

بهینه سازی دیوار خاک مسلح با تسمه فلزی با بهره‌گیری از الگوریتم GWO

عباس باقری سرشکی ۱، علی درخشانی ۲

۱- دانشجوی تحصیلات تکمیلی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه

شاهد، تهران، ایران، a.bagheri@shahed.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران،

ایران، adara@shahed.ac.ir , derakhshani85@gmail.com

خلاصه

در چند دهه اخیر با توجه به کمبود منابع و با عنایت به اهمیت موضوع توسعه پایدار، کارفرمایان تمایل زیادی به بهینه سازی در طراحی و احداث زیرساخت های عمرانی نشان داده اند. بر همین اساس در پژوهش حاضر به بهینه سازی یکی از مهمترین مستحقات ژئوتکنیکی یعنی دیوار خاک مسلح با مسلح کننده فلزی پرداخته شده است. در پژوهش حاضر علاوه بر کمینه سازی هزینه احداث دیوار خاک مسلح با تسمه فلزی، حساسیت تابع هزینه نسبت به تغییرات قیمت واحد مصالح اصلی سازنده دیوار و نیز اثر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک مورد بررسی قرار گرفت. با به کارگیری الگوریتم GWO برای بهینه سازی طراحی دیوار با ارتفاع ۵٫۵ متر هزینه ها تا ۲۶٫۶٪ نسبت به روش آیین نامه FHWA کاهش یافت.

کلمات کلیدی: بهینه سازی، الگوریتم فرا ابتکاری GWO، دیوار حائل، دیوار خاک مسلح، تسمه فولادی.

۱. مقدمه

امروزه یکی از موضوعات جذاب در علوم مهندسی استفاده بهینه از منابع است. برای بهینه‌یابی پارامترهای هندسی و یا غیر هندسی (بهینه‌سازی تابع هدف) در مهندسی عمران روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها غیر دقیق، الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که دارای مکانیزم‌های خروج از بهینه محلی می‌باشند و قابل کاربرد در طیف وسیعی از مسائل هستند. الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر پایه هوش ازدحامی می‌باشد و در این پژوهش از این الگوریتم بهره گرفته شده است.

به طور معمول، هزینه‌ی المان‌های تسلیح ۴۵ تا ۶۵ درصد، حجم عملیات خاکریزی ۳۰ تا ۴۵ درصد و نوع پوسته ۵ تا ۱۰ درصد کل هزینه پروژه را به خود اختصاص می‌دهند. در دیوارها و شیروانی‌های مسلح بلند هزینه‌ی نسبی مصالح تسلیح بیشتر و هزینه عملیات خاکی کم‌تر است و این هزینه متناسب با ارتفاع سازه متغیر است [۱].

عمده مقالاتی که در حوزه بهینه‌سازی برای دیوار خاک مسلح انتشار یافته است به بهینه‌سازی دیوارهای خاک مسلح با تسمه پلیمری پرداخته‌اند. همچنین در تعدادی از پژوهش‌ها، بهینه‌سازی دیوارهای خاک مسلح با تسمه فلزی مورد مطالعه قرار گرفته است.

مطالعات انجام شده بر روی ژئوسنتتیک‌ها عبارت‌اند از: کرنر و سونگ که به بهینه‌سازی دیوار خاک مسلح با ژئوسنتتیک پرداختند [۲]، باسودهار و همکارانش با استفاده از Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) توانستند تا ۸ درصد هزینه را نسبت به طراحی با روش آیین‌نامه FHWA کاهش دهند [۳]. ماناهیلو و همکاران با به خدمت‌گیری الگوریتم هارمونی Harmonic Search Algorithm (HSA) و استفاده از روش تحلیل دینامیکی توانستند هزینه طراحی دیوار خاک مسلح با ژئوسنتتیک را تا ۳۰ درصد کاهش دهند [۴]. در سال ۲۰۱۵ مطلب نژاد و همکاران نشان دادند که با بهره‌گیری از محاسبات نرم می‌توان هزینه‌ها را کاهش داد، آنها نشان دادند که استفاده از الگوریتم هارمونی بهتر از روش کمینه‌سازی نامحدود متوالی (SUMT) است [۵]. در پژوهش‌های گذشته که بهینه‌سازی دیوار خاک مسلح با تسمه فولادی را مورد بررسی قرار داده‌اند، جهت تسهیل دیوار با سطح افقی (شکل ۲) در نظر گرفته شده است که در این پژوهش دیوارهای با خاکریز شیب‌دار متداول مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تعداد محدودی از مطالعات در حوزه بهینه‌سازی دیوارها، بر روی دیوار خاک مسلح با تسمه فلزی انجام شده است، غیاثیان و ال‌دینی به

شکل ۱ مقطع عرضی دیوار خاک مسلح و نیروهای وارد بر آن را نمایش می‌دهد. پارامترهای مختلف نشان داده شده با کمک روابط زیر قابل محاسبه هستند.

ضریب فشار افقی خاک با سطح شیب دار:

$$\theta = \text{زاویه سطح مشترک خاک و دیوار با افق می‌باشد}$$

$$\delta = \text{زاویه اصطکاک بین توده مسلح شده و خاکریز پشت دیوار}$$

$$\beta = \text{زاویه خاکریز پشت دیوار با افق}$$

$$K_{af} = \frac{\sin^2(\varphi_f + \theta)}{\Gamma \sin^2(\theta) \sin(\theta - \delta)} \quad (1)$$

$$\Gamma = \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_{bf} + \delta) \sin(\varphi_f - \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + \beta)}} \right] \quad (2)$$

$$h = H + L \times \tan(\beta) \quad (3)$$

نیروی افقی وارد بر دیوار از جانب خاکریز پشت دیوار:

$$F_{TH} = 0.5 \times K_{af} \times \gamma_r \times h^2 \times \cos(\beta) \quad (4)$$

نیروی قائم وارد بر دیوار از جانب خاکریز پشت دیوار:

$$F_{TV} = 0.5 \times K_{af} \times \gamma_r \times h^2 \times \sin(\beta) \quad (5)$$

وزن توده خاک مسلح:

$$V_1 = H \times L \times \gamma_r \quad (6)$$

وزن توده مثلثی شکل بالای محدوده مسلح شده:

$$V_2 = 0.5 \times L \times \tan(\beta) \times L \times \gamma_r \quad (7)$$

زاویه اصطکاک توده مسلح و خاک پی:

$$\mu = \min(\tan\varphi_f, \tan\varphi_r) \quad (8)$$

حداکثر گشتاور محرک حول نقطه A در شکل ۲:

$$M_{OA} = F_{TH} \times \frac{h}{3} \quad (9)$$

حداقل گشتاور مقاوم حول نقطه A:

$$M_{RA} = V_1 \times \frac{L}{2} + V_2 \times \frac{2L}{3} + F_{TV} \times L \quad (10)$$

حداکثر خروج از مرکزیت که باید کوچکتر از $L/4$ باشد:

$$e_L = \frac{L}{2} - \left(\frac{M_{RA}}{M_{OA}} \right) \quad (11)$$

حداکثر تنش اعمالی بر پی:

$$\sigma_v = \frac{V_2 + V_1 + F_{TV}}{L - 2 \times e_t} \quad (12)$$

۲-۲- محاسبه پایداری داخلی:

در این بخش وضعیت پایداری داخلی توده مسلح شده که در پایداری خارجی همانند یک جسم صلب در نظر گرفته شده بود، مورد بررسی قرار می گیرد. مقطع عرضی دیوار خاک مسلح و ناحیه های محرک و مقاومت کننده در شکل ۲ نشان داده شده اند. پارامترهای مربوطه از طریق فرمول های زیر محاسبه می گردند.

ارتفاع خاک مورد استفاده در پایداری داخلی:

$$H_1 = \frac{\tan(\beta)(0.3H)}{1 - 0.3\tan(\beta)} \quad (13)$$

K_r فشار جانبی خاک در توده مسلح است.

حداکثر نیروی وارد به تسمه:

$$T_{max} = \sigma_h \times \gamma_r \quad (15)$$

طول موثر هر تسمه:

$$L_e = L - L_a \quad (16)$$

L_a طول تسمه مدفون در زون محرک که با توجه به شکل ۲ تعیین می شود.

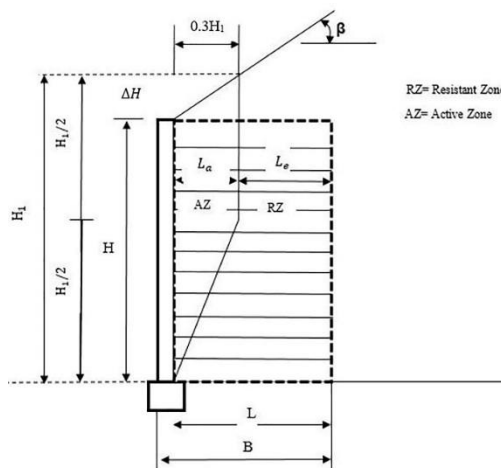
مقاومت در برابر بیرون کشیدگی تسمه:

$$P_r = \alpha \times L_e \times b \times 2 \times F^* \times \gamma_r (Z + S) \quad (17)$$

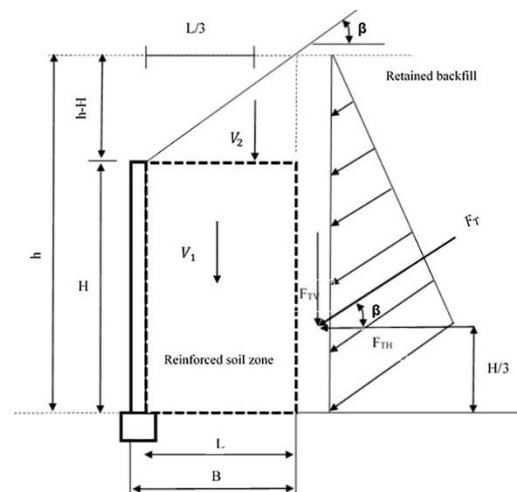
F^* ضریب مقاومت بیرون کشیدگی

نیروی قابل تحمل برای هر تسمه:

$$T_r = F_Y \times b \times t \quad (18)$$



شکل ۲- مقطع عرضی دیوار و محدوده های محرک و مقاومت کننده (روش FHW)



شکل ۱- مقطع عرضی دیوار و نیروهای وارد بر آن (روش FHWA)

۳- الگوریتم GWO

ابداع الگوریتم بهینه‌سازی GWO بر اساس تحقیق کانیس لوپوس مبتنی بر رفتار گرگ‌های خاکستری بوده است. الگوریتم GWO که در سال ۲۰۱۴ ارائه شد از رفتار گرگ‌های خاکستری در هنگام شکار تقلید می‌کند. گرگ‌های خاکستری در رأس شکارچیان قرار دارند. بدین معنی که آنها در بالای زنجیره غذایی هستند. گرگ‌های خاکستری بیشتر ترجیح می‌دهند به صورت گروهی زندگی کنند. در سلسله مراتب گروه گرگ‌ها، گرگی که از نظر مدیریت گروه برتری دارد و نقش رهبر گروه را ایفا می‌کند به عنوان گرگ آلفا شناخته می‌شود. گرگ‌هایی که به گرگ آلفا در تصمیم‌گیری کمک می‌کنند به عنوان گرگ بتا شناخته می‌شوند ولی باید به گرگ آلفا احترام بگذارند و تنها به گرگ‌های پایین دست خود می‌توانند دستور دهند، گرگ‌های بتا بیشترین شانس برای جانشینی گرگ آلفا را دارند. پایین‌ترین سطح گروه هم امگا هست که آخرین گروه هستند که می‌توانند غذا بخورند و همیشه فرمان بردار گرگ‌های دیگر هستند و نقش مهمی در گروه ندارند ولی مشاهده شده با از بین رفتن امگا گروه با جنگ داخلی و تخلیه خشونت روبرو شده است. اگر گرگی جزو سه گروه مذکور قرار نگیرد زیر دست گرگ دلنا نام می‌گیرد که باید به آلفا و بتا گزارش دهد و تنها به گروه امگا دستور دهد. پیشاهنگ‌ها و نگهبان‌ها به این دسته تعلق دارند [۸].

۳-۱ نحوه کار الگوریتم

الف) جست‌وجو (اکتشاف) شکار :

در هنگام جست‌وجو گرگ‌ها از یکدیگر دور می‌شوند تا شکار را ردیابی کنند ($|A| < 1$) در حالی که پس از ردیابی شکار، گرگ‌ها در فاز حمله به یکدیگر نزدیک می‌شوند ($|A| > 1$). به این پروسه واگرایی در جست‌وجو - همگرایی در حمله می‌گویند.

ب) فرایند شکار گرگ‌های خاکستری :

شامل ۳ فاز اصلی است: مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن (Tracking and approaching)

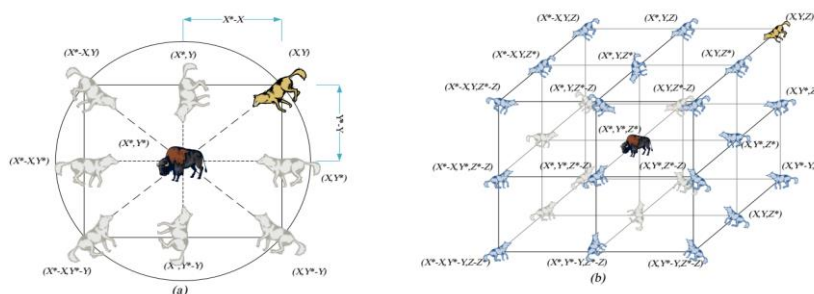
نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند (Pursuing and encircling)

ج) مدل سازی فرایند شکار :

گرگ‌های خاکستری توانایی تخمین موقعیت شکار را دارند. برای مدل سازی این فرایند مراحل زیر را ملاحظه نمایید:

در جست‌وجوی اولیه هیچ ایده‌ای در مورد موقعیت شکار نداریم. فرض می‌شود گرگ‌های α , β , δ دانش اول بهتری در خصوص موقعیت شکار (نقطه بهینه جواب) دارند. موقعیت این سه کاندید جواب به صورت زیر تعیین می‌شود:

در واقع گرگ‌های α , β , δ موقعیت شکار را تخمین می‌زنند اما بقیه گرگ‌ها موقعیت خود را به صورت تصادفی پیرامون شکار بروز می‌کنند. موقعیت ۳ جواب برتر همواره حفظ می‌شود. در شکل ۵ نمایش دو بعدی و سه بعدی بردارهای موقعیت گرگ‌ها و موقعیت‌های ممکن برای حرکت بعدی نشان داده شده است.



شکل ۵ نحوه قرارگیری گرگ‌ها در فضای دو بعدی و سه بعدی

^۱Canis lupus

(د) مدل کردن فرایند حمله (attacking):

وقتی شکار توسط گرگ ها احاطه شده و از حرکت بایستد حمله به رهبری گرگ alpha شروع می شود. مدل کردن این فرایند با استفاده از کاهش بردار a انجام می شود. از آنجا که A برداری تصادفی در بازه $[-20, 20]$ است، با کاهش a ، بردار ضرایب A هم کاهش می یابد. اگر $|A| > 1$ باشد، گرگ alpha به شکار (و بقیه گرگ ها) نزدیک می شود و اگر $|A| < 1$ گرگ از شکار (و بقیه گرگ ها) دور خواهد شد. الگوریتم GWO الزام دارد که تمام گرگ ها موقعیت خود را برحسب موقعیت گرگ های α, β, δ بروز کنند سیکل ها تکرار می شوند تا گرگ ها در هر تکرار به طعمه نزدیک تر شده و تا در نهایت به بهترین جواب برسند. البته سرعت و میزان دقت رسیدن به جواب به عواملی مانند میزان دشواری مساله، مقادیر ثابت های ورودی الگوریتم و عوامل سخت افزاری وابسته است.

۴- مدل طراحی بهینه دیوار های خاک مسلح

منظور از تابع هدف در این شکل برای مساله حاضر همان تابع هزینه است که توسط قیود بخش ۴-۱ و ۴-۲ محدود شده است. میزان تخطی ضرایب اطمینان بدست آمده از ضرایب اطمینان لازم به عنوان تابع جریمه در نظر گرفته شده اند. برای طراحی بهینه دیوار خاکی مسلح دو کد مجزا در محیط برنامه نویسی MATLAB نوشته شده که پس از تلفیق با یکدیگر منجر به تولید جواب بهینه برای طراحی دیوار خواهند شد. کد اول مربوط به شبیه سازی رفتار دیوار خاک مسلح بوده و کد دوم مربوط به الگوریتم GWO است.

۴-۱- قیود مساله

اولین گروه از محدودیت ها مربوط به کران بالا و پایین هر متغیر می باشد و در هنگام تولید مجموعه جواب ها مورد توجه قرار گرفته اند. مقادیر کران ها در جدول ۳ آمده است.

دومین گروه از محدودیت ها که در جدول ۴ آمده مربوط به ضرایب اطمینان محاسبه شده است که باید از ضرایب اطمینان لازم بزرگتر باشند.

	Sv (m)	L (m)	b (m)	t (m)	Sh (m)
min	۰,۲	۳	۰,۰۲	۰,۰۰۲	۰,۳
max	۰,۸	۱۰	۰,۱	۰,۰۰۵	۰,۷۵

$1 < \frac{F_{TH}}{(V_2 + V_1)}$	(۳۱)
$1 < \frac{q_u}{\sigma_v}$	(۳۲)
$\frac{L}{4} < e_L$	(۳۳)
$1 < \frac{T_r}{T_{max}}$	(۳۴)
$1 < \frac{P_r}{T_{max}}$	(۳۵)

در نهایت تابع هزینه مورد استفاده مطابق فرمول ۱۹ می باشد که وابسته به حجم عملیات خاکریزی و المان های تسلیح است. هدف کمینه نمودن تابع هزینه خواهد بود. مقادیر ضرایب هزینه $C1, C2, C3$ در جدول ۱ ارائه شده است.

$$Min Cost = (C1 \times n \times b \times t \times L \times \gamma_{STEEL}) + (C2 \times \gamma_r \times h \times L) + (C3 \times n \times b \times t \times 0.1 \times \gamma_{STEEL}) \quad (19)$$

n تعداد تسمه در طول یک متر دیوار بوده و طول هر زبانه برابر با ۰,۱ متر در نظر گرفته شده است. زبانه قطعه ای U شکل از جنس تسمه و با ضخامت و عرض برابر با تسمه است که در هنگام ساخت بلوک نما در بتن قرار می گیرد و برای اتصال تسمه به بلوک نما به کار می رود.

به منظور ارزیابی عملکرد روش شبیه سازی - بهینه سازی (MSEW - GWO) نسبت به سایر روش های طراحی بهینه جهت صرفه جویی اقتصادی در اجرای دیوار های خاکی مسلح، طراحی چند نمونه دیوار مورد بررسی قرار گرفت. طراحی دیوار های مذکور مطابق با شرایط هندسی شکل ۲ و با ارتفاع های مختلف مطابق با مقادیر موجود در جدول ۱ با دو روش FHWA و MSEW-GWO انجام گردیده و نتایج آنها در جدول ۵ با هم مقایسه شده است. مشاهده می شود که هزینه مربوط به نتایج حاصل از این پژوهش از ۸ تا حداکثر تا ۲۲ درصد کمتر از روش FHWA می باشد. به علاوه در آیین نامه FHWA نسبت $\frac{L}{H}$ برابر با ۰٫۸ توصیه شده است و همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود نسبت $\frac{L}{H}$ برای مقادیر بهینه در مطالعه حاضر بین اعداد ۰٫۷۴ تا ۰٫۸۴ متغیر است که مطابقت خوبی با توصیه مذکور دارد

جدول ۵- مقایسه مقادیر بدست آمده از پژوهش حاضر و طراحی بر مبنای (FHWA)

	$H (m)$	$S_v (m)$	$L (m)$	$b (m)$	$t (m)$	$Sh (m)$	Cost	Cost reduction (%)
FHWA	۵٫۵	۰٫۸	۴٫۹	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۷۵	۱۸۰	۲۶٫۵۹
Current study		۰٫۷۴	۴٫۱۶	۰٫۳	۰٫۰۰۴	۰٫۴۷	۱۳۲	
FHWA	۷	۰٫۸	۶٫۱	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۷۵	۲۹۳	۲۵٫۶۳
Current study		۰٫۷۳	۵٫۱۹	۰٫۴	۰٫۰۰۴	۰٫۶۲	۲۱۷٫۹	
FHWA	۸٫۵۳	۰٫۷۶	۷٫۳	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۷۵	۴۴۷	۲۲٫۱
Current study		۰٫۸	۶٫۳۹	۰٫۴	۰٫۰۰۴۸	۰٫۶۷	۳۵۰	
FHWA	۱۰	۰٫۶	۸٫۵	۰٫۵	۰٫۰۰۴	۰٫۷۵	۷۲۰	۱۴٫۰۵
Current study		۰٫۷۹	۸٫۴۶	۰٫۳	۰٫۰۰۴	۰٫۴۹	۶۱۸	

۶- نتیجه گیری

الف- در این پژوهش روش ترکیبی شبیه سازی-بهینه ساز (MSEW -GWO) برای طراحی بهینه دیوار های خاکی مسلح ارائه گردید. مشاهده شد که مقدار تابع هدف (هزینه تمام شده) حاصل از این پژوهش از مقادیر حاصل از روش FHWA کمتر بوده و روش مورد استفاده شرایط اقتصادی مناسب تری را فراهم آورده است.

ب- با استفاده از روش ارائه شده هزینه ساخت دیوار خاک مسلح با ارتفاع کم تا ۲۲ درصد و هزینه احداث دیوار با ارتفاع زیاد تا ۸ درصد نسبت به روش FHWA کاهش یافت. بدین ترتیب مشخص شد که هزینه های ساخت دیوار های بلندتر، در دو حالت طراحی بهینه و طراحی مطابق با توصیه های آیین نامه به یکدیگر نزدیک تر هستند.



منابع

- [1] R. R. Berg, B. R. Christopher, and N. C. Samtani, "Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes–Volume I," 2009.
- [2] R. M. Koerner and T.-Y. Soong, "Geosynthetic reinforced segmental retaining walls," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 19, no. 6, pp. 359-386, 2001.
- [3] P. Basudhar, A. Vashistha, K. Deb, and A. Dey, "Cost optimization of reinforced earth walls," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 1-12, 2008.
- [4] K. N. Manahiloh, M. M. Nejad, and M. S. Momeni, "Optimization of design parameters and cost of geosynthetic-reinforced earth walls using harmony search algorithm," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 15, 2015.
- [5] M. M. Nejad and K. N. Manahiloh, "A Modified Harmony Search Algorithm for the Optimum Design of Earth Walls Reinforced with Non-uniform Geosynthetic Layers," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1, no. 4, p. 36, 2015.
- [6] H. Ghiassian and K. Aladini, "OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED EARTH WALLS WITH METAL STRIPS; SIMULATION-OPTIMIZATION APPROACH," *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)*, vol. 10, no. 6, pp. 641-655, 2009.
- [7] ك. الاديني and ح. غياثيان, "OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED EARTH STRUCTURES; PARTICLE SWARM OPTIMIZATION APPROACH," *مهندسی عمران*, no. 2, pp. 15-21, 2011.
- [8] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.