کاربرد شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی (CExD) در فرآیند تولید تخته فیبر چگالی متوسط در ایران

حامد کوچکی پنچاه[۱]، محمد شریفی[۲*]، حسین موسی زاده[۳]، حمید زارع حسین آبادی[٤]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲، ۳- استادیاران، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

٤- استادیار، دانشکده منابع طبیعی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: m.sharifi@ut.ac.ir

چکیده

افزایش روز افزون تقاضا برای اوراق فشرده چوبی بخصوص تخته فیبر چگالی متوسط (MDF)، منجر به روند صعودی تولید این فرآورده در کشور شده است. این حجم تولید نیازمند مصرف نهاده‌های غیر انرژی و انرژی می باشد. مطالعه حاضر با فراهم آوردن داده‌های سیاهه چرخه زندگی فرآیند تولید MDF، به تجزیه و تحلیل زیست محیطی از جریان تولید این فرآورده با استفاده از روش تقاضای اکسرژی تجمعی (CExD) می پردازد. میزان این شاخص برای تولید یک مترمکعب MDF در ایران ۲۹۰۰۰ مگاژول معادل به دست آمد. در بین گروه های اثر شاخص CExD، گروه های اثر منابع تجدیدپذیر-آبی و منابع غیرتجدیدپذیر-فسیلی به ترتیب با ۲۰۳۱٦ و ۷۹۱۵ مگاژول معادل بیشترین سهم را به خود اختصاص دادند. همچنین رزین اوره فرمالدئید (۷۹٪) و الکتریسیته (۱٦/۸٪) از جمله مهمترین ورودی‌های تأثیرگذار شناخته شدند.

واژه‌های کلیدی: تخته فیبر چگالی متوسط، تقاضای اکسرژی تجمعی، انرژی مصرفی، سیاهه چرخه زندگی

مقدمه

با توجه به سهم قابل توجه مصرف انرژی در صنایع ساخت اوراق فشرده چوبی در ایران، مدیریت تقاضای انرژی در این بخش بسیار مهم است، چرا که کاهش مصرف انرژی به منزله کاهش اثرات زیست محیطی خواهد بود (بی نام، ۱۳۹۱). یکی از مهمترین مولفه های مورد نیاز برای صنعت، انرژی است که روند تقاضا برای آن در کشور های مختلف و از جمله کشور ما با سرعت چشمگیری در حال افزایش می باشد. از مهمترین اهداف استراتژیک بخش انرژی هر سازمان مصرف انرژی به شکل بهینه و مناسب است. با توجه به آمارهای موجود شدت انرژی کشورمان چندین برابر کشورهای صنعتی است که این امر موجب نگرانی‌های فراوانی طی دهه اخیر شده است به گونه‌ایی که با ادامه این روند در ۲۰ سال آینده مقدار تولید

جوابگوی مصرف داخلی نبوده؛ لذا یا بایستی بر میزان تولید اضافه گردد و یا ناچار به واردات آن خواهیم بود (صفاری نیا، ۱۳۸۹). سهم تولید جهانی فرآورده تخته فیبر چگالی متوسط (MDF) در سال ۲۰۱۳، ۸۲۲۸۸۳۰٤ مترمکعب می باشد. به گزارش انجمن صنفی کارفرمایان صنایع چوب ایران (AIWIE, 2014) کل کارخانه‌های فعال تولید صفحات فشرده چوبی در ایران ۲۷ عدد می باشد که سهم واحدهای تولید تخته فیبر چگالی متوسط ۵ کارخانه با تولید ۳۵۹۰۰۰ مترمکعب تخته در سال مذکور می‌باشد. این فرآورده دارای اهمیت اقتصادی بالا، درصد تولید نسبتاً زیاد (۱۸٪) و رشد تولید فزاینده‌ای در سال‌های اخیر بوده است (۰/٤٤ درصد تولید جهانی). بنابر دلایل مذکور فرآورده یاد شده مستعد بررسی در این تحقیق شناخته شد. شایان ذکر است میزان واردات برای MDF در سال ۲۰۱۳ برای ایران ۱۰۷۸۰۰۰ مترمکعب بوده است (FAO, 2014) ، که حاکی از رشد محتمل تولید در سال‌های آتی خواهد بود. توجه به مسائل زیست محیطی به طور روزافزونی در جوامع پیشرفته و حتی جوامع در حال توسعه بیشتر و بیشتر می‌شود. در دهه‌های اخیر این توجهات معطوف بر کاهش آلاینده‌های آب، خاک و هوا بوده که در نتیجه صنایع تولید صفحات فشرده چوبی بر سامانه‌های کاهش آلاینده‌های انتشاریافته از خشک‌کن‌ها و بویلرها و ایجاد سامانه‌های کاهش فرمالدئید متمرکز شدند (Kouchaki-Penchah et al., 2015). اما توجهات جدید به مسائل زیست محیطی بسیار گسترده‌تر و پیچیده‌تر هستند. از جمله مدیریت پایدار منابع که شامل استفاده حداقل از منابع، استفاده از مواد بازیافتی، ضایعات و محافظت از محیط زیست می‌شود. در واقع کاهش مصرف انرژی، استفاده از انرژی حاصل از منابع تجدید پذیر، استفاده بهینه از مواد، استفاده مجدد و بازیافت مواد و کنترل آلاینده‌ها از جمله مواردی هستند که به پایداری یک صنعت کمک می‌کنند (Frühwald and Ökologische, 1999).

مطالعه حاضر، ترکیبی از سیاهه‌ی چرخه زندگی تولید MDF با مفهوم اکسرژی می باشد که به بررسی انرژی مصرفی، میزان انتشار آلایندگی و فرصت های کاهش آلایندگی از دیدگاه شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی (CExD) (Bösch et al., 2007) در تولید این فرآورده می پردازد. اکسرژی را می توان به عنوان معیاری از انرژی مفید در نظر گرفت؛ در حالی که انرژی، حرکت و یا توانایی تولید حرکت است، به عبارت دیگر اکسرژی کار (= دستور حرکت) و یا توانایی تولید کار است. شاخص CExD به عنوان مجموع اکسرژی تمامی منابع مورد نیاز جهت تولید یک محصول و یا فراهم آوردن یک خدمت بیان می شود. شاخص CExD مشابه شاخص رایج تر یعنی تقاضای انرژی تجمعی (CED) می باشد. با این تفاوت که CExD، کیفیت منابع انرژی و همچنین منابع غیر انرژی مانند مواد معدنی و فلزات را نیز محاسبه می کند (Bösch et al., 2007).

در مطالعه‌ی مقایسه‌ای بر روی دو خط یک کارخانه سیمان در اسپانیا با استفاده از شاخص CExD، مشخص شد که خط جدید ۱۳ درصد کاهش در شاخص مذکور را باعث شده است، که به معنی ۱۳ درصد صرفه جویی در منابع می باشد (Valderrama et al., 2012). همچنین در پژوهش دیگری که جهت مقایسه و بررسی تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر صورت پذیرفت، شاخص CExD به عنوان یک ابزار تصمیم گیری برای سناریوهای مختلف جایگزینی تولید الکتریسیته مورد استفاده قرار گرفت (Rodríguez et al., 2011). از اینرو محاسبه شاخص حاضر برای کارخانه MDF و همچنین مقایسه آن با خطوط دیگر در مطالعات بعدی بسیار حائز اهمیت خواهد بود

مواد و روش‌ها

سه کارخانه تولید کننده MDF در دو استان شمالی کشور مورد بررسی قرار گرفتند و تفاوت ناچیزی در جریان کلی فرآیند تولید یافت شد. لذا، یک کارخانه به عنوان نماینده ای از کارخانه های MDF کشور با حجم تولید سالانه ٦٧,٢٨٠ مترمکعب تخته جهت مطالعه انتخاب شد.

فرآیند تولید تخته فیبر چگالی متوسط

برای تهیه تخته فیبر با چگالی متوسط بر خلاف تخته فیبر سخت از چوب آلات هیزمی استفاده نمی‌شود و بیشتر از مقطوعات باغی و جنگلی به شکل تنه‌های کم قطر و سرشاخه‌های قطور استفاده می‌شود. نمودار فرآیند تولید **MDF** مطابق شکل ۱ می باشد. چوب آلات ورودی به صورت جداگانه به خردکن انتقال داده می‌شوند و سپس درجه بندی می‌گردند. چیپس‌ها به واحد شست‌وشو منتقل می شوند و پس از آن به مخزن پیش بخاردهی رفته و در مجاورت آب داغ با دمای حدود ۷۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. پس از آن در دیگ پخت تحت فشار و دمای بالا پخته شده و به دفیبراتور می‌روند. در این مرحله الیاف از هم جدا و رشته رشته می‌شوند. الیاف آماده شده پس از اضافه کردن چسب وارد خشک کن می شوند. بعد از رسیدن رطوبت الیاف به حدود ۱۳ تا ١٤ درصد، الیاف خشک شده به واحد تشکیل کیک انتقال می‌یابد. پس از طی این مراحل کیک تشکیل شده و وارد مرحله پیش پرس می شود و ضخامت کیک به نصف کاهش می یابد.

شکل ۱– فرآیند تولید تخته فیبر چگالی متوسط **(MDF)**

پس از این مرحله، محصول به دست آمده وارد پرس اصلی شده و تحت فشار و دمای بالا قرار می‌گیرد. تخته‌های به دست آمده از این مرحله خنک شده و کناره¬بری، اندازه‌بری، سنباده‌زنی و درجه‌بندی آخرین فرآیندهای لازم است که در نهایت محصول به دست آمده به بازار عرضه می شود (دوست حسینی، ۱۳۸٦).

تحلیل سیاهه چرخه زندگی

کیفیت داده های تحلیل سیاهه چرخه زندگی بر قابلیت اعتماد نتایج ارزیابی چرخه زندگی تاثیرگذار خواهد بود (Crawford, 2008). تمامی داده های مربوط به مصرف مواد چوبی خام، آب، مواد شیمیایی، سوخت های فسیلی، برق و حمل و نقل توسط اندازه‌گیری در محل به دست آمد (پیش زمینه). همچنین داده های مربوط به انتشار آلاینده های ناشی از هر یک از نهاده ها (پس زمینه) از پایگاه‌های داده Ecoinvent (Ecoinvent database, 2014)، ETH-ESU 96 (ETH-ESU, 2014) و مقالات منتشره به دست آمد. لازم به ذکر است که انتشارات فرآیند تولید تخته فیبر (مصرف گاز طبیعی در خشک کن و بویلرها، کاربرد رزین اوره–فرمالدئید در کیک و ...) مانند ذرات معلق، دی اکسید کربن، مونوکسید کربن، اکسید نیتروژن، **VOC**، فرمالدئید، متانول و دیگر گازهای گلخانه ای خطرناک مانند بنزن، متان، استالدهید، اکرولین و متیل اتیل با استفاده از فاکتورهای انتشار سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (EPA, 2005) محاسبه شد.

مطالعات چرخه زندگی صنعتی بسیاری نشان داده‌اند که بار زیست محیطی ناشی از تولید کالاهای سرمایه ای در مقایسه با مرحله عملیاتی تولید محصول بسیار ناچیز است (Silva et al.,, 2013; González-García et al., 2009). از این رو، کالاهای سرمایه‌ای، تعمیر و نگهداری آنها و نیز حمل و نقل پرسنل در مرز سامانه در نظر گرفته نشده است.

شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی **(CExD)**

اکسرژی در منابع به شکل شیمیایی، حرارتی، جنبشی، پتانسیل، هسته ای و انرژی تابشی ذخیره می شود. شاخص **CExD** به عنوان مجموع اکسرژی از تمام منابع مورد نیاز برای ارائه یک فرایند و یا محصول تعریف شده (معادله ۱) و به صورت مگاژول معادل (**MJ-eq**) مشخص می‌شود (Bösch et al., 2007)، که در این مطالعه بیانگر حذف اکسرژی کل از طبیعت به منظور تولید یک مترمکعب **MDF** می‌باشد.

$$CExD = \sum_i m_i * Ex_{(ch),i} + \sum_j n_i * r_{ex-e(k,p,n,r,c),j} \quad (۱)$$

CExD = تقاضای اکسرژی تجمعی بر واحد تولید محصول(MJ-eq)

m_i = میزان مواد منبع i (kg)

$Ex_{(ch),i}$ = اکسرژی بر کیلوگرم ماده i (MJ-eq/kg)

n_i = مقدار انرژی از حامل انرژی i (MJ)

$r_{ex-e(k,p,n,r,c),j}$ = اکسرژی به نسبت انرژی از حامل انرژی *j (MJ-eq/kg)*

ch = مواد شیمیایی

k = جنبشی

p = پتانسیل

n = اتمی

r = تابشی

t = اکسرژی گرمایی

شاخص **CExD** به هشت زیر گروه منابع فسیلی، هسته ای، آبی، زیست توده، سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، آب، مواد معدنی و فلزات تقسیم می شود. مهمترین آنها به همراه موثرترین بخش‌های تولید در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشند.

نتایج و بحث

سیاهه چرخه زندگی تولید MDF در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۱- سیاهه چرخه زندگی تولید MDF در ایران

ورودی‌ها	واحد	مقدار
رزین	kg	۱۳٤
آب	m^3	۱,۷
مواد خام چوبی	kg	۱٦۰۰
سوخت دیزل	lit	۳,۳
گاز طبیعی	m^3	۱٤۷
الکتریسیته	kWh	۲۷۳
حمل و نقل		
چوب	km	۳۸٤
رزین	km	٥۹٦
دیزل	km	٥٦۸
خروجی‌ها		
تخته فیبر چگالی متوسط	m^3	۱
ضایعات چوبی	kg	۳٥۰

همچنین مهمترین گروه های اثر شاخص CExD به همراه موثرترین بخش‌های تولید در جدول ۲ ارائه شده اند. مقدار شاخص CExD در این مطالعه ۲۹۰۰۰ مگاژول معادل (MJ-eq) برای تولید هر مترمکعب MDF تخمین زده شد. همچنین رزین اوره فرمالدئید و الکتریسیته از جمله عمده بخش های تاثیر گذار شناخته شدند. جزئیات بیشتر در زیر بحث شده اند:

گروه اثر منابع *غیر تجدیدپذیر- فسیلی* ۲۷/۳٪ شاخص CExD را به خود اختصاص داد، که رزین اوره فرمالدئید (٦۸/٤٪) و الکتریسیته (۲۹/۷٪) به ترتیب موثرترین بخش‌های تاثیر گذار در این گروه اثر بودند. گروه اثر منابع تجدیدپذیر-آبی (۷۰٪) بیشترین سهم را به خود اختصاص داد. در این گروه نیز رزین اوره فرمالدئید با ۸۵/۵٪ و الکتریسیته با ۱۳/۸٪ موثرترین بخش های تاثیرگذار بودند.

جدول ۲- گروه‌های اثر مربوط به شاخص CExD به همراه اثرگذارترین بخش در هر زیر گروه

گروه اثر	**مقدار** (MJ-eq)	اثرگذارترین بخش‌ها
غیر تجدیدپذیر- فسیلی	۷۹۱۵	رزین UF، الکتریسیته
غیر تجدیدپذیر- اتمی	۳۷۳	رزین UF، الکتریسیته
تحدید پذیر- پتانسیل	۲۸٤	الکتریسیته، رزین UF
تجدیدپذیر- آبی	۲۰۳۱٦	رزین UF، الکتریسیته
کل	۲۹۰۰۰	رزین UF، الکتریسیته

گروه های اثر منابع غیر تجدیدپذیر-اتمی و منابع تجدیدپذیر-پتانسیل، سهم ناچیزی در شاخص CExD داشتند. با این وجود الکتریسیته و رزین اوره فرمالدئید از جمله تاثیرگذارترین بخش‌ها شناخته شدند.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر ضمن فراهم آوردن سیاهه چرخه زندگی فرآیند تولید MDF که برای مطالعات ارزیابی چرخه زندگی بعدی مانند: سازه‌های ساختمانی، کفپوش‌های چند لایه، صنایع مبلمان و غیره می تواند به کار برده شود، به تجزیه و تحلیل زیست محیطی از جریان فرآیند تولید این فرآورده با استفاده از روش تقاضای اکسرژی تجمعی (CExD) پرداخت. شاخص CExD برای تولید MDF در ایران ۲۹۰۰۰ مگاژول معادل به دست آمد. یعنی به میزان ۲۹۰۰۰ مگاژول معادل از کل منابع تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر مصرف می شود تا یک مترمکعب MDF تولید شود. در بین گروه‌های اثر شاخص CExD، گروه‌های اثر منابع تجدیدپذیر-آبی و منابع غیرتجدیدپذیر-فسیلی به ترتیب با ۲۰۳۱٦ و ۷۹۱۵ مگاژول معادل بیشترین سهم از کل مقدار شاخص CExD را به خود اختصاص دادند. همچنین رزین اوره فرمالدئید (۷۹٪) و الکتریسیته (۱٦/۸٪) از جمله مهمترین ورودی‌های تاثیرگذار شناخته شدند. از این رو کاهش و یا جایگزینی رزین به کار برده شده امری ضروری می‌باشد که در مطالعات آینده می‌بایست به آن پرداخته شود. همچنین اقدام جهت بهینه‌سازی مصرف الکتریسیته در جریان تولید امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. به رغم این واقعیت، بهبود عملکرد زیست محیطی با افزایش بهره‌وری انرژی، بهره گیری از مزایای کامل از چوب و ضایعات تولیدی کارخانه و نیز کاهش فاصله حمل و نقل مواد خام به دست خواهد آمد.

تشکر و قدردانی

از گروه مهندسی ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران که حمایت مالی این تحقیق را بر عهده داشته است، قدردانی می‌شود. همچنین از شرکت کیمیا چوب گلستان که نهایت همکاری را با ما داشتند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌گردد.

منابع و مآخذ

۱. بی‌نام. ۱۳۹۱. ترازنامه انرژی. وزارت نیرو.
۲. دوست حسینی، ک. ۱۳۸٦. فناوری تولید و کاربرد صفحات فشرده چوبی. نشر دانشگاه تهران. موسسه انتشارات و چاپ.
۳. صفاری نیا، م. ۱۳۸۹. روانشناسی تغییر نگرش و رفتار مصرف کنندگان انرژی. انتشارات سازمان بهره وری ایران آموزش مدیریت انرژی.

4. AIWIE. 2014. Production statistics of Iranian wood-based panel board industries [Persian]. Available: http://www.iranwoodind.com
5. Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A., & Frischknecht, R. 2007. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol 12(3), 181-190.
6. Crawford, R. H. 2008. Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method. Journal of environmental management. Vol 88(3), 496-506.
7. Ecoinvent database. 2014. V3. Available from: http://www.ecoinvent.org/.
8. EPA. 2002. AP-42. Emission factor documentation.
9. ETH-ESU 96. 2014. The ETH-ESU 96 Libraries. Available from: http://www.pre.nl/.
10. FAO. 2015. FAOSTAT [Online], Available: http://www.FAO.org.
11. Frühwald, A. & Hasch, J. 1999. Ökologische Bewertung von unterschiedlichen Spanplatten Typen. Research report.
12. González-García, S., Feijoo, G., Widsten, P., Kandelbauer, A., Zikulnig-Rusch, E., & Moreira, M. T. 2009. Environmental performance assessment of hardboard manufacture. The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol 14(5), 456-466.
13. Kouchaki-Penchah, H. Sharifi, M. Mousazadeh, H. & Zarea-Hosseinabadi, H. 2015. Life cycle assessment of particleboard manufacturing: A case study. 4ed Conference on Emerging Trends in Energy Conservation. ETEC.
14. Rodríguez, M. R., De Ruyck, J., Díaz, P. R., Verma, V. K., & Bram, S. 2011. An LCA based indicator for evaluation of alternative energy routes. Applied Energy. Vol 88(3), 630-635.
15. Silva, D. A. L., Lahr, F. A. R., Garcia, R. P., Freire, F. M. C. S., & Ometto, A. R. 2013. Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol 18(7), 1404-1411.
16. Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J. L., Gasol, C. M., Guillem, M., & Josa, A. 2012. Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study. Journal of Cleaner Production. Vol 25, 60-67.

Applying cumulative exergy demand (CExD) indicator in medium-density fibreboard manufacturing in Iran

Abstract

Increasing with the demand of wood-based composite panels specifically medium density fiberboard (MDF), leading to increase in the production of this panel in the country. This volume of production required to a huge consumption of non-energy and energy inputs. This study by providing a life cycle inventory analysis of MDF manufacturing, assessing the environmental aspect of the current production process by the cumulative exergy demand (CExD) method. The value of CExD for manufacturing of 1 m^3 MDF in Iran was obtained 29,000 MJ-eq. Among the impact categories of CExD indicator, renewable-water and non-renewable-fossil, with 20,316 and 7,915 MJ-eq had the largest share, respectively. Furthermore, urea-formaldehyde resin (79%) and electricity (16.8%) were identified as the most influential inputs.

Keywords: Medium density fibreboard; Cumulative exergy demand; Energy consumption; Life Cycle Inventory