

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره هفت، مهر ماه ۹۸

استفاده از روش ارزیابی چرخه‌ی حیات برای مقایسه آثار محیط زیستی بام سبز و بام معمولی

الما محمدی^۱

سید حامد میر کریمی^۲

مرجان محمدزاده^{۳*}

marjan.mohammadzadeh@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: بام سبز از جمله گزینه‌های بهبود مشکلات محیط زیست شهری است. اما برخی نگرانی‌ها پیرامون آثار محیط زیستی ایجاد بام‌های سبز وجود دارد، زیرا برخلاف فواید محیط زیستی بی‌شمار پوشش گیاهی آن‌ها، لایه‌هایی چون عایق رطوبتی در بام‌های سبز اکثراً از مواد پلیمری ساخته می‌شود. در این تحقیق آثار محیط زیستی یک بام سبز گسترده در طی حیاتش با یک بام معمولی مقایسه گردید.

روش بررسی: در این مطالعه از روش ارزیابی چرخه‌ی حیات استفاده شد. با توجه به تعدد روش‌های ساخت بام سبز ابتدا روش‌های متفاوت ایجاد و مواد مختلف مورد استفاده در لایه‌های آن بررسی و گردآوری شد. سپس آثار محیط زیستی چند روش ساخت با یکدیگر مقایسه و گزینه‌ی بهینه ساخت انتخاب شد، و در مرحله‌ی بعد ارزیابی چرخه‌ی حیات گزینه‌ی بهینه با بام معمولی انجام گرفت. مقایسه‌ی آثار محیط زیستی بین روش‌های مختلف ساخت و همچنین گزینه‌ی بهینه با بام معمولی به وسیله‌ی نرم‌افزار openLCA انجام شد. **یافته‌ها:** نتایج نشان داد که بام سبز در طول حیات خود به نسبت بام معمولی آثار محیط زیستی منفی کم‌تری دارد. همچنین مشخص شد که بیش‌تر بودن آثار منفی محیط زیستی بام سبز نسبت به بام معمولی در برخی طبقات اثر به دلیل استفاده از عایق پی وی سی و ورق ژئوتکستایل (فایبرگلاس و پلی‌استر) در لایه‌های آن بوده است.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق را می‌توان با اندازه‌گیری فواید ایجاد بام سبز (برای مثال کاهش کمی و کیفی میزان رواناب) و نیز استفاده از مواد جایگزین با آثار منفی محیط زیستی کم‌تر در لایه‌های آن بهبود داد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چرخه‌ی حیات، بام سبز گسترده، آثار محیط زیستی، نرم‌افزار openLCA

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانش‌گاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- دانشیار گروه محیط زیست، دانش‌گاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- استادیار گروه محیط زیست، دانش‌گاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (مسوول مکاتبات)

Application of Life Cycle Assessment Method to Compare Environmental Impacts of a Green Roof and a Normal Roof

Elma Mohammadi¹
Seyed hamed Mirkarimi²
Marjan Mohammadzadeh^{3*}

marjan.mohammadzadeh@gmail.com

Accepted: 2016.06.03

Received: 2016.04.17

Abstract

Introduction: Green roof is one of the options to improve environmental problems of urban areas. Meanwhile there are some worries about the environmental impacts of creating green roofs, as despite the benefits of vegetation, some layers of green roofs like waterproof membrane, are made from polymers. In this survey, environmental impacts of an extensive green roof in its lifetime were compared with a normal roof.

Materials and Method: In this survey, life cycle assessment method was used. Since there are various methods to implement a green roof, first different methods of implementation and different materials that can be used in its layers were studied and collected. Then some of these methods were chosen to investigate their environmental impacts in order to find the optimized option to create a green roof. On the next step, life cycle assessment of optimized option and normal roof was conducted. The open LCA software was used to compare environmental impacts of different implementing methods, and also optimized option and normal roof.

Results and Discussion: Results showed that the green roof has less environmental impacts than normal roof, during its lifetime. In addition, it was indicated that in some impact categories that the environmental impacts of green roof was more than normal roof the reason was using PVC and geotextile (glass fiber and polyester) in its layers. Results of this paper can be improved by measuring benefits of creating a green roof (such as reducing quantity and quality of run off amounts), and also using materials with less environmental impacts in green roofs layers.

Key words: Life Cycle Assessment, Extensive Green Roof, Environmental Impacts, open LCA Software

1- M.Sc. in Environmental science, College of Fisheries and Environmental Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

2- Associate professor, College of Fisheries and Environmental Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

3- Assistant professor, College of Fisheries and Environmental Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*(Corresponding Author)

مقدمه

رفته در بام معمولی و بام سبز متفاوت بوده‌است. در این تحقیق به دلیل وجود تفاوت در تعداد لایه‌های به کار رفته، مواد استفاده شده در ساخت و گاه ترتیب روی هم‌گذاری لایه‌های بام سبز در منابع مختلف، ابتدا روش‌های متفاوت ایجاد بام سبز و مواد مختلف مورد استفاده در لایه‌های آن بررسی و گردآوری و گزینه‌های ساخت موجود از نظر آثار محیط زیستی با یک‌دیگر مقایسه شدند تا گزینه‌ی بهینه با کم‌ترین آثار محیط زیستی انتخاب گردد. در مرحله‌ی بعد آثار محیط زیستی گزینه‌های بهینه با بام معمولی مقایسه شد. برای انتخاب گزینه‌ی بهینه و همچنین مقایسه آثار محیط زیستی بام سبز و بام معمولی از روش ارزیابی چرخه‌ی حیات و نرم‌افزار ارزیابی چرخه‌ی حیات openLCA استفاده شد.

روش بررسی

بام معمولی (بدون بام سبز) می‌تواند با روش‌های مختلف مانند ورق قیر اصلاح‌شده (معروف به ایزوگام)، ورق پلی وینیل کلراید یا پی‌وی‌سی (PVC^۴) پوشیده شده باشد. در این تحقیق منظور از بام معمولی بامی عایق شده با قیر داغ است. بام سبز می‌تواند به صورت گسترده (Extensive) و یا متمرکز (Intensive) باشد، که در این تحقیق بام سبز گسترده مورد توجه قرار گرفته است. در این بخش ابتدا روش‌های مختلف ایجاد بام سبز و مواد مختلف مورد استفاده در لایه‌های آن شرح داده شده است. سپس گزینه‌های انتخابی برای مقایسه‌ی آثار محیط زیستی در مرحله‌ی ساخت بام سبز معرفی و نحوه‌ی ارزیابی آثار محیط زیستی آن‌ها و همچنین ارزیابی چرخه‌ی حیات کامل برای بام سبز (گزینه‌ی انتخابی) و بام معمولی توضیح داده شده است.

گسترش روزافزون شهرنشینی و نیاز به ساخت بناهای بیش‌تر سبب از بین رفتن پوشش گیاهی در شهرها شده است. ایجاد پوشش گیاهی بر روی بام‌ها از گزینه‌های مناسب برای افزایش مساحت فضای سبز شهری به نظر می‌رسد. به طور کلی، پوشش گیاهی روی بام ساختمان‌ها را بام سبز (Green Roof) می‌نامند. از آنجایی که بام سبز یک پوشش گیاهی زنده است می‌توان تمام خدمات اکوسیستمی که هر محیط سبز دیگری دارد، برای آن در نظر گرفت. اما استفاده از مواد تجزیه‌ناپذیر در لایه‌های بام سبز برخی نگرانی‌ها پیرامون آثار محیط زیستی آن ایجاد کرده است. امروزه بررسی آثار منفی محیط زیستی استفاده از مواد تجزیه‌ناپذیر در ساخت بام‌های سبز بسیار مورد توجه قرار گرفته است که برای این کار از روش ارزیابی چرخه‌ی حیات استفاده می‌شود. برای مثال سبز^۱ و همکاران (۱)، اثرات محیط زیستی ساختمان در سه حالت بام معمولی، بام با رنگ سفید، و بام با پوشش سبز را در طی چرخه‌ی حیات آن‌ها (۵۰ سال) به وسیله نرم‌افزار سیاهه نویسی ارزیابی چرخه‌ی حیات SimaPro با یک‌دیگر مقایسه کردند. بیانچینی و هواج^۲ (۲)، نیز به وسیله نرم‌افزار ارزیابی چرخه‌ی حیات SimaPro 7.1 اثرات محیط زیستی ناشی از ساخت لایه‌هایی را که در بام سبز به کار می‌روند محاسبه و میزان انتشار چهار آلاینده‌ی هوا (PM₁₀ و NO₂, SO₂, O₃) در طی ایجاد بام سبز را با میزان جذب این گازها توسط گیاهان کاشته شده روی بام در سه سناریوی مختلف مقایسه کردند. از طرفی کاسارثو و ریاز^۳ (۳)، هزینه و اثرات محیط زیستی یک بام سبز گسترده، یک بام سبز متمرکز فرضی و یک بام معمولی را در طی چرخه‌ی حیات آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SimaPro 5.0 بررسی و مقایسه کردند. در هریک از این تحقیق‌ها مواد به کار

1- Saiz

2- Bianchini and Hewage

3- Kosareo and Ries

4- Poly Vinyl Chloride

روش‌های مختلف ایجاد بام سبز و مواد به کار گرفته شده در لایه‌های آن

تنوع در طراحی بام سبز و مصالح مصرفی در انواع لایه‌های آن با توجه به شرایط متفاوت و به ویژه اقلیم منطقه روز به روز در حال تغییر و بهینه‌سازی است (۴). در کشورهایی که این تکنولوژی قدمت بیشتری دارد به تدریج راهنما و استانداردهایی برای انتخاب نوع مصالح مصرفی در شرایط مختلف ایجاد شده است. برای مثال در آلمان، انگلیس و کانادا استانداردهای اجرایی بر مبنای مصالح مصرفی، اقلیم و طراحی سازه و بوم‌گرایی ایجاد

شده‌اند (۴). شرکت‌های مختلف نیز با پیشرفت تکنولوژی بام سبز به منظور برآورد کردن انتظارات مصرف‌کنندگان مختلف و شرایط آب و هوایی مختلف سیستم‌های سبز متفاوتی را به بازار ارائه می‌کنند (۵). همان‌گونه که در جدول (۱) ارائه شده است، در منابع مختلف برای ساخت بام سبز بین ۵ تا ۱۰ لایه‌ی مختلف در نظر گرفته شده است، اما به طور کلی به نظر می‌رسد که وجود ۶ لایه در بام‌های سبز گسترده ضروری است. این لایه‌ها از سمت پایین (روی بستر بام) به بالا شامل عایق رطوبتی بام، عایق ضد آب، زهکش، فیلتر خاک، محیط کشت یا خاک و گیاه است.

جدول ۱- مثال‌هایی از اجزای به کار رفته در بام سبز گسترده در منابع مختلف

Table 1- Some examples of different components used in extensive green roofs in different sources

شماره	لایه‌های در نظر گرفته شده (از پایین به بالا)	منبع
۱	عایق رطوبتی، Filtron tile، فیلتر فایبر گلاس، خاک بستر، گیاه	(۱)
۲	عایق حرارتی، عایق آب، کنترل بخار، مانع ریشه، زهکش، فیلتر شبکه‌ای، خاک، گیاه	(۶)
۳	مواد محافظ بام، لایه‌ی حفظ رطوبت، زهکش (با فیلتر پارچه‌ای در زیر و لایه‌ی مانع ریشه در بالای آن)، محیط کشت، گیاه	(۷)
۴	عایق رطوبتی، صفحه‌ی محافظت، زهکش، محیط کشت، گیاه	(۸)
۵	لایه‌ی محافظ، عایق فومی، فرش محافظ، زهکش، فیلتر پارچه‌ای، محیط کشت، گیاه، گراول و سنگ رودخانه‌ای (در فواصلی که کاشت انجام نمی‌گیرد)، لبه‌ی محافظ (Retaining Edge)	(۹)
۶	مانع ریشه، زهکش، فیلتر، لایه‌ی حفظ آب، محیط کشت، گیاه	(۵)
۷	غشای ضد آب، مانع ریشه، لایه محافظت، عایق (پرکننده‌ی سبک‌وزن)، زهکشی و درزپوش‌ها، محافظ آب، کنترل فرسایش، فیلتر، محیط کشت، گیاه، آبیاری*	(۴)
۸	ایزوگام، عایق نایلونی، عایق ریشه، پوکه و پرلیت (بعنوان زهکش)، عایق خاک (موکت گونی یا ابر فشرده)، گونی، خاک، گیاه	روش شناخته شده به نام "روش سنتی"
۹	عایق ایزوگام، سیمان، عایق پلی وینیل کلراید، زهکش، فیلتر، خاک سبک، گیاه	شرکت (الف)
۱۰	عایق کاری اولیه، مش فایبرگلاس، لایه‌ی کوتینگ (عایق ثانوی)، زهکش (بدون فضای نگهدارنده‌ی آب)، ضد ریشه، محافظ، زهکش (با فضای نگهداری آب)، فیلتر خاک، خاک سبک، گیاه	شرکت (ب)
۱۱	عایق رطوبتی، لایه‌ی محافظ عایق، زهکش، فیلتر، محیط کشت، گیاه	شرکت (ج)

* به کارگیری لایه‌هایی که در زیرشان خط کشیده شده الزامی دانسته شده است. همچنین احتمالاً ترتیب لایه‌ها در نظر گرفته نشده است.

گزینه‌های انتخابی برای بررسی آثار منفی محیط زیستی در مرحله‌ی ساخت

هدف اول این تحقیق انتخاب گزینه‌ی بهینه از نظر آثار منفی محیط زیستی، برای ایجاد بام سبز است. بر این اساس، تعدادی گزینه انتخاب و با نرم‌افزار ارزیابی چرخه‌ی حیات openLCA آثار منفی محیط زیستی آن‌ها در مرحله‌ی ساخت محصول بررسی شدند. فیلتر ابتدایی که در این تحقیق برای انتخاب گزینه‌های ساخت در نظر گرفته شد، نوع بام سبز بود. ایجاد بام سبز گسترده بر روی بام‌های موجود و آتی به دلایلی مانند هزینه-ی ایجاد و نگهداری کم‌تر نسبت به بام سبز متمرکز عملی‌تر به نظر می‌رسد. به همین دلیل اساس این تحقیق روی بام سبز گسترده بوده است. در جدول (۱) لایه‌های متفاوتی که در منابع مختلف برای ساخت بام سبز استفاده و یا توصیه گردیده، گردآوری شده است. در روش شماره‌ی ۸ این جدول که روش سنتی نیز خوانده می‌شود، چند لایه ایزوگام به عنوان عایق رطوبتی بام در نظر گرفته می‌شود که این کار ریسک نفوذ آب به ساختمان را بالا می‌برد و مورد توصیه نیست. در روش شماره‌ی ۱۰ دو لایه زهکش (که یکی از آن‌ها قابلیت حفظ آب را دارد) و دوبار عایق‌کاری توصیه شده که این کار خیلی محتاطانه به نظر می‌رسد و استفاده از این روش شاید برای منطقه‌ای با بارندگی خیلی زیاد مناسب باشد. در بین منابع دیگر این جدول، جزئیات ساخت و جنس مواد به کار برده شده در منبع شماره‌ی ۵ به طور کامل و در منابع شماره‌های ۹ و ۱۱ تا حدودی قید شده بودند و بنابراین این سه گزینه برای ارزیابی آثار منفی محیط زیستی در مرحله‌ی ساخت بام سبز بررسی شدند. گزینه‌ها شامل:

- گزینه‌ی اول (روش موجود در فلین، (۹): قیراندود کردن بام، عایق فومی، فرش محافظ، زهکش، فیلترپارچه-ای، محیط کشت، گیاه (سدوم)
- گزینه‌ی دوم (روش معرفی شده توسط شرکت الف):

ورق ایزوگام (قیراصلاح‌شده) که با توجه به نبودن گزینه‌ی مربوط در نرم‌افزار به قیراندود کردن تغییر داده شد، سیمان، عایق پی-وی‌سی، زهکش، فیلترپارچه‌ای، محیط کشت، گیاه (سدوم)

- گزینه‌ی سوم (روش معرفی شده توسط شرکت ج): عایق پی‌وی‌سی، ورق ژئوتکستایل، زهکش، فیلترپارچه‌ای، محیط کشت، گیاه (سدوم)

نحوه‌ی اجرای مراحل ارزیابی چرخه‌ی حیات بام سبز و بام معمولی

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق برای بررسی آثار محیط زیستی بام سبز و بام معمولی از روش ارزیابی چرخه‌ی حیات (LCA^۱) استفاده شد. بر اساس تعریف موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ارزیابی چرخه‌ی حیات عبارت است از "گردآوری و ارزیابی درون‌دادها (Inputs)، برون‌دادها (Outputs) و پیامدهای بالقوه محیط زیستی یک سیستم محصول^۲ در سراسر چرخه‌ی حیات آن" (۱۰). در استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ اصول و چارچوب ارزیابی چرخه‌ی حیات و در استاندارد ایزو ۱۴۰۴۴ الزامات و راهنمایی‌های آن بیان شده‌اند (۱۰ و ۱۱). برای انجام LCA نرم‌افزارهای متعددی وجود دارند. برخی از این نرم‌افزارها به طور تخصصی ارزیابی چرخه‌ی حیات یک محصول خاص را انجام می‌دهند؛ مانند Athena Impact Estimator for Building که به طور تخصصی برای ارزیابی چرخه‌ی حیات ساختمان به کار می‌رود. همه‌ی این نرم‌افزارها نقاط قوت و ضعف دارند، برای مثال در نسخه‌ی ۵ نرم‌افزار اخیر امکان وارد کردن لایه‌های بام سبز وجود دارد، اما این نرم‌افزار برای شمال آمریکا طراحی شده و در خارج از این قاره تنها می‌تواند با اهداف آموزشی و برای مقایسه تفاوت ایجاد شده در تاثیر بر محیط با تغییر در طراحی ساختمان به کار رود (مکاتبه شخصی با مدیر ارتباطات

1 - Life Cycle Assessment

۲-Product System، در اینجا واژه‌ی (محصول) شامل هرگونه کالا و خدمات است.

ارزیابی چرخه‌ی حیات openLCA انجام شد. مرز سامانه مطالعاتی بام یک ساختمان فرضی و واحد کارکردی یک مترمربع از بام در نظر گرفته شد. انتخاب محدوده‌ی کار یا مرز سامانه مطالعاتی به صورت تقریبی است و طی مراحل بعدی امکان افزایش و یا کاهش محدوده‌ی کار وجود دارد، این امر می‌تواند به دلیل بهینه‌سازی عمل ارزیابی و یا عملی نبودن اندازه‌گیری بخش‌هایی از آن صورت پذیرد. برای مثال حمل و نقل مواد از فرآیندهایی است که در اکثر ارزیابی‌ها وجود دارد. اگر چرخه‌ی حیات وسیله‌ی باربری و به دنبال آن چرخه‌ی حیات تک تک اجزا و وسیله‌های نقلیه‌ای که خود اجزا را جا به جا کرده‌اند، در نظر بگیریم، زنجیره‌ی تو در تو و ناپایان خواهیم داشت، هم‌چنین برای مثال سهم اثر محیط زیستی‌ای ساخت پیچ موجود در وسیله‌ی نقلیه در ارزیابی چرخه‌ی حیات یک محصول بسیار ناچیز است و چشم پوشی از آن تاثیری روی نتایج نخواهد داشت. در واقع هدف مدل‌سازی چرخه‌ی حیات یک محصول یا فرآیند است و مدل، ساده‌شده‌ی حقیقت است و ساده‌سازی یعنی تحریف آن (۱۳). در نتیجه برای مرزبندی سیستم، برخی مواد و فرآیندها را می‌توان نادیده گرفت، تا جایی که تغییر زیادی در نتایج ایجاد نکند. در این تحقیق تولید لایه‌های بام سبز و معمولی و مرحله‌ی استفاده و بعد از استفاده از لایه‌های به کار رفته شده در بام‌ها در نظر گرفته شد. حمل و نقل لایه‌های ساخته شده به محل استفاده به دلیل در دست نبودن اطلاعات صحیح در نظر گرفته نشد. محل ساخت لایه‌های انتخاب‌شده در نرم‌افزار، اکثراً در کشورهایی مانند سوئد بودند، در حالی که برخی از این لایه‌ها در کشور نیز تولید می‌شوند و یا از برخی شرکت‌های خارجی واقع در چین یا سنگاپور وارد می‌گردند.

تجزیه و تحلیل فهرست (سیاهه‌ی) چرخه‌ی حیات

تجزیه و تحلیل سیاهه عبارت از گردآوری و کمی‌سازی درون داده‌ها و برون‌داده‌ها برای یک سیستم محصول در طول چرخه‌ی حیات آن است (۱۰). گردآوری اطلاعات باید بر اساس هدف و مرز مطالعه صورت پذیرد. نرم‌افزارهایی که ارزیابی چرخه‌ی حیات را

موسسه مواد پایدار آتنا^۱، نرم افزار SimaPro یکی از نمونه‌های برجسته نرم‌افزارهای ارزیابی چرخه‌ی حیات است که پایگاه داده‌ی غنی و گسترده‌ای دارد و در اکثر مقاله‌هایی که LCA را برای بام سبز انجام داده‌اند از این نرم افزار استفاده شده است (برای مثال (۱) و (۲))، اما هزینه‌ی استفاده از آن به نسبت بالا است. openLCA نرم‌افزاری رایگان برای ارزیابی چرخه‌ی حیات و توسعه‌ی پایدار است که در سال ۲۰۰۶ توسط شرکت گرین دلتا (Green Delta) ایجاد شده و هرساله نسخه‌ی به روز شده آن با توانایی‌ها و امکانات بیش‌تر منتشر می‌گردد. در این تحقیق برای ارزیابی محیط زیستی بام سبز و بام معمولی از نرم افزار ارزیابی چرخه‌ی حیات openLCA استفاده شد.

طبق استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ (تصویب شده در سال ۲۰۰۶)، ارزیابی چرخه‌ی حیات از ایجاد محصول تا مرحله‌ی بعد از استفاده در ۴ مرحله شامل تعریف هدف و دامنه، تجزیه و تحلیل فهرست، ارزیابی اثرات و تفسیر انجام می‌شود (۱۰). در این بخش نحوه‌ی اجرای مراحل LCA در نرم‌افزار چرخه‌ی حیات openLCA، برای گزینه‌های ساخت بام سبز و همچنین گزینه‌ی بهینه و بام معمولی به صورت توأم بیان شده است:

تعریف هدف و دامنه

در این بخش فرآیند یا محصول مورد بررسی تعریف و توصیف شده و مرز سامانه مطالعاتی (System Boundaries) و واحد کارکردی آن مشخص می‌گردد (۱۲). در این تحقیق ابتدا با استفاده از نرم‌افزار openLCA، ارزیابی مقایسه‌ای آثار محیط زیستی سه گزینه‌ی اجرایی بام سبز در مرحله‌ی ساخت آن انجام شد تا روشی که کم‌ترین آثار محیط زیستی را دارد مشخص گردد (گزینه‌ی بهینه). در مرحله‌ی بعد ارزیابی چرخه‌ی حیات گزینه‌ی بهینه و بام معمولی انجام و نتایج آن‌ها از نظر آثار محیط زیستی با یکدیگر مقایسه شد. هر دو ارزیابی (مقایسه‌ی روش‌های ساخت و مقایسه‌ی گزینه‌ی بهینه و بام معمولی) به وسیله‌ی نرم‌افزار

۱- Athena Sustainable Materials Institute، در تاریخ

۱۳۹۳/۰۵/۱۴ و از طریق پست الکترونیکی

ضروری و برای سال‌های بعد از استقرار فقط در قسمتی از بام که نیاز به کود دارد لازم دانسته‌است و فلین (۹)، دو بار کوددهی سالانه را توصیه کرده‌است. در تحقیق حاضر فرض شد که تا پنج سال اول دو بار در سال و در ۴۵ سال بعدی یک بار کوددهی سالانه انجام گردد. اگر در هر کوددهی حدود ۱۰ گرم کود در هر مترمربع استفاده شود، در طی عمر بام سبز (حدوداً ۵۰ سال) ۰٫۵۵ کیلوگرم کود برای هر مترمربع از بام سبز استفاده می‌گردد. در مرحله‌ی بعد از استفاده فرض شده است که عایق پی‌وی‌سی و فیلترپارچه‌ای و ورق زهکش سوزانده شوند. محیط کشت و گیاهان می‌توانند در مکان دیگر استفاده شوند و در مرحله‌ی بعد از استفاده در نظر گرفته نشوند.

فهرست چرخه‌ی حیات بام معمولی با فرض این‌که در طی ۵۰ سال، دو بار نیاز به تعویض عایق بام باشد در جدول (۶) نشان داده شده است. فرض شده است که در سال اول بام با قیر داغ عایق شود و در سال بیستم و چهلم عایق قبلی جدا و عایق جدید نصب گردد. بنابراین ۳ بار ساخت و ۲ بار برداشت عایق در طی ۵۰ سال در نظر گرفته شد. حمل و نقل مواد و نیروی کار و همچنین ابزار و وسایل لازم دیگر برای عایق‌کاری و جدا کردن لایه‌ی قبلی بام در نظر گرفته نشد.

انجام می‌دهند اکثر فرآیندها و مواد مورد نیاز برای مدل‌سازی چرخه‌ی حیات یک محصول یا فرآیند را به صورت آماده دارند. برای فهرست نویسی چرخه‌ی حیات از نرم‌افزار (openLCA) استفاده شد. پایگاه اطلاعات استفاده شده در نرم‌افزار نسخه‌ی ۳٫۱ اکواینونت (Ecoinvent) بود. فهرست‌نویسی مرحله‌ی ساخت سه گزینه‌ی انتخاب شده در جداول (۲)، (۳) و (۴) نشان داده شده است. در فهرست‌نویسی چرخه‌ی حیات بام سبز در فلین (۹)، گراول، لبه‌ی آلومینیومی محافظ، ماشین بالابر، نیروی کار و حمل و نقل نیروی کار و مواد نیز موجود بودند که در این تحقیق در نظر گرفته نشدند. فهرست نویسی مرحله‌ی استفاده و مرحله‌ی بعد از استفاده از بام سبز (که فقط برای گزینه‌ی بهینه انجام شد) در جدول (۵) نشان داده شده است. با مقایسه‌ی آثار محیط زیستی سه نوع روش ساخت گزینه‌ی سوم کم‌ترین آثار محیط زیستی را داشته و گزینه‌ی بهینه است. مرحله‌ی نگهداری شامل سرکشی برای بررسی سالم بودن سیستم و گیاهان، آبیاری، کوددهی و کاشت گیاهان جدید در صورت نیاز است. به دلیل این‌که از بین فرآیندهای ذکر شده، کوددهی می‌تواند تاثیر بیش‌تری روی محیط زیست داشته باشد، کوددهی در فهرست در نظر گرفته شد. لاکت (۷)، کوددهی سالانه را برای ۳ تا ۵ سال اول

جدول ۲- گزینه‌ی اول: سیاهه‌نویسی مرحله‌ی ساخت بام سبز مشابه با روش موجود در فلین (۹)

Table 2- First option: inventory of production phase of green roof, similar to Flynn (9)

توضیحات	فرآیند یا جریان (Flow) انتخاب شده در نرم‌افزار openLCA	واحد	مقدار در مترمربع	مواد و فرآیندهای ورودی
ضخامت قیر ۴/۰۸ سانتی‌متر فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید قیر	Bitumen adhesive compound, hot	کیلوگرم	۱/۸۳	قیراندود کردن بام
ضخامت فوم ۵٫۰۸ سانتی‌متر، این فوم یک نوع پلی استایرن بسط یافته است. فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید صفحه‌ی فوم	Polystyrene foam slab, 10% recycled	کیلوگرم	۱/۶۲	عایق فومی
فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید پلی پروپیلین	Polypropylene, granulate	کیلوگرم	۰/۴۸	فرش محافظ

فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید پلی اتیلن با چگالی بالا	Polyethylene, high density, granulate	کیلوگرم	۱/۴۶	زهکش
فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید پلی پروپیلین	Polypropylene, granulate	کیلوگرم	۰/۸۹	فیلتر پارچه‌ای
مخلوطی از ۵۰٪ خاک و ۵۰٪ رس که فرآیندی روی آن‌ها صورت نگرفته است.	Clay, unspecified, Soil و in ground	کیلوگرم	۳۲/۴	محیط کشت (خاک و رس)
فرآیند شامل اثرات ناشی از انتشار جوانه‌ی گیاه در شرایط گل‌خانه‌ای. با فرض این‌که اثرات محیط زیستی هر ۴ سدوم با یک نهال کوچک برابر است.	Tree seedling (at greenhouse)	عدد	۸	گیاه (سدوم)

جدول ۳- گزینه‌ی دوم: سیاه‌نویسی مرحله‌ی ساخت بام سبز مشابه با روش شرکت (الف)

Table 3- Second option: inventory of production phase of green roof, similar to organization (A)

توضیحات	فرآیند انتخاب شده در نرم-افزار openLCA	مقدار در مترمربع (واحد)	مواد و فرآیندهای ورودی
فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید قیر ضخامت قیر ۴/۰۸ سانتیمتر (از فلین، (۹))	Bitumen adhesive compound, hot	۱/۸۳ (کیلوگرم)	قیراندود کردن بام
فرآیند شامل تولید ملات سیمان با ضخامت ۲ سانتی‌متر	Cement mortar	۴ (کیلوگرم)	سیمان
فرآیند شامل تولید پی وی سی از روش بسپارش تعلیقی؛ با ضخامت ۱۵ میلی‌متر	Polyvinylchloride, suspension polymerised	۱/۵۳ (کیلوگرم)	عایق پی وی سی
فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید پلی اتیلن با چگالی بالا؛ محصول تجاری versidrain از شرکت elmich با ضخامت ۴۴ میلی‌متر	Polyethylene, high density, granulate	۰/۱۹ (کیلوگرم)	زهکش
فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید پلی پروپیلین. اطلاعات آن در منبع موجود نبود و از فلین (۹) گرفته شد.	Polypropylene, granulate	۰/۸۹ (کیلوگرم)	فیلتر پارچه‌ای
اطلاعات آن در منبع موجود نبود. مخلوطی متشکل از ۲۰٪ کمپوست (فرآیند تولید کمپوست)، ۴۰٪ پومیک (برداشت از معدن) و ۴۰٪ ماسه (برداشت از معدن) در نظر گرفته شد. وزن تقریبی در نظر گرفته شد.	Compost و Pumice و Sand	۳۵ (کیلوگرم)	محیط کشت (کمپوست، پومیک و ماسه)
فرآیند شامل اثرات ناشی از انتشار جوانه‌ی گیاه در شرایط گل‌خانه‌ای. با فرض این‌که اثرات محیط زیستی هر ۴ سدوم با یک نهال کوچک برابر است (۹)	Tree seedling (at greenhouse)	۸ (عدد)	گیاه (سدوم)

جدول ۴- گزینه‌ی سوم: سیاهه‌نویسی مرحله‌ی ساخت بام سبز مشابه با روش شرکت (ج)

Table 4- Third option: inventory of production phase of green roof, similar to organization (B)

مواد و فرآیند- های ورودی	مقدار در مترمربع (واحد)	فرآیند انتخاب شده در نرم‌افزار openLCA در تحقیق حاضر	توضیحات
عایق پی وی سی	۲/۵ (کیلوگرم)	Polyvinylchloride, suspension polymerized	فرآیند شامل تولید پی وی سی از روش بسپارش تعلیقی. با ضخامت ۲۰ میلی‌متر
ورق ژئوتکستایل	۰/۵ (کیلوگرم)	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up	از جنس پلی استر. فرآیند انتخاب شده شامل تولید فایبر گلاس با تزریق رزین پلی‌استر در آن
زهکش	۰/۹ (کیلوگرم)	Polyethylene, high density, granulate	فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید پلی اتیلن با چگالی بالا. ژئودرین. اطلاعات در منبع موجود نبود و از جدول (۳) گرفته شد.
فیلتر پارچه‌ای	۰/۳۹ (کیلوگرم)	Polypropylene, granulate	فرآیند شامل اثرات ناشی از تولید پلی پروپیلین. ژئوتکستایل نفاخته از جنس پلی پروپیلین با گرماژ پایین
محیط کشت (کمپوست، پومیک و ماسه)	۳۵ (کیلوگرم)	Compost و Pumice و Sand	اطلاعات آن در منبع موجود نبود. مخلوطی متشکل از ۲۰٪ کمپوست (فرآیند تولید کمپوست)، ۴۰٪ پومیک (برداشت از معدن) و ۴۰٪ ماسه (برداشت از معدن) در نظر گرفته شد. وزن تقریبی در نظر گرفته شد.
گیاه (سدوم)	۸ (عدد)	Tree seedling (at greenhouse)	فرآیند شامل اثرات ناشی از انتشار جوانه‌ی گیاه در شرایط گل‌خانه‌ای. با فرض این‌که اثرات محیط زیستی هر ۴ سدوم با یک نهال کوچک برابر است (۹)

جدول ۵- سیاهه‌نویسی مرحله‌ی استفاده و بعد از استفاده بام سبز

Table 5- Inventory of use and after use phases of green roof

فرآیند ورودی	مقدار در مترمربع (کیلوگرم)	فرآیند انتخاب شده در نرم‌افزار openLCA	توضیحات
مرحله‌ی استفاده- کوددهی	۰/۵۵	Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅	فرآیند شامل تولید دی‌آمونیم فسفات
مرحله‌ی بعد از استفاده- پسماند پی وی سی	۲/۵	Waste Polyvinylchloride	فرآیند شامل سوزاندن پی وی سی با زباله‌سوز
مرحله‌ی بعد از استفاده- پسماند زهکش	۰/۹	Waste Polyethylene	فرآیند شامل سوزاندن پلی اتیلن با زباله‌سوز
مرحله‌ی بعد از استفاده- پسماند فیلتر پارچه‌ای	۰/۳۹	Waste Polypropylene	فرآیند شامل سوزاندن پلی پروپیلین با زباله‌سوز

جدول ۶- فهرست نویسی چرخه‌ی حیات بام معمولی در طی ۵۰ سال

Table 6- Life Cycle Inventory of normal roof during 50 years

توضیحات	فرآیند انتخاب شده در نرم‌افزار openLCA	مقدار در مترمربع (کیلوگرم)	مواد و فرآیندهای ورودی
با فرض این‌که در طول ۵۰ سال ۳ بار عایق کاری انجام شود	Bitumen adhesive compound, hot	۵/۵۰	مرحله‌ی ساخت- عایق‌بندی با قیر داغ
با فرض این‌که در طول ۵۰ سال ۲ بار عایق بام جدا و دفع شود. فرآیند شامل سوزاندن صفحه قیر با زباله‌سوز	Waste bitumen sheet	۳/۶۶	مرحله‌ی بعد از استفاده- پسماند قیر

ارزیابی اثرات

مکانی ایالات متحده می‌باشد. سبز و همکاران (۱)، نیز برای ارزیابی چرخه‌ی حیات مقایسه‌ای بام سبز، بام معمولی و بام با رنگ سفید از طبقات اثر خوراک‌وری (Eutrication)، اسیدی-سازی، اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی، سمیت برای اکوسیستم خشکی، سمیت برای اکوسیستم آبی دریا، سمیت برای اکوسیستم آبی- آب شیرین، سمیت برای انسان، کاهش لایه‌ی ازن، گرمایش جهانی و تجزیه‌ی غیرزیستی استفاده کردند. از سویی کاسارنو و ریاز (۳)، از طبقات اثر کاهش لایه‌ی ازن، اسیدی کردن، خوراک-وری و گرمایش جهانی و همچنین طبقات اثر موجود در IMPACT 2002+ شامل سرطان‌زایی، غیرسرطان‌زایی، تنفس زیستی، تنفس غیرزیستی، پتانسیل گرمایش جهانی، تابش (Radiation)، کاهش لایه‌ی ازن، سمیت اکولوژیکی، اسیدی کردن و غنی‌سازی (Nutrification) محیط خشکی، اسیدی کردن محیط آبی، خوراک‌وری محیط خشکی، کاهش منابع انرژی و کاهش منابع معدنی استفاده کردند. در این تحقیق برای بررسی اثرات محیط زیستی سه روش ساخت بام سبز، از طبقات اثر روش TRACI^۱، استفاده شد. همچنین برای تصمیم‌گیری در انتخاب بهترین روش ساخت بین سه گزینه از روش ارزیابی اثرات (End point) IMPACT 2002+ که نتایج در آن به صورت نرمال‌شده و وزن‌دهی شده بوده و امکان به دست آوردن مجموع اثرات را دارد، استفاده شد. این روش ارزیابی اثرات

ارزیابی اثرات عبارت از ارزش‌گذاری بزرگی و اهمیت پیامدهای بالقوه محیط زیستی برای یک سیستم محصول در سراسر چرخه-ی حیات آن است (۱۰). در واقع این مرحله به اطلاعات جمع-آوری شده در مرحله‌ی قبل مفهوم و ارزش می‌بخشد. برای مثال در مرحله‌ی فهرست‌نویسی مشخص می‌شود که تولید یک محصول مقدار مشخصی از یک آلاینده‌ی خاص تولید می‌کند، سپس در مرحله‌ی ارزیابی اثرات چرخه‌ی حیات (LCIA^۱) اهمیت این مقدار آلاینده با بیان تاثیر آن در رده پیامدها (Impact Categories) یا طبقات اثر (مانند تاثیر در کاهش لایه‌ی ازن) تعیین می‌گردد. روش‌های ارزیابی اثرات متعددی وجود دارند. برای انتخاب روش ارزیابی اثر متناسب با یک مطالعه، استفاده از پرکاربردترین و یا بدتر از آن قبول فرض نرم‌افزار توصیه نمی‌شود، اما اگر شخص دیگر در مورد مشابه به روش ارزیابی اثر مناسب رسیده، می‌توان از آن استفاده کرد (۱۴). فلین (۹)، برای مقایسه‌ی اثرات محیط زیستی بام سبز و باغ باران از روش ارزیابی اثرات TRACI^۲ استفاده کرد. TRACI یک روش ارزیابی اثرات چرخه‌ی حیات نقطه میانی است که توسط آژانس حمایت محیط زیست ایالت متحده (U.S. Environmental Protection Agency) و برای داده‌های ورودی ایالات متحده با موقعیت

1-Life Cycle Impact Assessment

2-Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts

شرح داده خواهد شد. در واقع مرحله‌ی چهارم ارزیابی چرخه‌ی حیات (تفسیر) بحث و نتیجه‌گیری این پژوهش خواهد بود.

یافته‌ها

در این بخش ابتدا نتایج ارزیابی اثرات مقایسه‌ای سه روش ساخت مختلف بام سبز و تفسیر آن و سپس نتایج ارزیابی اثرات چرخه‌ی حیات مقایسه‌ای بام معمولی و گزینه‌ی بهینه ساخت بام سبز شرح داده می‌شود.

نتایج ارزیابی آثار محیط زیستی و تفسیر نتایج مرحله‌ی

ساخت سه گزینه‌ی اجرایی بام سبز

آثار محیط زیستی سه نوع روش ساخت به وسیله‌ی نرم‌افزار openLCA یک‌بار با روش ارزیابی چرخه‌ی حیات TRACI و یک‌بار با روش ارزیابی اثرات (End point) IMPACT 2002+ مقایسه و بررسی شدند. نتایج روش TRACI و گزینه‌هایی که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار را در هر رده اثر دارند در جدول (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اکثر طبقات گزینه‌ی سوم و گزینه‌ی اول به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین آثار محیط زیستی را دارند. بخشی از نتایج ارزیابی چرخه‌ی حیات به نام ارزیابی مشارکت (Contribution Analysis) سهم هر فرآیند در ایجاد اثرات را مشخص می‌سازد. در جدول (۸) بخشی از نتایج ارزیابی مشارکت گزینه‌ی اول نشان داده شده است. هدف از این کار پی‌بردن به دلیل اصلی بالا بودن میزان اثر این گزینه در طبقات اثر مختلف به جز اکسیدکننده‌های فتوشیمیایی، سمیت سرطان‌زایی برای انسان و سمیت غیرسرطان‌زایی برای انسان، در بین گزینه‌های دیگر بود و در این جدول تنها فرآیندی که بیش‌ترین درصد سهم در نتایج نهایی را داشته، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عایق فومی و قیراندود کردن بام به ترتیب بیش‌ترین تاثیر را در نتایج داشته‌اند. گزینه‌ی سوم بیش‌ترین میزان اثر را در سه رده‌ی اکسیدکننده‌های فتوشیمیایی، سمیت برای انسان (سرطان‌زایی) و سمیت برای انسان (غیرسرطان‌زایی) داشت (جدول ۷) که دلیل آن‌ها به

ترکیبی از چهار روش IMPACT 2002، Eco-indicator 99، CML و IPCC بوده که می‌تواند اثرات نقطه میانی و نقطه نهایی را نمایش دهد. این روش ارزیابی اثر شامل ۲۲ طبقه‌ی اثر است که در این پژوهش چهار رده از آن‌ها که کل اثرات در یک معضل محیط زیستی را دارند، شامل تغییر آب و هوا (کل)، کیفیت اکوسیستم (کل-تصحیح شده)، سلامت انسان (کل-تصحیح شده) و منابع (Resources) (کل) برای بررسی نتایج در نظر گرفته شدند.

برای بررسی اثرات محیط زیستی گزینه‌ی بهینه و بام معمولی نیز از روش TRACI استفاده شد و در آن به جای طبقات اثر اسیدی شدن و سمیت برای انسان (تاثیر روی دستگاه تنفس، میانگین)، به ترتیب از طبقات اثر اسیدی شدن (اکوسیستم) خشکی (Terrestrial Acidification) و تشکیل ذرات معلق (Particulate Matter Formation) موجود در روش ReCiPe Midpoint (E) استفاده شد. روش ReCiPe Midpoint (E) با همکاری مشاوران CML، PRé، RIVM و Radboud Universiteit Nijmegen ایجاد شده و به صورت نقطه پایانی و نقطه میانی موجود است. عامل معادل در طبقات اثر اسیدی شدن (اکوسیستم) خشکی و تشکیل ذرات معلق موجود در روش ReCiPe Midpoint (E) به ترتیب SO₂ و PM₁₀ (هر دو به واحد جرمی کیلوگرم) می‌باشند.

تفسیر

عبارت است از ارزیابی یافته‌های مرحله دو (در مطالعه‌ی LCI) و یا مراحل ۲ و ۳ (در مطالعه‌ی LCA)، در ارتباط با هدف و حوزه، برای رسیدن به نتایج و توصیه‌ها و تصمیم‌گیری‌ها (۱۰). در آخرین مرحله از ارزیابی چرخه‌ی حیات محدودیت‌های تحقیق و نکات مهم در آن شرح داده شده و نتیجه‌گیری و توصیه‌های لازم بیان می‌گردد. نتایج مرحله سوم ارزیابی چرخه‌ی حیات بام سبز و بام معمولی و نیز نتایج ارزیابی و تفسیر نتایج مقایسه گزینه‌های ساخت در بخش نتایج و مرحله‌ی چهارم ارزیابی چرخه‌ی حیات بام سبز و بام معمولی (تفسیر نتایج) در بخش بحث و نتیجه‌گیری

روش‌ها روش (End point) IMPACT 2002+ است. از بین ۲۲ طبقه‌ی اثر موجود در این روش ۴ رده که نشان‌دهنده‌ی نتایج اثرات کل در یک موضوع محیط زیستی بودند برای بررسی انتخاب شدند. نتایج این بررسی در جدول (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به این جدول، کم‌ترین اثر محیط زیستی مربوط به گزینه‌ی سوم است. بنابراین گزینه‌ی سوم به عنوان گزینه‌ی بهینه در این تحقیق انتخاب شد.

ترتیب مربوط به لایه ژئوتکستایل ساخته شده از فایبرگلاس و پلی‌استر و پلی‌وینیل کلراید بود (جدول ۹). برای مقایسه‌ی بهتر نتایج نیاز به نرمال‌سازی آن است. برخی از روش‌های ارزیابی اثرات عددهای نرمال‌سازی و وزن دهی را به صورت آماده در اختیار کاربران قرار می‌دهند. در نرم‌افزار openLCA برای برخی روش‌ها اعداد نرمال‌سازی و وزن‌دهی از پیش اعمال شده و تمام طبقات اثر بدون واحد شدند. از جمله این

جدول ۷- نتایج ارزیابی ۳ روش ساخت با روش ارزیابی اثرات TRACI

Table 7- Assessment results of 3 construction ways by TRACI impact assessment method

گزینه با بیش‌ترین میزان اثر در هر رده	گزینه با کم‌ترین میزان اثر در هر رده	گزینه‌ی سوم	گزینه‌ی دوم	گزینه‌ی اول	عامل معادل	رده‌های اثر
گزینه‌ی اول	گزینه‌ی سوم	۲/۰۶	۲/۱۰	۲/۶۴	مول H^+	اسیدی شدن
گزینه‌ی اول	گزینه‌ی سوم	۱/۲۷	۱/۵۲	۱/۹۴	کیلوگرم -D ۲/۴	سمیت برای اکوسیستم
گزینه‌ی اول	گزینه‌ی سوم	۳/۴۳e-۰۳	۴/۰۹e-۰۳	۴/۴۵e-۰۳	کیلوگرم N	خوراک‌وری
گزینه‌ی اول	گزینه‌ی دوم	۱/۰۶e+۰۱	۹/۶۷	۱/۲۷e+۰۱	کیلوگرم CO_2	گرمایش جهانی
گزینه‌ی اول	گزینه‌ی سوم	۲/۳۶e-۰۷	۱/۳۷e-۰۶	۱/۴۸e-۰۶	کیلوگرم CFC-11	کاهش لایه‌ی ازن
گزینه‌ی سوم	گزینه‌ی دوم	۲/۶۳e-۰۲	۲/۱۸e-۰۲	۲/۵۸e-۰۲	کیلوگرم NO_x	اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی
گزینه‌ی سوم	گزینه‌ی اول	۷/۲۱e-۰۲	۱/۰۵e-۰۲	۶/۹۷e-۰۳	کیلوگرم بنزن	سمیت برای انسان (سرطان‌زایی)
گزینه‌ی سوم	گزینه‌ی اول	۸/۷۴e+۰۱	۴/۳۰e+۰۱	۲/۷۴e+۰۱	کیلوگرم تولوئن	سمیت برای انسان (غیر سرطان‌زایی)
گزینه‌ی اول	گزینه‌ی سوم	۸/۱۵e-۰۳	۸/۴۵e-۰۳	۱/۰۷e-۰۲	کیلوگرم $PM_{2.5}$	سمیت برای انسان (تاثیر روی دستگاه تنفس، میانگین)

جدول ۸- فرآیندها با بیش‌ترین سهم در برخی طبقه‌های اثر در گزینه‌ی اول

Table 8- Processes with the most contribution in some impact categories of first option

درصد سهم در طبقه‌ی اثر	نام فرآیند با بیش‌ترین سهم در طبقه‌ی اثر	رده‌های اثر
۳۹/۴	Polystyrene foam slab, 10% recycled	اسیدی شدن
۶۰	Polystyrene foam slab, 10% recycled	سمیت برای اکوسیستم
۴۳	Bitumen adhesive compound, hot	خوراک‌وری
۴۶/۷	Polystyrene foam slab, 10% recycled	گرمایش جهانی
۸۶/۲۲	Bitumen adhesive compound, hot	کاهش لایه‌ی ازن
۲۸	Polystyrene foam slab, 10% recycled	سمیت برای انسان (تاثیر روی دستگاه تنفس، میانگین)
۳۹/۹۲	Polystyrene foam slab, 10% recycle	تشکیل ذرات معلق
۳۹/۳۹	Polystyrene foam slab, 10% recycle	اسیدی کردن اکوسیستم خشکی

جدول ۹- فرآیندها با بیش‌ترین سهم در برخی طبقه‌های اثر در گزینه‌ی سوم

Table 9- Processes with the most contribution in some impact categories of third option

درصد سهم در طبقه‌ی اثر	نام فرآیند با بیش‌ترین سهم در طبقه‌ی اثر	رده‌های اثر
۳۸/۳۹	Polyvinylchloride, suspension polymerised	اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی
۸۷/۸۶	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up	سمیت برای انسان (سرطان‌زایی)
۵۵/۶۲	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up	سمیت برای انسان (غیر سرطان‌زایی)

جدول ۱۰- نتایج ارزیابی سه روش ساخت با روش ارزیابی اثرات (End point) IMPACT 2002+

Table 10- Assessment results of 3 construction ways by IMPACT 2002+(End point) impact assessment method

گزینه‌ی سوم	گزینه‌ی دوم	گزینه‌ی اول	رده‌های اثر
۹/۶۶e-۰۴	۸/۸۳e-۰۴	۱/۱۲e-۰۳	تغییر آب و هوا (کل)
۷/۰۳e-۰۵	۱/۰۶e-۰۴	۱/۳۲e-۰۴	کیفیت اکوسیستم (کل - تصحیح شده)
۷/۹۳e-۰۴	۷/۱۹e-۰۴	۸/۴۹e-۰۴	سلامت انسان (کل - تصحیح شده)
۱/۹۲e-۰۳	۲/۳۳e-۰۳	۳/۱۶e-۰۳	منابع (کل)
۳/۷۵e-۰۳	۴/۰۴e-۰۳	۵/۲۶e-۰۳	جمع

نتایج ارزیابی چرخه‌ی حیات گزینه‌ی بهینه و بام معمولی

جهانی مثبت بودن آثار محیط زیستی بام معمولی به دلیل سوزاندن (بهداشتی) قیر بعد از اتمام عمر آن است. طبق نتایج، در ۴ طبقه اثر گرمایش جهانی، اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی، تشکیل ذرات معلق و سمیت برای انسان (سرطان‌زایی) اثر محیط زیستی منفی بام سبز بیش‌تر از بام معمولی است که بر اساس نتایج ارزیابی مشارکت، دلایل اصلی آن در ۳ مورد اول مربوط به ساخت عایق پی وی سی و در مورد آخر ورق ژئوتکستایل (فایبرگلاس و پلی‌استر) می‌باشند.

نتایج بررسی آثار محیط زیستی بام سبز (گزینه‌ی بهینه) و بام معمولی به وسیله‌ی نرم‌افزار openLCA در ۷ طبقه اثر از روش TRACI و دو طبقه اثر از روش ReCiPe Midpoint (E) در جدول (۱۱) نشان داده شده است. علامت منفی در نتایج LCA به معنی داشتن آثار مثبت محیط زیستی است. در رده‌ی اثر سمیت برای اکوسیستم و غیر سرطان‌زایی مثبت بودن آثار محیط زیستی بام سبز به ترتیب به دلیل دفن بهداشتی پلی‌اتیلن و سوزاندن (بهداشتی) پلی‌وینیل کلراید و در رده‌ی اثر گرمایش

جدول ۱۱- مقایسه‌ی نتایج ارزیابی چرخه‌ی حیات بام سبز و بام معمولی با روش‌های ارزیابی اثرات

TRACI و ReCiPe Midpoint (E)

Table 11- Comparing Life Cycle Assessment results of green roof and normal roof with TRACI and IMPACT 2002 + (End point) impact assessment methods

رده‌های اثر	عامل معادل	بام سبز	بام معمولی	بام با کم‌ترین اثر محیط زیستی (میزان تفاوت در نتایج)
اسیدی شدن خشکی	کیلوگرم SO ₂	۳/۳۸e-۰۲	۳/۶۷e-۰۲	بام سبز (۰/۰۰۳)
سمیت برای اکوسیستم	کیلوگرم ۲/۴-D	-۸/۲۳e-۰۲	۳/۳۰	بام سبز (۳/۳۸)
خوراک‌وری	کیلوگرم N	۱/۹۱e-۰۳	۵/۹۲e-۰۳	بام سبز (۰/۰۰۴)
گرمایش جهانی	کیلوگرم CO ₂	۶/۰۶e-۰۱	-۵/۳۷	بام معمولی (۵/۹۷۶)
کاهش لایه‌ی ازن	کیلوگرم CFC-11	۲/۵۴e-۰۷	۳/۸۵e-۰۶	بام سبز (۰/۰۰۰۰۳۵)
اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی	کیلوگرم NO _x	۲/۲۲e-۰۲	۱/۵۹e-۰۲	بام معمولی (۰/۰۰۶۳)
سمیت برای انسان (سرطان‌زایی)	کیلوگرم بنزن	۴/۲۷e-۰۲	۶/۷۶e-۰۳	بام معمولی (۰/۰۰۳۹)
سمیت برای انسان (غیر سرطان‌زایی)	کیلوگرم تولوئن	-۷/۴۵e+۰۱	۲/۱۷e+۰۱	بام سبز (۹۶/۲)
تشکیل ذرات معلق	کیلوگرم PM ₁₀	۱/۴۸e-۰۲	۱/۱۱e-۰۲	بام معمولی (۰/۰۰۳)

- بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، مرحله تفسیر ارزیابی چرخه‌ی حیات در این بخش از تحقیق بیان شده است. تفسیر شامل بررسی نتایج ارزیابی اثرات با هدف دست یافتن به نتایج و توصیه‌ها در رابطه با هدف و حوزه‌ی کاری است. بررسی نکات مهم و تاثیرگذار بر نتایج و بیان محدودیت‌های تحقیق نیز در این بخش از LCA شرح داده می‌شود.

طبق نتایج نرم‌افزار ارزیابی چرخه‌ی حیات openLCA مشاهده می‌شود که با ایجاد بام سبز بر روی بام معمولی در طبقات اثر سمیت برای انسان (غیر سرطان‌زایی) و سمیت برای اکوسیستم به ترتیب از تولید ۹۶/۲ و ۳/۳۸ کیلوگرم آلاینده جلوگیری خواهد شد. هم‌چنین در طبقات اثر خوراک‌وری، اسیدی شدن خشکی و کاهش لایه ازن ایجاد بام سبز به نسبت بار آلودگی کم‌تری خواهد داشت. در طبقه‌ی اثر گرمایش جهانی، در چرخه‌ی حیات بام معمولی عمل سوزاندن قیر در مرحله‌ی بعد از استفاده باعث شده که تولید آلاینده‌هایی که منجر به افزایش دمای کره‌ی زمین می‌شوند (با عامل معادل CO₂) حدود ۵ کیلوگرم کم‌تر باشد. اما اگر بام سبز جایگزین بام معمولی گردد، ۰/۶۰۶ کیلوگرم آلاینده تولید خواهد شد. از سویی بر اساس نتایج نرم‌افزار در طبقات اثر اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی، سمیت برای انسان (سرطان‌زایی) و تشکیل ذرات معلق نیز، ایجاد بام سبز مقدار آلاینده‌های بیش‌تری را به محیط زیست وارد می‌کند. در این تحقیق افزایش عمر غشای بام در فهرست نویسی ارزیابی چرخه‌ی حیات بام سبز وارد شد، اندازه‌گیری فواید دیگر بام سبز (از جمله کاهش آلاینده‌های هوا، کاهش نیاز به مصرف انرژی) در فهرست نویسی مرحله‌ی استفاده از بام سبز می‌تواند این نتایج را بهتر کند. برای مثال میزان جذب NO₂ و CO₂ در بام سبز توسط کلارک^۱ و همکاران (۱۵) و گتر^۲ و همکاران (۱۶)، به ترتیب ۲۷۰ و ۱۸۷/۵ گرم در مترمربع در سال اندازه‌گیری شد. بنابراین بام سبز در طول عمر خود به ترتیب

۱۳/۵ و ۹/۳۷۵ کیلوگرم از گازهای NO₂ و CO₂ را از هوا حذف خواهد کرد. با تلفیق این نتایج با نتایج نرم‌افزار در طبقات اثر گرمایش جهانی و اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی، می‌بینیم که ایجاد بام سبز به ترتیب از تولید ۳/۴ و ۱۳/۶ کیلوگرم آلاینده جلوگیری می‌کند.

تولید فایبرگلاس و پلی‌استر و پی‌وی‌سی هم در نتایج مقایسه‌ی سه نوع روش ساخت بام سبز نتایج را به ضرر گزینه‌ی سوم (بهینه) کرده بودند و هم در مقایسه‌ی بام سبز با بام معمولی، بنابراین ساخت بام سبز با لایه‌هایی که آثار محیط زیستی کم‌تری داشته باشند از توصیه‌های این تحقیق است. هم‌چنین با توجه به این‌که در اکثر طبقات اثر، آثار محیط زیستی بام سبز کم‌تر از بام معمولی بوده است، می‌توان بیان کرد که نتایج این تحقیق نیز مانند نتایج سیز و همکاران (۱)، بایانچینی و هواج (۲) و کاسارنو و ریاز (۳) برتری بام سبز به بام معمولی از نظر محیط زیستی را تایید می‌کند. طبق نتایج چرخه‌ی حیات در مطالعه کاسارنو و ریاز (۳)، بام‌های سبز بهتر از بام‌های معمولی بودند و دلیل آن کاهش مصرف انرژی ساختمان و افزایش عمر غشای بام بود. در نتیجه‌ی ارزیابی چرخه‌ی حیات در مطالعه سیز و همکاران (۱)، در طبقات اثر خوراک‌وری، اسیدی‌سازی، اکسید کننده‌ی فتوشیمیایی، سمیت برای اکوسیستم خشکی، سمیت برای اکوسیستم آبی دریا، سمیت برای اکوسیستم آبی - آب شیرین، سمیت برای انسان، کاهش لایه‌ی ازن، گرمایش جهانی و تجزیه‌ی غیرزیستی، با ایجاد بام سبز به جای بام معمولی، همه‌ی اثرات محیط زیستی از جمله خوراک‌وری و تجزیه‌ی غیرزیستی (Abiotic Depletion) بین ۱/۰٪ تا ۵/۳٪ کاهش یافتند. بایانچینی و هواج (۲)، نیز در تحقیقات خود نشان دادند که آلودگی هوای ناشی از ایجاد یک بام سبز بین ۱۳ تا ۳۲ سال بعد از ایجاد آن جذب می‌شود. هدف اول این تحقیق، یافتن گزینه‌ی بهینه‌ی ساخت بام سبز بود

1- Clark

2- Getter

- Green Roofs. Environmental Science and Technology, 40(13): 4312-4316.
2. Bianchini, F., and Hewage, K., 2012. How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. Building and Environment, 48: 57-65.
 3. Kosareo, L, and Ries, R., 2007. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. Building and Environment, 42(7): 2606-2613.
 4. Mahmoodi Zarandi, M., Pakari, N., and Bazahang, A. 2011. Green roof executive system. Architectural Thinking, 7(26): 7-13. (in persian)
 5. Bianchini, F., 2012. Influence of Construction and Demolition (C&D) Waste on Green Roof Performance. A thesis for the degree of Master of Applied Science. The College of Graduate Studies (Civil Engineering). The University of British Columbia.
 6. Abdollahi far, M., Fatehi far, A, and Vosoogh Mahmoodi, S. 2009. Feasibility of using green roofs in cities, Third Specialized Conference and Exhibition of Environmental Engineering, Tehran. (in persian)
 7. Lockett, K. 2009. Green roof construction and maintenance. McGraw-Hill.
 8. Rasavian, M.T., Ghafoori poor, A., and Rasavian, M. 2010. Green Roofs. Land use planning. 10: 137-160. (in persian)
 9. Flynn, K.M., 2011. Evaluation of Green Infrastructure Practices Using Life Cycle Assessment. A thesis for the degree of Master of Science in Sustainable Engineering.

و مشخص شد که روش ساختی که توسط شرکت (ج) معرفی شده، بهتر از سایر گزینه‌ها است. بررسی و مقایسه آثار محیط زیستی بام سبز و بام معمولی هدف دوم در این تحقیق بود. با توجه به نتایجی که در این تحقیق به دست آمد، بام سبز در اکثر طبقات اثر آثار منفی محیط زیستی کمتری نسبت به بام معمولی دارد و این نتایج را می‌تواند با اندازه‌گیری فواید ایجاد بام سبز (برای مثال کاهش کمی و کیفی میزان رواناب) و نیز استفاده از مواد جایگزین با آثار منفی محیط زیستی کم‌تر در لایه‌های آن بهبود داد.

۵- پیشنهادات

نوع بام معمولی می‌تواند عایق پی‌وی‌سی یا ورق قیر اصلاح شده (با نام تجاری ایزوگام) و یا موزاییک یا هر روش عایق‌سازی دیگری باشد. در این تحقیق به دلیل نبود اطلاعات کافی از مواد و فرآیندهای ورودی و مواد منتشره به محیط زیست در هنگام ساخت لایه‌های مذکور روشی ساده‌تر (قیر داغ) در نظر گرفته شد. همچنین ورودی‌های نرم‌افزار همه فرآیندهای آماده (از پیش انجام شده) بودند. در تحقیقات بعدی می‌توان جزئیات تک تک لایه‌ها و سایر فرآیندها (مانند نقل و انتقال مواد و افراد) را با انجام مطالعات و بررسی‌های میدانی دقیق در نظر گرفت. از سویی گزینه‌های ساخت به ۳ گزینه محدود شده‌است، چه بسا استفاده از مواد دیگر و یا حتی تلفیقی از این لایه‌ها برای ایجاد بام سبز شاید آثار محیط زیستی کمتری داشته باشد. اندازه‌گیری فواید دیگر بام سبز نیز در تحقیقات بعدی توصیه می‌گردد، برای مثال، بررسی کاهش کمی و کیفی میزان رواناب به صورت عملی قابل بررسی است. اندازه‌گیری فواید اقتصادی ایجاد بام سبز نیز از توصیه‌های این تحقیق است.

منابع

1. Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., and Pressnail, K., 2006. Comparative Life Cycle Assessment of Standard and

14. Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponisioen, T., and Meijer, M., 2013. Introduction to LCA with SimaPro. PRÉ. Pp 80.
15. Clark, C., Adriaens, P., and Talbot, F., B. 2008. Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental science & technology*, 42(6): 2155-2161.
16. Getter, K.L., Rowe, D.B., Robertson, G.P., Cregg, B.M., and Andresen, J.A., 2009. Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. *Environmental Science and Technology*, 43(19): 7565-7570.
10. Iranian Institute of Standards and Industrial Research, 2007, ISO 14040 (Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework), Tehran. (in persian)
11. Iranian Institute of Standards and Industrial Research, 2007, ISO 14044 (Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework), Tehran. (in persian)
12. Soltani, A., Rajabi, M.H., Zineli, E., and Soltani, E. 2010. Environmental Impact Assessment of Crop Production Using LCA: Wheat in Gorgan. *Electronic Journal of Crop Production*, 3 (3): 201-218. (in persian)
13. Bazregar, A. B. 2011. Environmental Assessment of Sugar Beet Production Systems in Khorasan by LCA Method. Doctoral dissertation in Agriculture, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (in persian)

