای نمک) تقسیم می کند. دو روش کلی شیرین سازی آب دریا روش حرارتی و روش غشایی می باشد [۳].

۳. روش های حرارتی (Thermal Process)

نحوه کار روش های حرارتی به این صورت است که ابتدا آب دریا را حرارت داده و سپس اقدام به جمع آوری میعان حاصل می کنند. این روش به سه صورت تبخیر ناگهانی چندمرحله ای (MSF)، تقطیر چندمرحله ای (MED) و تراکم بخار (VC) انجام می شود [۵]. در تبخیر ناگهانی چندمرحله ای (MSF) که یک فرآیند چندمرحله ای تبخیر آب از طریق جوشش می باشد. روش کار بدین صورت است که آب گرم شده را به مخازنی با فشار کم هدایت می کنند. وقتی آب به فضای حاوی فشار بسیار کم رسیده، به این علت که قبلاً از منبع حرارتی مقداری گرما کسب کرده است به صورت ناگهانی تبخیر می شود [۷]. سپس بخار آب شیرین، میعان شده و وارد خطوط آب آشامیدنی می شود [۶]. یکی از معایب این روش مصرف بسیار بالای انرژی هم از نوع الکتریکی و هم حرارتی در مقابل سایر روش ها است، همچنین قیمت تمام شده آب شیرین با این روش نیز تقریباً بالاست [۸]. در تقطیر چندمرحله ای (MED) با پاشیدن آب شور روی لوله هایی که بخار در آن جریان دارد، مقداری از آب شور تبدیل به بخار می شود. چون این عمل در خلاء انجام می شود، آب در دمای پایین تری به بخار تبدیل می شود و کارایی دستگاه بالا می رود. از بخار تولید شده به عنوان تأمین کننده انرژی حرارتی مرحله بعد استفاده می شود. از طرفی این بخار سرد شده و به محصول تبدیل می گردد. با افزایش مراحل می توان از مقدار بخار اولیه ثابت، محصول بیشتری به دست آورد [۲]. این روش همانند روش MSF به انرژی های حرارتی و الکتریکی نیاز دارد که البته میزان مصرف آن کمتر است. هزینه آب تولیدی نیز تقریباً بالا و در حد روش MSF است [۸]. همچنین از این روش می توان در ظرفیت های بالای تولید آب شیرین نیز استفاده کرد [۹]. تراکم بخار (VC) که یک فرآیند شامل دستگاه های ساده تبخیر است که به عنوان متراکم کننده بخار مورد استفاده قرار می گیرند. در فرآیند تراکم بخار، از انرژی مکانیکی و انرژی گرمایی به منظور متراکم ساختن بخار استفاده می شود. در این فرآیند آب شور بر روی دسته لوله تبخیرکننده قرار می گیرد که در نتیجه بخاری با همان درجه حرارت و فشار تشکیل می شود. بخار تولیدی در یک اجکتور بخار به صورت حرارتی متراکم شده و یا در یک کمپرسور به صورت مکانیکی فشرده می شود. بخار فشرده شده وارد دسته لوله های تبخیرکننده می شود، در آنجا میعان شده و به آب شیرین تبدیل می شود [۱۰]. میزان مصرف انرژی در این روش بسیار بالا است ولی به میزان فضای کمتری نسبت به روش های MSF و MED نیاز دارد [۹].

۴. روش های غشایی (Membrane Process)

روش غشایی در ابتدا تنها به مصارف شهری و ظرفیت کم به عنوان تصفیه آب استفاده می شد ولی با پیشرفت تکنولوژی از این روش به طور گسترده در صنعت آب و شیرین سازی استفاده می شود. این روش از یک غشای انتخاب پذیر استفاده می کند که باعث جدایی آب از نمک و تولید آب آشامیدنی می شود [۴]. این روش به سه دسته کلی اسمز معکوس (RO)، الکترودیالیز (ED) و تقطیر غشایی (MD) تقسیم می شود [۳]. اسمز معکوس (RO) یک فرآیند فیزیکی است و می توان از محلول به کمک یک غشا نیمه تراوا، حلال تقریباً خالص تهیه کرد. همچنین می توان از آب شور، آب آشامیدنی

مطلوب تهیه کرد. اگر یک غشای نیمه تراوا بین دو محلول با غلظت‌های متفاوت قرار گیرد، مقداری از حلال از یک طرف غشا به طرف دیگر منتقل می‌شود. جهت حرکت حلال به گونه‌ای است که محلول غلیظ‌تر را رقیق می‌نماید [۶]. این روش در مقابل سایر روش‌ها تنها نیاز به انرژی الکتریکی دارد که میزان مصرف انرژی آن بسیار کمتر است و باعث می‌شود قیمت آب آشامیدنی در مقابل سایر روش‌ها بسیار کمتر شود. یکی از معایب آن رسوب‌گیری غشاها می‌باشد که باعث عمر کوتاه آن‌ها می‌شود (۵ تا ۸ سال) [۸]. الکترودیالیز (ED) یک فرآیند بر اساس توانایی غشاها نیمه تراوا در عبور دادن بعضی از یون‌های منتخب موجود در محلول نمک‌های یونی و عبور ندادن سایر یون‌ها، می‌باشد. وقتی یک جریان مستقیم به محلول اعمال می‌شود، یون‌های مثبت نمک‌های موجود در محلول به سمت الکتروود منفی یا کاتد و یون‌های منفی به سمت الکتروود مثبت یا آند حرکت می‌کنند. یک غشای نیمه تراوای کاتیونی، به یون‌های مثبت اجازه عبور می‌دهد. فرآیند الکترودیالیز، مواد کلونیدی و غیر یونی و نیز باکتری‌ها را از آب حذف نمی‌کند [۱۱]. این روش نیاز به انرژی الکتریکی بسیار زیادی دارد و همچنین به دلیل باقی ماندن باکتری‌ها و مواد غیر یونی در آب، نیازمند یک مرحله تصفیه دیگر پیش از مصرف آشامیدنی می‌باشد [۶]. تقطیر غشایی (MD) یک فرآیند ترکیبی از روش اسمز معکوس و تقطیر است که از غشای سنتزی آب‌گریز استفاده می‌کند و اجازه می‌دهد بخار آب از روزه‌های غشا عبور کند ولی خود محلول اجازه عبور نمی‌یابد. نیروی محرکه در این روش، اختلاف فشار بخار مایع در سراسر غشاء می‌باشد [۱۲]. رسوب‌گیری غشاء یک مشکل بسیار مهم برای این روش است که در دراز مدت باعث افزایش هزینه می‌شود همچنین به دلیل هزینه بالا و ظرفیت تولیدی کم آن در مقیاس بالا استفاده نمی‌شود [۱۳].

۵. شیرین‌سازی آب دریا در جهان

با توجه به بحران آب و منابع محدود آب آشامیدنی، صنعت شیرین‌سازی در جهان به سرعت گسترش یافته تا با استفاده از آب دریاها و اقیانوس‌ها مشکل کم‌آبی برطرف گردد. ظرفیت تولیدی آب در سال ۲۰۱۰، ۶۰ میلیون مترمکعب در روز بود که این مقدار تا سال ۲۰۱۵ تقریباً دوبرابر شده است [۴]. در جدول ۱ [۱۴] ظرفیت روش‌های شیرین‌سازی آب دریا در جهان و در جدول ۲ [۶] کشورهایی که از صنعت شیرین‌سازی بیشترین استفاده را برای تأمین آب آشامیدنی می‌کنند، بیان شده است.

جدول ۱ - ظرفیت روش‌های شیرین‌سازی در جهان [۱۴]

ظرفیت (%)	روش
۵۹.۸۵	اسمز معکوس (RO)
۲۵.۹۹	تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF)
۸.۲	تقطیر چندمرحله‌ای (MED)
۳.۵۳	الکترودیالیز (ED)
۰.۷۱	هیبرید
۱.۰۲	سایر

جدول ۲ - بزرگ‌ترین کشورهای استفاده‌کننده از صنعت شیرین‌سازی [۶]

شماره	کشور	ظرفیت تولیدی (میلیون مترمکعب در روز)	سهم جهانی (%)
۱	عربستان سعودی	۹.۹	۱۶.۵
۲	آمریکا	۸.۴	۱۴
۳	امارات	۷.۵	۱۲.۵
۴	اسپانیا	۵.۳	۸.۹
۵	کویت	۲.۵	۴.۲
۶	چین	۲.۴	۴
۷	ژاپن	۱.۶	۲.۶
۸	قطر	۱.۴	۲.۴

۲۳	۱۴	الجزایر	۹
۲	۱۲	استرالیا	۱۰

۶. شیرین سازی آب دریا در آسیا

شیرین سازی آب دریا دهه هاست که پیشرفت بسیار زیادی در مناطق خشک جهان مانند دریای مدیترانه ، خاورمیانه و دریای کارائیب بوجود آورده است . قسمت عمده واحدهای تولید کننده آب آشامیدنی در منطقه خاورمیانه واقع شده است به طوریکه نزدیک به ۶۵٪ تولید آب جهان در حاشیه کشورهای خلیج فارس اتفاق می افتد. عربستان سعودی ، امارات ، کویت ، قطر و ایران از بزرگترین کشورهای تولید کننده آب آشامیدنی در حاشیه ی خلیج فارس می باشند [۴].

۱) عربستان سعودی

عربستان به عنوان بزرگترین تولید کننده آب شیرین در جهان به شمار می رود که ۱۸٪ تولید آب شیرین جهان به آن تعلق دارد. نزدیک به ۵۰٪ آب مورد نیاز این کشور از طریق واحدهای شیرین سازی تأمین می شود [۱۵]. "الجوبیل" به عنوان بزرگترین واحد شیرین سازی آب در جهان با ظرفیت یک میلیون مترمکعب در روز در عربستان قرار دارد که با روش MSF کار می کند. عربستان برنامه ریزی کرده است با توجه به رشد جمعیت و نیاز روز افزون به آب شیرین تا ۲۰ سال آینده ۶ میلیون مترمکعب در روز به تولیدات آب شیرین خود اضافه کند [۸]. عمده روش های مورد استفاده در عربستان MSF و RO می باشند که روش MSF با در اختیار داشتن ۶۴.۲٪ در تولیدات آب شیرین نقش عمده ای را ایفا می کند. با توجه به آلاینده های زیست محیطی که واحدهای شیرین سازی با مصرف نفت و گاز تولید می کنند کشور عربستان در صدد جایگزینی انرژی مصرفی از طریق انرژی خورشیدی و انرژی هسته ای در ۱۰ سال آینده است [۸]. در سال ۲۰۱۰ عربستان سعودی "شهر پادشاه عبدالله" را برای توسعه انرژی های تجدیدپذیر تأسیس کرد و بیان داشت با استفاده از این انرژی های تجدیدپذیر و ترکیب آن ها امکان تولید ۵۰ درصد انرژی مورد نیاز واحدهای شیرین سازی که معادل ۱۸ گیگاوات است تا سال ۲۰۳۲ تأمین کند. همچنین واحد "الخفج" به عنوان اولین واحدی است که بر اساس "طرح پادشاه عبدالله برای شیرین سازی خورشیدی" در دست ساخت و ساز می باشد [۱۶].

۲) امارات متحده عربی

اولین واحد شیرین سازی در سال ۱۹۷۶ در "ابوظبی" با ظرفیت ۲۵۰ مترمکعب در روز تأسیس شد. به دلیل بحث های توریستی ، تراکم جمعیت و نیاز روز افزون به آب آشامیدنی ، عمده واحدهای شیرین سازی در شهرهای ابوظبی ، دوی و شارجه احداث شده اند به طوریکه نزدیک به ۹۹ درصد آب آشامیدنی شهرهای ابوظبی و دوی از طریق شیرین سازی تولید می گردد [۱۷]. به دلیل انرژی ارزان در دسترس ، ظرفیت تولید بالا و غلظت بالای آب خلیج فارس ، روش MSF یکی از مورد قبول ترین روش های شیرین سازی آب در امارات متحده عربی می باشد به طوریکه سهم آن ۶۳٪ از تولیدات آب شیرین می باشد. با پیشرفت تکنولوژی امروزه به روش RO توجه بیشتری می شود و پیش بینی شده است که در سال های آینده نقش بسیار بیشتری را در این کشور داشته باشد [۸]. به طور مثال امارات در حال افزایش ظرفیت یکی از بزرگترین واحدهای شیرین سازی خود "فوجیره ۱" به میزان ۵۹۱۰۰۰ مترمکعب در روز است که از میزان ۱۳۶۰۰۰ مترمکعب در روز سهم واحد RO و ۲۸۴۰۰۰ مترمکعب در روز سهم واحد MSF می باشد. با توجه به تولید آلاینده های زیست محیطی ، کشور امارات قصد دارد انرژی لازم برای مصرف واحدهای شیرین سازی را از طریق انرژی های تجدیدپذیر در سال های آینده تأمین کند . در سال ۲۰۰۹ کشور امارات قراردادی به ارزش ۲۰ میلیون دلار برای احداث ۴ نیروگاه هسته ای با کره امضا کرده است که قرار است تا سال ۲۰۲۰ به اتمام برسد. همچنین " پروژه مصدر" در سال ۲۰۰۶ برای تولید انرژی تجدیدپذیر در شهر ابوظبی ایجاد شده است که یکی از برنامه های آن ایجاد اولین شهر بدون آلاینده به عنوان "شهر مصدر" می باشد [۱۷].

۳) ایران

طی سالیان متمادی مردم شهرهای اطراف دریاها به خصوص خلیج فارس با مشکل آب شیرین مواجه بوده اند به همین دلیل واحدهای شیرین سازی برای رفع این مشکل احداث شده اند. به طوریکه در سال ۱۹۶۰ اولین واحد شیرین سازی بر مبنای روش MSF با ظرفیت ۱۰۰۰ مترمکعب در روز در جزیره خارک احداث شد . روش MSF در ایران به مانند سایر کشورهای حوزه خلیج فارس یکی از روش های مورد علاقه بوده است به طوریکه با پیشرفت تکنولوژی و پیدایش روش های جدید ، روش RO به عنوان جایگزینی بسیار مناسب معرفی شده است . ایران در حال حاضر از ۱۴ واحد شیرین سازی در مناطق جنوبی خود بهره می برد که برنامه ریزی کرده است این مقدار را ۳۰ واحد در سال های آینده افزایش دهد که عمده این واحد ها مبتنی بر روش RO می باشند. در جدول ۳ به این واحد ها اشاره شده است. بیشتر واحدهای شیرین سازی توسط وزارت نیرو (بخش دولتی) احداث شده اند که



شرکت مهندس آب، فاضلاب و نیرو

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



تعدادی از آن‌ها مانند فاز دوم کنارک توسط شرکت نور ویژه (بخش خصوصی) و یا واحد بندرعباس توسط شرکت سازه سازان (بخش خصوصی) احداث شده‌اند. با افزایش تولید آلاینده‌های زیست محیطی و همچنین با قرارگیری ایران در منطقه ای که در تمام روزهای سال از افتاب بهره مند است و میزان تابش سالیانه آن از میانگین جهانی بالاتر است، بهترین پتانسیل را برای استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین انرژی مورد نیاز واحدهای شیرین سازی را دارد [۳].

جدول ۳- واحدهای شیرین سازی کشور ایران [۳]

سال تأسیس	ظرفیت (مترمکعب در روز)	روش	محل
۲۰۰۰	۳۰۰۰۰	MSF	چابهار
۲۰۰۰	۲۴۰۰	MSF	بندرعباس
۲۰۰۴	۱۰۰۰۰	RO	عسلویه
۲۰۰۶	۱۵۰۰۰	MSF	کنارک (فاز ۱)
۲۰۱۰	۲۰۰۰۰	RO	کنارک (فاز ۲)
۲۰۰۶	۲۵۰۰	RO	بندرعباس
۲۰۰۷	۱۲۰۰	MED	جزیره سیری
۲۰۰۵	۴۰۰۰	MED	بندرعباس
۲۰۰۸	۵۰۰۰	RO	خوزستان
۲۰۰۹	۲۴۰۰	MED	جزیره لاوان
۲۰۰۸	۳۶۰	MED	جزیره خارک
۲۰۰۸	۱۲۰۰۰۰	MED	عسلویه
۲۰۱۱	۲۰۰۰	MED	جزیره قشم
۲۰۱۰	۲۰۰۰۰	RO	زاهدان
مجموع	۲۳۴۸۶۰		

۴) چین

کشور چین با مشکل جدی کمبود آب مواجه است به طوری که تنها نزدیک به ۶٪ منابع آب در این کشور قرار دارد با این حال مصرف آب آن تقریباً یک چهارم مصرف جهانی است. در سال ۲۰۱۴ بیش از ۴۰۰ شهر از ۵۶۱ شهر کشور چین با مشکل کم آبی مواجه بوده اند که اکثر این شهرها در نواحی شمالی آن قرار گرفته اند [۱۸]. برای مواجهه با این مشکل اولین واحد شیرین سازی با ظرفیت ۲۰۰ مترمکعب در روز در سال ۱۹۸۱ با روش ED در جزیره یانگزیینگ احداث شد [۱۹]. سرمایه گذاری روز به روز بر روی شیرین سازی افزایش یافته تا جایی که تا پایان سال ۲۰۱۳ ظرفیت تولیدی آب شیرین به ۹۰۰۰۰۰ مترمکعب در روز رسید [۱۸]. بیشتر واحدهای شیرین سازی در ۵ شهر لیونینگ، شاندانگ، هبی، تیانجین و ژجیانگ قرار گرفته است که در جدول ۴ بزرگترین واحدهای شیرین سازی در چین ذکر شده است همچنین در شکل ۳ موقعیت جغرافیایی آن‌ها نیز نشان داده شده است [۲۰].



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

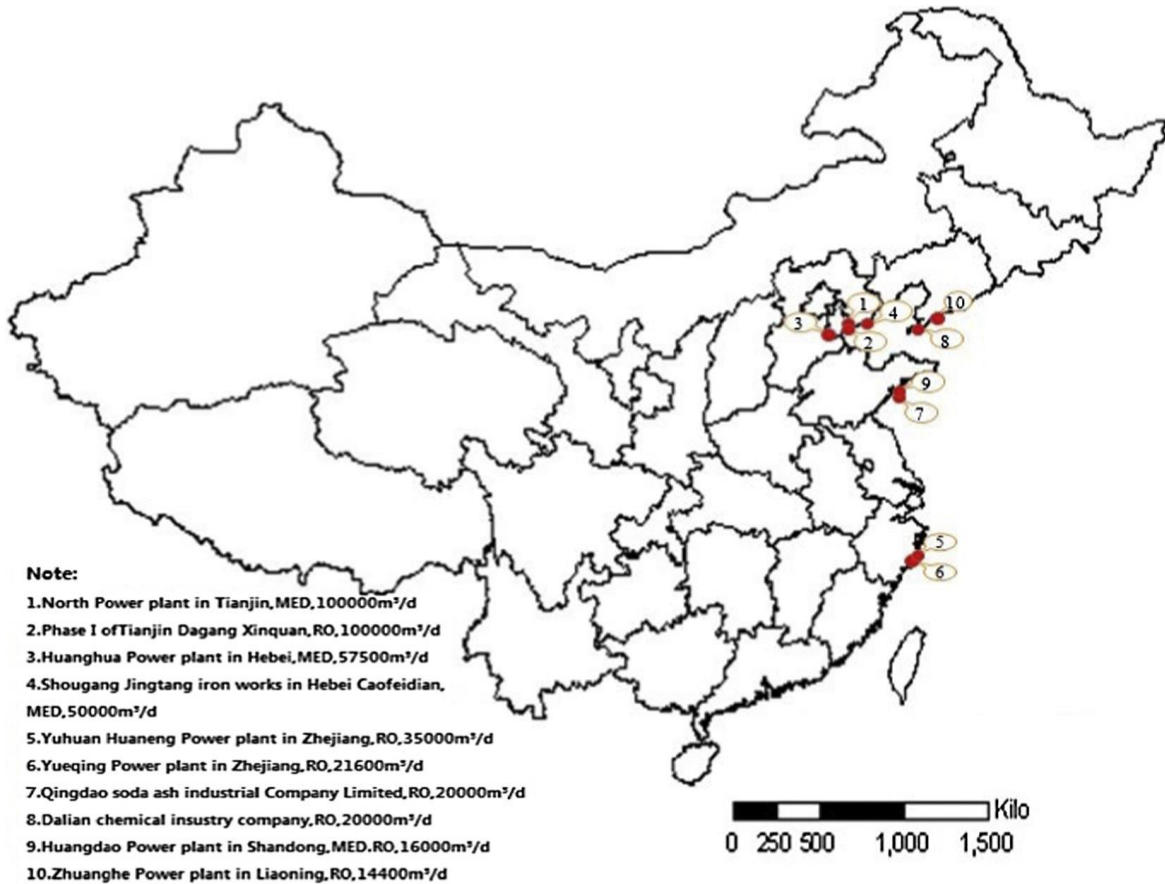
دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



جدول ۴ - بزرگترین واحدهای شیرین سازی آب در چین [۳]

سال تأسیس	ظرفیت (مترمکعب در روز)	روش	واحد
۲۰۱۰	۱۰۰۰۰۰	MED	Tianjin North Power Plant
۲۰۰۹	۱۰۰۰۰۰	RO	Phase I of Tianjin Dagang Xinquan
۲۰۰۶	۵۷۵۰۰	MED	Hebei Huanghua Power Plant
۲۰۰۹	۵۰۰۰۰	MED	Hebei Caofeidian Shougang Jingtang Iron Works
۲۰۰۶	۳۵۰۰۰	RO	Yuhuan Huaneng Power Plant in Zhejiang
۲۰۰۷	۲۱۶۰۰	RO	Yueqing Power Plant in Zhejiang
۲۰۱۰	۲۰۰۰۰	RO	Qingdao Soda Ash Industrial Company Limited
۲۰۰۹	۲۰۰۰۰	RO	Dalian Chemical Industry Company
۲۰۰۴	۱۶۰۰۰	MED, RO	Huangdao Power Plant in Shandong
۲۰۰۸	۱۴۴۰۰	RO	ZhuangHe Power Plant in Liaoning
مجموع	۴۳۴۵۰۰		



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی بزرگترین واحدهای شیرین سازی آب در چین [۲۰]

روش RO به دلیل کم بودن مصرف انرژی و همچنین قیمت پایین تمام شده آب تولیدی نسبت به سایر روش‌ها، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و پیش‌تاز در برنامه‌های توسعه سال‌های آینده در چین است. همچنین به دلیل مسائل زیست محیطی چین توجه ویژه‌ای بر روی انرژی‌های تجدیدپذیر به خصوص خورشیدی و هسته‌ای دارد [۱۹]. به دلیل اینکه روش MED با انرژی هسته‌ای بسیار عالی همگام شده است و اکثر نیروگاه‌های برق چین با انرژی هسته‌ای کار می‌کند می‌توان آینده‌ای بسیار روشنی برای این روش در چین متصور بود [۲۰].

۵) اردن

میانگین بارش در کشور اردن، سالانه حدود ۷۲۰۰ میلیون متر مکعب می‌باشد که به ترتیب تنها ۴٪ و ۱۱٪ از منابع آب زمینی و سطحی در این کشور از طریق بارش باران تأمین می‌شود. از سوی دیگر به دلیل عدم دسترسی اردن به منابع طبیعی و زلال آب، این کشور در ردیف یکی از کشورهای فقیر آبی در منطقه‌ی خاورمیانه می‌باشد، زیرا تولید آب این کشور از منابع طبیعی کمتر از ۱۰۰ مترمکعب در روز است. در سال ۱۹۹۷ مردم اردن به میزان ۸۸۲ میلیون متر مکعب آب مصرف کرده‌اند و با نرخ رشد جمعیت حاضر، حجم ذخیره‌ی آب برای هر نفر، در سال ۲۰۲۵ از ۲۰۰ به ۹۱ مترمکعب خواهد رسید [۲۱].

به طور کلی، کشور اردن برای رفع مشکل کمبود آب و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، چهار بند اصلی را در سیاست‌گذاری‌های خود قرار داده است: ۱. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به جای منابع انرژی سوخت فسیلی ۲. ساخت سد Al Wahda بر روی رودخانه Yarmouk در شمال اردن ۳. افزایش تصفیه‌ی پساب و تولید آب زلال و پاک از آن ۴. توسعه‌ی فرآیند شیرین‌سازی آب‌های دریا و ساخت واحدهای جدید، مطابق با فناوری روز [۲۱]. در جدول ۵ تعدادی از این واحدها ذکر شده‌اند. همان‌طور که در جدول مشخص است، تکنولوژی شیرین‌سازی از سال ۱۹۷۹ در این کشور به کار گرفته شده است و از همان سال‌ها نیز روش RO مورد توجه بوده است. هم‌چنین حجم کل آب تصفیه شده در سال ۲۰۰۱ معادل ۱۱۱۶۸ مترمکعب در روز می‌باشد که رقم قابل توجهی می‌باشد. از طرفی طبق برنامه‌ی ۱۴ ساله‌ی این کشور برای بحث بهبود صنعت آب، مبلغ ۵ میلیون دلار سرمایه‌گذاری نیز شده است [۲۱].

جدول ۵ - واحدهای شیرین سازی کشور اردن [۲۱]

واحد	روش	ظرفیت تولیدی (مترمکعب در روز)	تأسیس
Amman	RO	۳۶۰	۱۹۷۹
Akman	RO	۳۰۲۸	۱۹۸۱
Ibrid	RO	۵۴۵	۱۹۸۲
Azraq	RO	۶۰۰	۱۹۸۷
Hisban	RO	۴	۲۰۰۱
مجموع		۴۵۳۷	

۶) قطر

به دلیل منابع بسیار کم آب طبیعی، صنعت آب قطر به طور کامل وابسته به شیرین سازی آب دریا می باشد. افزایش جمعیت و سطح زندگی مردم باعث افزایش میزان تولید آب از ۱۷۳ میلیون متر مکعب در سال به ۳۷۳ میلیون متر مکعب در سال شده است که این مقدار تقریباً طی شش سال دو برابر شده است. روش اصلی مورد استفاده در قطر روش MSF می باشد که به دلیل مصرف زیاد انرژی و هزینه بالای آب تولید شده به روش RO روی آورده است که طی پروژه پیرل در حال آماده سازی آن می باشد [۲۲]. قطر بیشترین میزان تولید آلاینده در بین کشورهای همسایه دارد به همین دلیل جایگزینی سوخت های فسیلی با انرژی های تجدیدپذیر به شدت در حال بررسی است. انرژی خورشیدی و بادی بالاترین پتانسیل را برای تأمین انرژی لازم فرآیند شیرین سازی را در قطر دارند [۲۳].

۷) کویت

اولین واحد شیرین سازی در سال ۱۹۵۳ با روش MED و با ظرفیت ۹۲۰۰ مترمکعب در روز افتتاح شد. بعد از معرفی روش MSF در دهه ۷۰ میلادی و موفقیت آن کلیه واحدهای شیرین سازی احداث شده در کویت بر مبنای این روش پایه گذاری شده است. پیش بینی می شود تا ۳۰ سال آینده روش MSF نقش اساسی در کویت ایفا کند ولی با توجه به آلاینده های زیست محیطی و همچنین مصرف بالای انرژی اقدام به رو آوردن به روش RO کرده است که در سال ۲۰۱۰ واحد شوویخ با ظرفیت ۱۳۶۰۰۰ مترمکعب در روز با این روش احداث گردیده است [۸].

۷. شیرین سازی آب دریا در آمریکا

نزدیک به ۱۴ درصد از واحدهای شیرین سازی در سطح جهان در آمریکا قرار دارند که این مقدار برابر ۲۰۰۰ واحد شیرین سازی می باشد. به گزارش موسسه بین المللی شیرین سازی آب، ۵۰ تا ۷۵ درصد واحدهای شیرین سازی در آمریکا با میانگین ظرفیت یک میلیون گالن در روز تأسیس می شوند. در قسمت عمده ای از این واحدها از فرآیند اسمز معکوس یا نانو فیلتراسیون و در موارد معدودی مانند واحدهای صنعتی کوچک یا هتل ها از تراکم بخار استفاده می شود. تاریخچه شیرین سازی آب در آمریکا بسیار قدیمی است، به عنوان مثال در سال های ۱۹۶۰ در Key West واحد شیرین سازی با تکنولوژی MSF احداث شده است که بعداً در سال ۱۹۸۰ به روش اسمز معکوس تغییر یافته است. همچنین اولین واحد شیرین سازی در آمریکا در سال ۱۸۶۱ تأسیس شده است و تا سال ۱۹۰۰ در حال بهره برداری بوده است و قادر بوده آب قسمت های جنوبی ایالت فلوریدا را تأمین کند. همچنین جزایر ویرجین ۵۰ سال است که از روش شیرین سازی آب استفاده می کنند [۲۴].

مشکل عمده شیرین سازی آب به روش گرمایی در ایالت هایی مانند تگزاس یا ایالت های جنوبی آمریکا این است که با وجود داشتن منابع فراوان سوخت های فسیلی، فرآیند همچنان گران است و برای آن که اقتصادی شود فرآیند شیرین سازی آب با فرآیند های شیمیایی یا نفتی که گرمای زیادی تولید می کنند و یا واحدهای تولید قدرت یا انرژی کوپل می شوند و انرژی لازم برای شیرین سازی آب از این طریق تأمین می گردد. فرآیند اسمز معکوس می تواند در کنار فرآیند های تولید همزمان قدرت و انرژی به کار رود تا فرآیند ها هر چه بیشتر اقتصادی شوند. سیستم غشایی دوتایی با ترکیب کردن سیستم فشار پایین-شار بالا می تواند سیستمی ایجاد کند که آب را بسیار خالص و کاملاً قابل شرب کند. این روش هم اکنون در آمریکا بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین نوعی از فرآیند هیبرید وجود دارد که در آن از نانو فیلترها برای تصفیه اولیه آب در فرآیند های گرمایی

شیرین سازی استفاده می شود که این امر باعث کاهش چشمگیری در دمای مورد نیاز در فرآیند های گرمایی شیرین سازی می شود که خود باعث کاهش مصرف انرژی خواهد شد [۲۴].

بیشتر واحدهای شیرین سازی در آمریکا برای شیرین سازی آب های بسیار شور زیرزمینی، آب ها و فاضلاب های شهری برای استفاده در مصارف صنعتی است. تقریباً تمام واحدهای شیرین سازی در آمریکا بر اساس فرآیند های غشایی کار می کنند و سرآمد آنها فرآیند اسمز معکوس (RO) است که تعدادی از آن ها در جدول ۶ آورده شده اند [۲۵]. تعداد بسیار زیادی از واحدهای شیرین سازی در کشور آمریکا در مناطق ساحلی هم در شرق و هم در غرب آمریکا متمرکز هستند. دلیل این موضوع می تواند برای هر ایالتی به صورت جداگانه توجیه شود. برای ایالتی مانند ایالت کالیفرنیا به علت خشکسالی پیشرونده ای که در سال های اخیر در این ایالت رخ داده است و همچنین به علت کشاورزی گسترده ای که در این ایالت وجود دارد نیاز به آب شیرین بسیار حیاتی و ملموس است. برای ایالتی مثل فلوریدا در ابتدا به نظر می رسد به علت دارا بودن آب و هوای استوایی نیازی به واحدهای شیرین سازی ندارد اما باید در نظر گرفت که جمعیت بسیار زیادی در این ایالت و ایالت های همسایه آن ساکن هستند و همچنین این ایالت از افزایش روز افزون جمعیت که یک روند افزایشی در جهان است، مستثنا نیست. همچنین به دلیل این که ایالت های شمالی ایالت فلوریدا دسترسی به اقیانوس ندارند، آب در ایالت فلوریدا شیرین سازی شده و به ایالت های شمالی منتقل می شود. همچنین جمع آوری آب باران به عنوان یک منبع طبیعی آب شیرین نیاز به سرمایه گذاری و ساخت زیرساخت های فراوان برای جمع آوری آب های سطحی دارد که به سهولت امکان پذیر نیست [۲۵ و ۲۶].

جدول ۶ - تعدادی از واحدهای شیرین سازی کشور آمریکا [۲۴]

واحد	ظرفیت (مترمکعب در روز)	سال تأسیس
نگراس	۳۴۰۶۵۰	۲۰۰۶
کالیفرنیا	۲۶۵۰۰۰	۲۰۰۷
کالیفرنیا	۲۶۴۹۵۰	۲۰۰۶
نگراس	۹۴۶۲۵	۲۰۰۷
فلوریدا	۹۴۶۲۵	۲۰۰۷
مجموع	۱۰۵۹۸۵۰	

شیرین سازی آب نه تنها در کشور آمریکا ادامه پیدا می کند بلکه به عنوان یک صنعت مهم هم تلقی خواهد شد و مردم هم به زودی از این تکنولوژی از طریق رسانه های جمعی آگاهی بیشتری کسب می کنند... یکی از بزرگترین واحدهای شیرین سازی آب در ترینیداد در قاره آمریکا تأسیس شده است در حالی که برخی فکر می کنند استفاده از آب شیرین موجود به صورت طبیعی بهتر است اما باید به این نکته توجه داشت که هزینه بالا تأسیسات برای انتقال آب و خشکسالی روز افزون اهمیت وجود واحدهای شیرین سازی آب را آشکار می کند. در کشور آمریکا ایالت های پر آب مرکزی آب را برای ایالت های خشک تا نیمه خشک در جنوب غربی تأمین می کنند که به علت هزینه بالا تأسیسات برای انتقال آب، این راه اقتصادی به نظر نمی رسد و این موضوع خود نیز لزوم استفاده از تکنولوژی هایی برای شیرین سازی آب را آشکار می کند. همچنین مشکلات سیاسی می تواند لزوم استفاده از تکنولوژی هایی برای شیرین سازی آب و تأمین آب هر کشوری از طریق منابع همان کشور را نشان دهد به طور مثال کشور آمریکا واحد شیرین سازی آبی را در خلیج گوانتانامو تأسیس نمود اما کشور کوبا از جاری شدن آب برای این فرآیند ممانعت کرد. یا در مثالی دیگر تأسیس واحدی در خلیج تمپا با تولید ۲۵ میلیون گالن در روز با انتقاد های فراوانی رو به رو شد مبنی بر این که این واحد نباید در یک خلیج بلکه باید در آب های آزاد تأسیس گردد. در سال های پیش شیرین سازی آب به عنوان یک صنعت پر هزینه و غیر اقتصادی در نظر گرفته می شد که با گرفتن وام هایی با اقساط ۵ ساله مثل تمام صنایع دیگر قابل تأسیس بود اما در حال حاضر و با پیشرفت تکنولوژی این صنعت به عنوان یک صنعت با توجه اقتصادی بالا در نظر گرفته می شود و سرمایه گذاران در سهام های آن در بازارهای جهانی سرمایه گذاری می کنند. همچنان که جمعیت در آمریکا در حال رشد و در حال مهاجرت به مناطق ساحلی است صنعت شیرین سازی آب هم در حال پیشرفت خواهد بود [۲۴].

**۸. نتیجه گیری**

آب و انرژی به عنوان دو قطب مهم زندگی پایدار هستند. برای مقابله با بحران آب، شیرین سازی آب دریا منبعی از آب آشامیدنی را فراهم می سازد. عمده واحدهای شیرین سازی در مناطقی که با مشکل کمبود آب دست و پنجه نرم می کنند، قرار دارند. این واحدها اکثراً با سوخت های فسیلی کار می کنند. مقایسه ی روش های بکار گرفته شده برای شیرین سازی آب، در کشورهای مختلف آسیایی و آمریکا حاکی از آن است که به دلیل برخورداری بودن کشورهای حوزه خلیج فارس از منابع غنی نفت و گاز، دغدغه ی تصفیه با خلوص بالا و تهیه آب با کیفیت، از اهمیت بسیار بالاتری نسبت به انرژی برخوردار است. چرا که در بسیاری از موارد، روش MSF به دلیل قابل اعتماد بودن، نیاز کمتر به مراحل پیش تصفیه و تولید آب با خلوص بالا، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی واحدهای شیرین سازی در حاشیه ی خلیج فارس، به دلیل دارا بودن مقادیر زیادی نمک، نیازمند تکنولوژی قوی برای تصفیه همانند MSF می باشند. اما این مسئله در دریای چین واقع در اقیانوس آرام و همچنین همسایگی آمریکا با اقیانوس های آرام و اطلس کاملاً برعکس است. در این مناطق به دلیل غلظت کمتر نمک نسبت به خلیج فارس، عدم نیاز به تصفیه کامل و همچنین کاهش هزینه های آب تولیدی از روش RO استفاده می شود. با این حال تحقیقات و پیشرفت های اخیر استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در شیرین سازی به عنوان روشی موثر و کارآمد معرفی کرده است. به طوریکه می توان همزمان بحران آب و همچنین تولید آلاینده های زیست محیطی را کاهش داد و این تکنولوژی را دوست دار محیط زیست قرار داد.

۹. مراجع

- [1] M. a. Dawoud, "Water import and transfer versus desalination in arid regions: GCC countries case study," *Desalin. Water Treat.*, vol. 28, no. 1–3, pp. 153–163, 2011.
- [2] H. Sharon and K. S. Reddy, "A review of solar energy driven desalination technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1080–1118, 2015.
- [3] S. Gorjian and B. Ghobadian, "Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 571–584, 2015.
- [4] M. Shatat, M. Worall, and S. Riffat, "Opportunities for solar water desalination worldwide: Review," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 9, pp. 67–80, 2013.
- [5] J. Kucera, "Introduction to Desalination," *Desalin. Water from Water*, pp. 1–37, 2014.
- [6] M. Nair and D. Kumar, "Water desalination and challenges: The Middle East perspective: a review," *Desalin. Water Treat.*, vol. 51, no. 10–12, pp. 2030–2040, 2013.
- [7] D. S. Likhachev and F.-C. Li, "Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives," *Desalin. Water Treat.*, vol. 51, no. 13–15, pp. 2836–2849, 2013.
- [8] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, and A. Khaled, "Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies," *Desalination*, vol. 266, no. 1–3, pp. 263–273, 2011.
- [9] Y. Ghalavand, M. S. Hatamipour, and A. Rahimi, "A review on energy consumption of desalination processes," *Desalin. Water Treat.*, vol. 54, no. 6, pp. 1526–1541, 2015.
- [10] C. M and A. Yadav, "Water desalination system using solar heat: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 1308–1330, 2017.
- [11] C. Li, Y. Goswami, and E. Stefanakos, "Solar assisted sea water desalination: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 136–163, 2013.
- [12] N. Ghaffour, J. Bundschuh, H. Mahmoudi, and M. F. A. Goosen, "Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems," *Desalination*, vol. 356, pp. 94–114, 2015.
- [13] Q. Wang, N. Li, B. Bolto, M. Hoang, and Z. Xie, "Desalination by pervaporation: A review," *Desalination*, vol. 387, pp. 46–60, 2016.
- [14] N. F. Attia *et al.*, "The integration of desalination plants and mineral production The integration of desalination plants and mineral production," vol. 3994, no. February, 2016.
- [15] O. K. M. Ouda, "Domestic water demand in Saudi Arabia: assessment of desalinated water as strategic supply source," *Desalin. Water Treat.*, no. December, pp. 37–41, 2014.



شرکت مهندسی آب، فاضلاب و نیرو

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



- [16] N. Y. Mansouri and A. F. Ghoniem, "Does nuclear desalination make sense for Saudi Arabia?," *Desalination*, 2016.
- [17] M. S. Mohsen, B. Akash, A. A. Abdo, and O. Akash, "Energy Options for Water Desalination in UAE," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 83, pp. 894–901, 2016.
- [18] Q. Zou and X. Liu, "Economic effects analysis of seawater desalination in China with input-output technology," *Desalination*, vol. 380, pp. 18–28, 2016.
- [19] S. Liu and K. M. Persson, "Review and prospects of desalination as a water supply method in China," *Desalin. Water Treat.*, vol. 51, no. 22–24, pp. 4291–4301, 2013.
- [20] X. Zheng, D. Chen, Q. Wang, and Z. Zhang, "Seawater desalination in China: Retrospect and prospect," *Chem. Eng. J.*, vol. 242, pp. 404–413, 2014.
- [21] M. S. Mohsen, "Water strategies and potential of desalination in Jordan," vol. 203, no. May 2006, pp. 27–46, 2007.
- [22] M. Darwish, "Qatar water problem and solar desalination," *Desalin. Water Treat.*, vol. 52, no. 7–9, pp. 1250–1262, 2014.
- [23] M. Darwish, R. Mohtar, Y. Elgendy, and M. Chmeissani, "Desalting seawater in Qatar by renewable energy: a feasibility study," *Desalin. Water Treat.*, vol. 47, no. 1–3, pp. 279–294, 2012.
- [24] DESALINATION IN AMERICA, JOHN B. TONNER, WATER CONSULTANTS INTERNATIONAL, OCT 22, 2002
- [25] Matthew Barker, Industry Analyst, Environment Group, Desalination in the United States, 28 Jul 2003.
- [26] Rijsberman, Frank R. "Water scarcity: fact or fiction?." *Agricultural water management* 80.1(2006): 5-22.