

مدل چند هدفه مکان‌یابی هاب برای طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار: الگوریتم‌های MOGWO و NSGAII

دین محمد ایمانی

استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران دانشکده مهندسی صنایع
imanim@iust.ac.ir

علی حیدری

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران
heidari.iust@gmail.com
نویسنده مسئول: دین محمد ایمانی

چکیده

در بازارهای امروزی ضروری است کالاها و خدمات متناسب با شرایط رقابتی محیطی و نیازهای مشتریان تامین گردند. افزایش آگاهی عمومی نسبت به آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی بر چگونگی طراحی شبکه‌های زنجیره تامین تاثیر چشم‌گیری گذاشته است. طوریکه شبکه‌های زنجیره تأمینی که بصورت سنتی طراحی می‌شوند و تنها بعد اقتصادی را در نظر دارند امروزه برای رسیدن به توسعه پایدار کافی نمی‌باشند. در این مقاله یک مسئله چندهدفه مکان‌یابی هاب برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار بر اساس تقسیم‌بندی مشتریان ارائه می‌شود که سه جنبه پایداری اقتصادی (کاهش هزینه‌ها)، زیست‌محیطی (کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط بخش حمل و نقل) و مسئولیت اجتماعی (ایجاد اشتغال و توسعه جامعه) را به‌طور همزمان در نظر دارد. مدل پیشنهادی با استفاده از روش محدودیت افسیلون و روش محدودیت افسیلون تقویت شده برای مسائل با ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار GAMS حل می‌شود. باتوجه به NP-Hard بودن مدل پیشنهادی از دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و بهینه‌ساز چندهدفه گرگ خاکستری یا MOGWO جهت حل مساله در ابعاد بزرگ استفاده شده و نتایج ارائه می‌گردند.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی هاب، زنجیره تأمین پایدار، مسائل چند هدفه، الگوریتم‌های NSGA-II و MOGWO

1. مقدمه

سیر کنونی فعالیت‌های بشر به‌گونه‌ای است که آسیب‌هایی جدی به محیط‌زیست و کره زمین وارد می‌کند. استفاده بیش از حد از منابع روندی را به وجود آورده است که در صورت ادامه قطعاً رشد و توسعه حاصل، ناپایدار خواهد بود (Chen 2013). در دنیای اقتصادی رقابتی امروز، برای بهرمندی از مزیت رقابتی تمرکز بر کاهش هزینه‌ها و یا افزایش سود برای سازمان‌ها امری ضروری تلقی می‌شود (Madani and Rasti-Barzoki 2017). با افزایش آگاهی نسبت به مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی، تنها شاخص پایداری زنجیره تأمین ملاحظات اقتصادی نمی‌تواند باشد (Osmani and Zhang 2017). نگرانی در مورد مسائل زیست‌محیطی و تأثیرات اجتماعی ناشی از فعالیتهای تولیدی و کسب و کارهای مختلف، منجر به ایجاد یک مقوله‌ی جدید به نام توسعه پایدار شده است، که مفهوم آن در سال 1987 معرفی شد (Chen 2013). در سال 2009 مطرح شد که توسعه پایدار به تعادل منافع اقتصادی محدود نمی‌شود بلکه توسعه اجتماعی را هم شامل می‌شود (Pishvaei, Razmi, and Torabi 2014). در گذشته مسائل پایداری شامل جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی بوده و کمتر به مسائل اجتماعی پرداخته شده است، از آنجایی که زنجیره‌های تأمین نقش مهمی در محیط کسب‌وکار امروز دارند، در هنگام طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره‌های تأمین به‌منظور دستیابی به پایداری، مسئولیت اجتماعی باید مورد توجه قرار گیرد (Pishvaei et al. 2014) (Pishvaei, Razmi, and Torabi 2012). همانطور که ملاحظه می‌شود در طی سال‌های متفاوت تاکید پژوهشگران برای در نظر گرفتن مسائل اجتماعی وجود دارد که اهمیت این بخش از پایداری را نشان می‌دهد. بطور کلی دلیل کمبود پژوهش در زمینه‌ی مسئولیت اجتماعی پیچیدگی مدل‌سازی این بعد می‌باشد (Eskandarpour et al. 2015).

مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار را می‌توان به دو گروه عمده طبقه‌بندی کرد. 1- طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز 2- طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار (Seuring 2013) مفهوم مدیریت زنجیره تأمین پایدار وسیع‌تر از مدیریت زنجیره تأمین سبز است و مدیریت زنجیره تأمین سبز بخشی از مدیریت زنجیره تأمین پایدار می‌باشد. (Srivastava 2007) در حوزه پایداری فعالیت‌هایی توسط پژوهشگران صورت گرفته است؛ سمی کاسکن و همکاران، یک شبکه زنجیره تأمین تک هدفه براساس تقسیم بندی مشتریان ارائه کردند. (Coskun et al. 2016) ورسایی و پولیاکووسکی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار برای صنعت نوشیدنی در استرالیا طراحی کردند. مسائل زیست‌محیطی را محاسبه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای و برای بررسی بعد اجتماعی، دو دسته مسئولیت اجتماعی یعنی شرایط کار و توسعه جامعه را در نظر گرفتند. (Varsei Mohsen and Polyakovskiy 2017) سلیمانی و همکاران به بررسی یک مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند. مدل سازی این زنجیره با در نظر گرفتن عوامل زیست محیطی، افزایش سود کل زنجیره و افزایش پاسخگویی به نیاز مشتری صورت گرفته است. (Soleimani et al. 2017) چونگ و همکاران برای انتقال مواد اولیه به مراکز تولیدی و کاهش هزینه‌ها هاب‌هایی را در مسیر تأمین‌کنندگان تا مراکز تولید قرار دادند و برای این مسئله یک مدل خطی عدد صحیح را ارائه کردند. (Graves, Bhatnagar, and Cheong 2007) رونی و همکاران، یک مدل چندهدفه هاب و اسپوک، برای طراحی و مدیریت زنجیره تأمین پایدار سوخت‌های زیست‌محیطی ارائه کردند که انتشار آلاینده‌ها را مدنظر داشتند و مسائل اجتماعی را ایجاد اشتغال مدنظر قرار دادند. (Roni et al. 2016) جی و گاتز، یک مدل زنجیره تأمین با در نظر گرفتن هاب و تأثیر متغیرهای اقتصادی و فصلی ارائه دادند. (Ge and Goetz 2016) گوهری و همکاران، در شبکه خدمات درمانی زنجیره تأمین خون، هاب‌هایی برای جمع‌آوری بررسی و تفکیک خون را در نظر گرفتند؛ و یک مدل جدید برای طراحی شبکه‌های هاب در توزیع فرآورده‌های خونی ارائه کردند. موسوی و بزرگی یک مدل چندهدفه ارائه کردند که هزینه‌های ارسال مواد را کاهش می‌دهد و احتمال خرید تمامی مناطق مشتری را به حداکثر می‌رساند همچنین یکی دیگر از اهداف آن‌ها کمینه‌سازی گاز CO2 منتشر شده توسط بخش حمل‌ونقل بود. که هاب‌ها در مسیر تأمین‌کنندگان و مشتری استقرار می‌یابند (Musavi and Bozorgi-Amiri 2017). با توجه به مرور ادبیات انجام‌شده در حوزه مدیریت زنجیره تأمین پایدار، تمامی پژوهش‌ها مسائل اقتصادی را یا کمینه‌سازی هزینه‌ها و یا بیشینه‌سازی سود در نظر گرفته‌اند، اما در مورد مسائل زیست‌محیطی متفاوت است. بهترین روش برای ارزیابی مسائل زیست‌محیطی روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) می‌باشد. (Hugo and Pistikopoulos 2005) اما با توجه به پیچیدگی، نبود داده و نیاز به کارشناسان زیست‌محیطی، این کار بسیار دشوار و زمان‌بر می‌باشد، اما در کشورهای توسعه‌یافته بسیار کاربرد داشته و مورد استفاده قرار گرفته است. (Harraz and Galal 2011) (Babazadeh Eskandarpour et al. 2015) (et al. 2017) پژوهشگران راه‌کارهایی برای ارزیابی مسائل زیست‌محیطی در قالب چهار معیار کلی گازهای گلخانه‌ای، بازیافت، تولید زباله و استفاده از انرژی معرفی کرده‌اند و مسئولیت اجتماعی شامل پنج گروه اصلی شرایط کار، تعهد نسبت به جامعه، مسائل مربوط به مشتریان، حقوق بشر (کودک و کار اجباری، آزادی اجتماعات، تبعیض) و شیوه‌های تجاری (مبارزه با فساد، تجارت منصفانه، ترویج مسئولیت اجتماعی شرکت در حوزه نفوذ) می‌باشد (Eskandarpour et al. 2015). در جدول (1) شیوه‌های حل مسائل مربوط به موضوع پژوهش ارائه شده است.

در این مقاله یک مسئله چندهدفه مکان‌یابی هاب برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار بر اساس تقسیم‌بندی مشتریان ارائه می‌شود که سه جنبه پایداری اقتصادی (کاهش هزینه‌ها)، زیست‌محیطی (کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای) و مسئولیت اجتماعی (ایجاد اشتغال و توسعه جامعه) را به‌طور همزمان در نظر دارد. برای حل مدل در ابعاد کوچک از روش محدودیت پس‌یلون و روش محدودیت پس‌یلون تقویت شده توسط نرم‌افزار GAMS و در ابعاد بزرگ نیز از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و بهینه‌ساز چندهدفه گرگ خاکستری یا MOGWO استفاده می‌گردد.

ادامه پژوهش به شرح زیر است: در بخش دوم، مدل ریاضی پیشنهادی شرح داده شده می‌شود. در بخش سوم روش حل مدل توضیح داده خواهد شد بخش چهارم الگوریتم‌های فراابتکاری و نتایج عددی توضیح داده می‌شوند. بخش پنجم به نتیجه‌گیری و بیان فرصت‌های پژوهش‌های آتی اختصاص دارد.

جدول (1) روش‌های حل برای مدل‌های زنجیره تأمین پایدار

نویسنده	حوزه فعالیت			چند هدفه	تک هدفه	روش حل
	پایداری	زنجیره تأمین سبز	زنجیره تأمین حلقه بسته			
(Musavi and Bozorgi-Amiri 2017)	✓			✓		(NSGA-II)
(Varsei Mohsen and Polyakovskiy 2017), (Roni et al. 2016), (Arampantzi and Minis,), (Santibañez-Aguilar 2017 et al. 2014), (Xifeng, Ji, and Peng 2013)	✓			✓		ϵ – Constraint
(Jafari, Seifbarghy, and Omidvari 2017)	✓			✓		(MOVDO) (NSGA-II)
(Osmani and Zhang 2017)	✓			✓		ϵ – Constraint Benders decomposition algorithm
(Zhang et al. 2016)	✓			✓		(MOABC)
(Soleimani et al. 2017)	✓		✓	✓		Ga
(Coskun et al. 2016)		✓			✓	goal-programming
(Saffar, Hamed Shakouri, and Razmi 2015)			✓	✓		ϵ – Constraint (MODE)
(Diabat and Al-Salem 2015)			✓		✓	(GA) Gams
(Pishvaei et al. 2014)	✓			✓		Benders decomposition algorithm
(Devika, Jafarian, and Nourbakhsh 2014)	✓		✓	✓		HIV,TIV,NIV
(Diabat et al. 2013)			✓	✓		Lagrangian relaxation algorithm
(Amin and Zhang 2013)			✓	✓		weighed sums and ϵ – Constraint

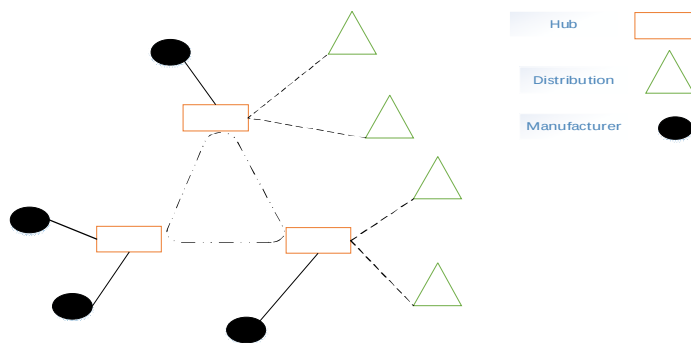
2. مدل ریاضی پیشنهادی

در مدل پیشنهادی اهمیت در نظر داشتن تنوع مشتریان از یک سو مزیت صرفه جویی در هزینه‌های سیستم حمل و نقل هاب از سوی دیگر سبب شد که یک مدل مکانیابی هاب برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار براساس تقسیم‌بندی مشتریان پیشنهاد گردد.

1.2. بیان مسئله

کل زنجیره تأمین یک سیستم کشتی است که به تقاضای مشتریان مربوط می‌شود. مشتریان محصولات را متناسب با قدرت مالی و اطلاعات زیست‌محیطی خریداری می‌کنند که این محصولات از نظر تطابق با استانداردهای زیست‌محیطی در سطوح کیفیت متفاوتی قرار دارند. شبکه زنجیره تأمین مورد نظر در این پژوهش شامل تولیدکنندگان، مکان‌های بالقوه برای احداث هاب و مراکز توزیع می‌باشد که تقاضای مشتریان در مراکز توزیع برآورد می‌شود. محصولات توسط تولیدکنندگان از طریق سیستم حمل و نقل هاب ارسال می‌شود. لازم به ذکر است که سه نوع مشتری مد نظر است: (1) مشتری سبز (نگرش و اطلاعات خوبی نسبت به مسائل زیست‌محیطی دارند و برای حمایت از محیط‌زیست حاضرند بهای بیشتری برای محصولات سبز بپردازند)، (2) مشتری ناسازگار (نگرش نسبتاً خوبی نسبت

به مسائل زیست‌محیطی دارند اما محصولات سبز را در شرایطی خریداری می‌کنند که قیمت آن برابر و یا کمی بالاتر از محصول جایگزین باشد) و (3) مشتری قرمز (به سبز بودن محصولات توجهی ندارند و تصمیم‌گیری آن‌ها براساس معیارهای دیگر است. این مشتریان خواهان محصولاتی در سه سطح کیفیت هستند، بنابراین چند محصول در سه سطح کیفیت مورد نظر این تحقیق می‌باشد این مدل شامل تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان است که مکان آن‌ها مشخص است و برای انتقال محصولات از تولیدکنندگان به مراکز توزیع از حمل‌ونقل هاب محور که مکان‌های بالقوه احداث آن‌ها معلوم است استفاده می‌گردد (شکل 1).



شکل (1) شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی

❖ مفروضات

مفروضات مدل پیشنهادی عبارتند از :

- تولیدکنندگان توانایی تولید چند محصول در سه سطح کیفیت (محصول سبز، محصول سفید و محصول قرمز) را دارند.
- در این مدل سه نوع مشتری برای سه سطح کیفیت محصولات در نظر داریم. مشتری سبز، مشتری سفید (ناسازگار) و مشتری قرمز که هر مشتری تقاضای مشخصی برای محصولات خاص خود دارد.
- همه پارامترها شناخته‌شده و قطعی هستند.
- ظرفیت تسهیلات محدود است.
- هیچ زباله‌ای (پسماند) وجود ندارد.
- یک دوره برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است.
- ارسال کالا فقط از طریق هاب میسر است و حمل‌ونقل بین هاب مجاز است.
- شبکه هاب کامل است.
- فرض تک تخصیصی در نظر گرفته شده است.
- محصولات حداقل باید از یک هاب بگذرند و به مرکز توزیع برسند.
- N مجموعه‌ای از گره‌هاست که شامل N_1 و N_2 می‌باشد که N_1 شامل مجموعه‌ای از تولیدکنندگان است (گره‌های i) و N_2 شامل مجموعه‌ای از مراکز توزیع است (گره‌های j) و مجموعه‌ای H که فضایی مابین N_1 و N_2 می‌باشد و شامل گره‌های K ، I است که هاب‌ها بر روی این گره‌ها احداث می‌شوند.

جدول (2) نمادها و اصطلاحات

مجموعه‌ها
i : تولیدکنندگان
k, l : نقاط بالقوه برای تأسیس هاب
P : مجموعه محصولات
j : مراکز توزیع
q : سطوح کیفیت محصول

پارامترهای مربوط به تابع هدف اقتصادی

λ_{ik} : هزینه واحد حمل و نقل از گره i تا گره k (هاب)

λ'_{lj} : هزینه واحد حمل و نقل از گره l تا گره j (مکان توزیع)

α : ضریب تخفیف برای حمل و نقل انبوه بین دو گره هاب

σ : فاکتور تخفیف هزینه حمل و نقل بین گره غیر هاب و هاب

δ : فاکتور تخفیف هزینه حمل و نقل بین گره هاب و غیر هاب

φ_{kl} : هزینه واحد حمل و نقل بین دو گره هاب

F_k : هزینه ثابت احداث هاب k

η_i^{pq} : هزینه تولید یک واحد محصول p با سطح کیفیت q در مکان تولیدی i

Γ_k : ظرفیت هاب k

cap_j : ظرفیت مرکز توزیع j

d_j^{pq} : میزان تقاضای مرکز توزیع j برای محصول p با سطح کیفیت q

Γ_i^{pq} : ظرفیت تولید محصول p با سطح کیفیت q در مکان تولیدی i

پارامترهای مربوط به تابع هدف زیست محیطی

$\mathcal{E}_e$: نرخ مصرف سوخت وسیله بدون بار

$\mathcal{E}_f$: نرخ مصرف سوخت وسیله همراه با بار

$\mathcal{E}_{kf}$: نرخ مصرف سوخت وسیله همراه با بار بین هاب

s_{ik} : فاصله بین گره i و k

s_{lj} : فاصله بین گره l و j

s_{kl} : فاصله بین گره k و l

VL : محدوده وزن برای وسایل حمل و نقل

پارامترهای مربوط به تابع هدف مسئولیت اجتماعی

ω_{em} : ضریب اهمیت اشتغال زایی

ω_{ed} : ضریب اهمیت توسعه اقتصادی

JO_K : تعداد شغل های ایجاد شده به ازای احداث هاب در منطقه K

EV_k : میزان افزایش ارزش اقتصادی منطقه به ازای احداث هاب در منطقه k

ur_k : نرخ بیکاری در منطقه k

rd_k : سطح توسعه اقتصادی در منطقه k

متغیرهای تصمیم

w_{ij}^{pq} : میزان جریان از گره مبدأ i (تولیدکننده) به ازای محصول p با سطح کیفیت q به گره j (مرکز توزیع)

x_{iklj}^{pq} : اگر محصول p با سطح کیفیت q از گره i تحت هاب های k و l به مرکز توزیع j حمل شود یک، در غیر اینصورت صفر

y_{kk} : اگر هاب k بر روی گره k احداث شود مقدار یک میگیرد، در غیر اینصورت صفر

y_{ik} : اگر گره i به هاب k تخصیص پیدا کند یک، در غیر اینصورت صفر

2.2. مدل ریاضی

این مدل به طور همزمان جنبه اقتصادی، مسائل زیست محیطی و پاسخگویی به جنبه های اجتماعی را در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین هاب محور سه سطحی، در نظر دارد. این مسئله یک برنامه ریزی غیرخطی چند هدفه است که برای بهینه سازی هزینه ها، انتشار آلاینده ها و همچنین مسئولیت اجتماعی، برای تحقق آرزوی پایداری محیط زیست مدل سازی شده است.

• هدف اقتصادی

در همه پژوهش های انجام شده هدف اقتصادی را کاهش هزینه ها و یا بیشینه سازی سود در نظر داشته اند. در این پژوهش هدف اقتصادی کمینه سازی هزینه ها است که این هزینه ها مربوط به بخش های حمل و نقل، احداث هاب ها و تولید محصولات می باشد.

$$\begin{aligned} \text{Min } F_1 = & \sum_{i \in N_1} \sum_{l \in H} \sum_{j \in N_2} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{k \in H} W_{ij}^{pq} \cdot X_{iklj}^{pq} (\sigma \lambda_{ik} + \alpha \varphi_{kl} + \delta \lambda'_{lj}) + \sum_{k \in H} f_k \cdot y_{kk} \\ & + \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{k \in H} \eta_i^{pq} \cdot W_{ij}^{pq} \cdot y_{ik} \end{aligned} \quad (1)$$

• هدف زیست محیطی

تابع هدف دوم (2-3) به دنبال بهینه‌سازی میزان انتشار گاز CO₂ توسط بخش حمل‌ونقل می‌باشد. سمیر الهدلی در مقاله خود رابطه بین انتشار گاز CO₂ و وزن وسیله نقلیه را بررسی کرد (Elhedhli and Merrick 2012). ایده محاسبه انتشار آلودگی با این روش توسط زفینگ، جی و پنگ در سال 2013 ارائه شد؛ و همچنین بزرگی و موسوی، در مقاله خود در سال 2017 از این روش برای محاسبه انتشار گاز CO₂ استفاده کرده‌اند. این انتشارات توسط وسایل نقلیه در دو زمان باهم متفاوت هستند. این معادله شامل دو اصطلاح است، اصطلاح اول مربوط به انتشار گاز CO₂ زمانی که وسیله نقلیه بارگیری شده است و قسمت دوم مربوط به بخشی از انتشار گاز CO₂ وسیله نقلیه زمانی که وسیله نقلیه خالی است. لازم به توضیح است که میزان انتشار آلاینده‌ها بین هاب را متفاوت از گره‌های هاب و غیر هاب در نظر گرفته‌ایم. (Musavi and Bozorgi-Amiri 2017) (Xifeng et al. 2013).

$$\begin{aligned} \text{Min } F_2 = & \sum_{i \in N_1} \sum_{k \in H} S_{ik} \cdot y_{ik} \left(\frac{(\varepsilon_f - \varepsilon_e) \sum_{j \in N_2} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} W_{ij}^{pq}}{VL} + \varepsilon_e \left(\frac{\sum_{j \in N_2} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} W_{ij}^{pq}}{VL} \right) \right) \\ & + \sum_{i \in N_1} \sum_{l \in H} \sum_{j \in N_2} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{k \in H} S_{kl} \cdot X_{iklj}^{pq} \left(\frac{(\varepsilon_{hf} - \varepsilon_{he}) W_{ij}^{pq}}{VL} + \varepsilon_{he} \left(\frac{W_{ij}^{pq}}{VL} \right) \right) \\ & + \sum_{i \in N_1} \sum_{k \in H} S_{ij} \cdot y_{jl} \left(\frac{(\varepsilon_f - \varepsilon_e) \sum_{j \in N_2} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} W_{ij}^{pq}}{VL} + \varepsilon_e \left(\frac{\sum_{j \in N_2} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} W_{ij}^{pq}}{VL} \right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

• هدف مسئولیت اجتماعی

تابع هدف سوم (3) به دنبال برقراری عدالت اجتماعی است. در این مدل فرصت‌های شغلی ناشی از احداث هاب را در نظر گرفته‌ایم. ارزش اجتماعی با استفاده از تعداد فرصت‌های شغلی خلق شده و نرخ بیکاری آن منطقه محاسبه می‌شود در این راستا ایجاد فرصت شغلی در یک منطقه با نرخ بیکاری بالاتر به ارزش اجتماعی بیشتری منجر می‌شود. نرخ توسعه‌ی منطقه‌ای و ارزش اقتصادی هاب‌های تأسیس شده برای ارزیابی ارزش اجتماعی مدنظر است. از این‌رو ارزش اجتماعی بیشتر برای وضعیتی است که به مناطقی که از توسعه‌ی اقتصاد کمتری برخوردارند بیشتر اهمیت داده شود. معیارهای توسعه‌ی اقتصادی و اشتغال به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} S1 &= (\sum_{k \in H} (JO_k) ur_k y_{kk}) \quad 3-1 \\ S2 &= (\sum_{k \in H} EV_k (1 - rd_k) y_{kk}) \quad 3-2 \end{aligned}$$

با توجه به اینکه هر دو اقدام ماهیتی اجتماعی دارند و هم اینکه جهت جلوگیری از پیچیدگی بیشتر مدل پیشنهادی، می‌توانیم هر دو اقدام را به صورت یک تابع هدف بکار ببریم (Zhalechian, Tavakkoli-moghaddam, and Rahimi (Roni et al. 2016) (2017).

$$\text{Max } f_3 = \omega_{em} \left(\sum_{k \in H} (JO_k) ur_k y_{kk} \right) + \omega_{ed} \left(\sum_{k \in H} EV_k (1 - rd_k) y_{kk} \right) \quad (3)$$

• محدودیت‌ها

$$\sum_{k \in H} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N_1 \quad (4)$$

$$y_{ik} \leq y_{kk} \quad \forall i \in N_1, k \in H \quad (5)$$

$$\sum_{k \in H} \sum_{l \in H} X_{iklj}^{pq} = 1 \quad \forall i \in N_1, j \in N_2, p \in P, q \in Q \quad (6)$$

$$\sum_l X_{iklj}^{pq} \leq y_{ik} \quad \forall i \in N_1, k \in H, j \in N_2, p \in P, q \in Q \quad (7)$$

$$\sum_k X_{iklj}^{pq} \leq y_{jl} \quad \forall i \in N_1, l \in H, j \in N_2, p \in P, q \in Q \quad (8)$$

$$X_{iklj}^{pq} + 1 \geq y_{ik} + y_{jl} \quad \forall i \in N_1, k \in H, l \in H, j \in N_2, p \in P, q \in Q \quad (9)$$

$$y_{jk} \leq y_{kk} \quad \forall k \in H, j \in N_2 \quad (10)$$

$$\sum_{k \in H} \sum_{j \in N_1} W_{ij}^{pq} \cdot y_{ik} \leq \Gamma_i^{pq} \quad \forall i \in N_1, p \in P, q \in Q \quad (11)$$

$$\sum_{k \in H} \sum_{j \in N_1} \sum_{l \in N_1} \sum_{j \in N_2} W_{ij}^{pq} \cdot y_{ik} \leq \Gamma_k \cdot y_{kk} \quad \forall k \in H \quad (12)$$

$$\sum_{k \in H} \sum_{j \in N_1} \sum_{l \in N_1} \sum_{j \in N_2} W_{ij}^{pq} \cdot y_{ik} \leq Cap_j \quad \forall j \in N_2 \quad (13)$$

$$\sum_{k \in H} \sum_{j \in N_1} W_{ij}^{pq} \cdot y_{ik} \geq d_j^{pq} \quad \forall j \in N_2, p \in P, q \in Q \quad (14)$$

$$X, y \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_1, k \in H, l \in H, j \in N_2, p \in P, q \in Q \quad (15)$$

$$W_{ij}^{pq} \geq 0 \quad \forall i \in N_1, j \in N_2, p \in P, q \in Q \quad (16)$$

عبارت (4): محدودیت شماره یک مسئله می باشد که فرض تک تخصیصی مبدأ (تولیدکنندگان) به هاب ها را تضمین می کند. عبارت (5): محدودیت شماره دو مسئله می باشد فرض تک تخصیصی را به احداث هاب وابسته می کند. به این صورت که گره های مبدأ در صورتی می توانند به هاب تخصیص یابند که آن هاب احداث شده باشد. عبارت (6): کدام هاب ها برای هر جفت گره i و j در ارتباط باشند. عبارت های (7) و (8): مسیر صحیح را از طریق گره های هاب احداث شده تضمین می کند. عبارت (9) اعتبار مسیر $j \rightarrow l \rightarrow k \rightarrow i$ را از طریق بررسی وجود ارتباط بین گره $i \rightarrow k$ و گره $l \rightarrow j$ تضمین می کند. عبارت شماره (10): در صورتی مرکز توزیع j می تواند از هاب خدمت بگیرد که هاب احداث شده باشد. عبارت (11): مربوط به ظرفیت تولیدی تولیدکنندگان است؛ که بیان می کند تعداد محصولاتی که از گره های مبدأ (تولیدکنندگان) ارسال می شود نمی تواند از ظرفیت تولیدی تولیدکنندگان بیشتر باشد. عبارت (12): مربوط به ظرفیت هاب ها می باشد. عبارت (13): مربوط به ظرفیت مراکز توزیع است؛ که بیان می کند تعداد محصولاتی که از گره های مبدأ (تولیدکنندگان) ارسال می شود نباید از ظرفیت مراکز توزیع بیشتر باشد. عبارت (14): تعداد محصولاتی که از گره های مبدأ ارسال می شود باید به گونه ای باشد که تقاضای همه ی مشتریان را پوشش دهد. عبارت های (15) و (16): مربوط به دامنه ی متغیرها می باشد.

3. روش های حل برای مدل پیشنهادی

برای حل مسائل چند هدفه با نرم افزار گمز دو روش ϵ - محدودیت و ϵ - محدودیت تقویت شده استفاده می شود. این روش ها می توانند مسئله این پژوهش را به یک مسئله بهینه سازی یک هدفه تبدیل کنند. روش متداول مورد استفاده روش ϵ - محدودیت است، که جواب های حاصل از آن کارا یا حداقل کارای ضعیف هستند. برای پوشش این ضعف از روش تقویت شده آن برای رسیدن به جواب های همواره کارا استفاده می شود. در نهایت مقایسه ای از نظر کارایی بین این دو روش ارائه می شود. سپس برای حل مدل در ابعاد بزرگ دو الگوریتم قرابتکاری NSGA-II و MOGWO بکار گرفته می شوند.

1.3. روش $\square$ - محدودیت و ϵ - محدودیت تقویت شده

در این پژوهش هدف اقتصادی به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و سایر اهداف مسائل زیست‌محیطی و مسئولیت اجتماعی به کران بالای اپسیلون محدود می‌شوند و در قیود مسئله اعمال می‌شوند. در این صورت، اگر روش EC بکار گرفته شود مدل تک هدفه زیر حاصل می‌شود،

$$\begin{cases} \text{Min } f_1(x) \\ f_i(x) \leq e_i \quad i = 2, 3 \\ x \in X \end{cases} \quad (17)$$

که در آن هدف اقتصادی f_1 به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و اهداف دوم و سوم به مقدار حداکثر e_i محدود می‌شوند. لازم به توضیح است هدف مسئولیت اجتماعی که بصورت بیشینه‌سازی $(f_3(x))$ می‌باشد که قید مربوط به این هدف را به صورت $f_3(x) \geq e_3$ می‌نویسیم.

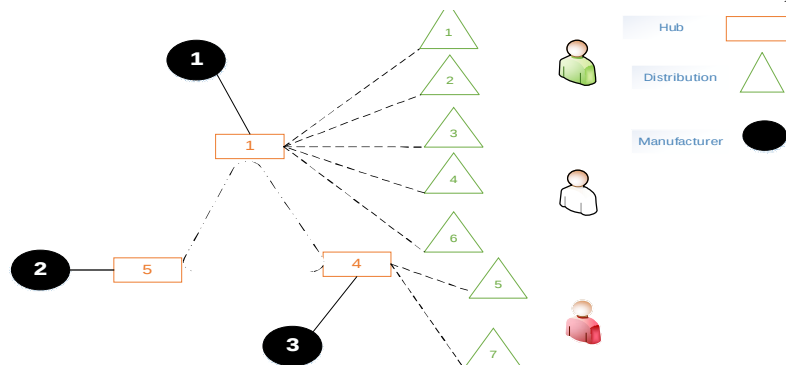
همان‌طور که اشاره شد، در روش EC با تغییر مقادیر e_i جواب‌های مختلفی بدست می‌آید که یا کارا هستند و یا حداقل کارای ضعیف می‌باشند. با اصلاح/تکمیل جزئی مدل (17)، می‌توان همواره جواب کارا بدست آورد، این روش به روش AEC معروف است (Mavrotas 2009). برای اجرای بهتر روش AEC، ابتدا بازه مناسب اپسیلون‌ها (e_i ها) را بدست می‌آوریم (Aghaei, Amjady, and Shayanfar 2011). در این تحقیق برای بکارگیری روش AEC در حل مسئله تعریف‌شده، تابع هدف اول (کمینه‌سازی هزینه کل (f_1)) را به عنوان هدف اصلی در نظر می‌گیریم و هدف دوم (کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی (f_2)) و همچنین هدف سوم (بیشینه‌سازی منفعت اجتماعی/اشتغال‌زایی و توسعه جامعه (f_3)) به مقدار مختلف اپسیلون محدود می‌کنیم.

حل مدل AEC :

$$\begin{cases} \text{Min } z = f_1 - \phi_2 \cdot S_2 + \phi_3 \cdot S_3 \\ s.t. \\ x \in X \\ f_2(x) + s_2 = e_2 \\ f_3(x) - s_3 = e_3 \end{cases} \quad (18)$$

2.3. شرح مثال نمونه

شبکه عرضه که بصورت مطالعه‌ی موردی در این پژوهش مد نظر است شامل 3 مرکز تولیدی که توانایی تولید محصولات را دارند، 5 مکان بالقوه برای احداث هاب، 7 مرکز توزیع که وظیفه‌ی توزیع محصولات به مشتریان را دارند و دو نوع محصول می‌باشد. شبکه این مثال در شکل (2) نشان داده شده است. مدل ارائه شده با دو روش EC و AEC با نرم افزار گمز 24.9.1 با سیستم با مشخصات CPU: COR i5-5200 حافظه 4GB و هارد 500GB حل می‌شود. و جواب‌های حاصل از جواب دقیق با جواب‌های الگوریتم‌های مورد استفاده تطبیق داده می‌شود.

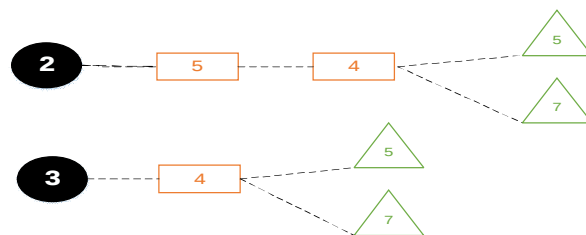


شکل 2. شبکه زنجیره تامین پایدار هاب محور مورد مطالعه

جدول (2) داده ها لازم برای حل مثال نمونه

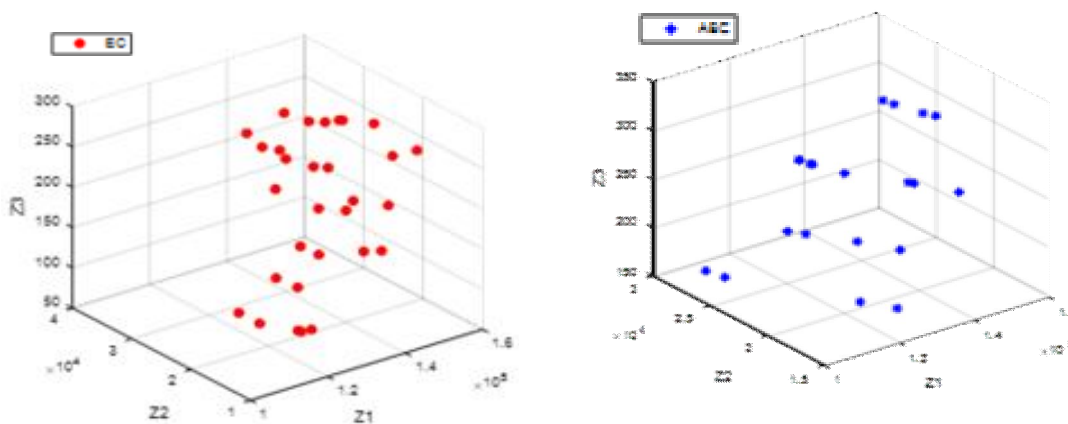
$\lambda_{ik} = \text{uniform}(8,12)$	$\alpha = 0.01$	$i = 3$
$\lambda_{ij} = \text{uniform}(8,12)$	$\sigma = 0.8$	$k = 5$
$\varphi_{ki} = \text{uniform}(140,170)$	$\delta = 0.4$	$P = 2$
$\eta_i^{pq} = \text{uniform}(1,3)$	$F_k = \text{uniform}(10000,30000)$	$q = 3$
$d_j^{pq} = \text{uniform int}(100,200)$	$\omega_{em} = 0.6$	$j = 7$
$\Gamma_i^{pq} = \text{uniform}(60000,120000)$	$\omega_{ed} = 0.4$	
$\varepsilon_f = 1.3140$	$JO_k = \text{uniform}(50,80)$	
$\varepsilon_{hf} = 1.3140$	$EV_k = \text{uniform}(\%25, \%35)$	
$\varepsilon_e = 0.6090$	$ur_k = \text{uniform}(\%14, \%28)$	
	$rd_k = \text{uniform}(\%29, \%45)$	
	$s_{ik} = \text{uniform}(7,12)$	
	$s_{kl} = \text{uniform}(20,30)$	
	$s_{kj} = \text{uniform}(7,12)$	

به عنوان مثال شبکه حاصل از یکی از نقاط پارتو ($z_1 = 1260224$, $z_2 = 18897.77$, $z_3 = 218.676$) به شکل بالا می باشد که یکی از بخش های آن توضیح داده می شود مرکز تولیدی 2 به هابی که در نقطه بالقوه 5 احداث شده است تخصیص می باید و سپس محصولات از طریق هاب 4 به مراکز توزیع 5 و 7 ارسال می شوند. و از مرکز تولیدی شماره سه محصولات از طریق هاب 4 به مراکز توزیع ارسال می شوند.



شکل (3) تشریح قسمتی از شبکه

با استفاده از خروجی حاصل از روش های مورد استفاده در این پژوهش، جبهه ی پارتو حاصل شده با استفاده از روش محدودیت افسیلون تقویت شده نمایش داده می شود. شکل (4) که جواب های پارتو حاصل از روش AEC را با در نظر گرفتن تمام ابعاد تصمیم گیری یعنی هدف های اقتصادی، زیست محیطی و مسئولیت اجتماعی را نمایش می دهد.



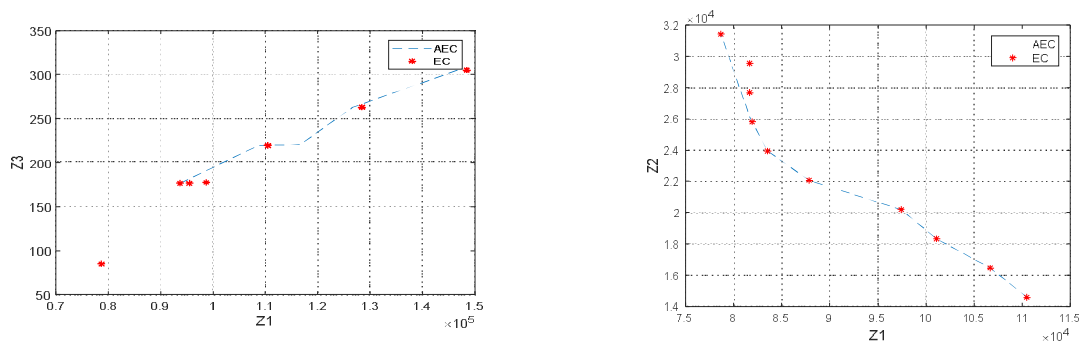
شکل (4) نمایش جبهه پارتو توسط دو روش AEC و EC

3.3. ارتباط بین توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی

با توجه به شکل (5) تضاد بین تابع هدف اقتصادی ($Z1$) و تابع هدف زیست‌محیطی ($Z2$) کاملاً مشهود است که اگر در سطوح تصمیم‌گیری تمرکز بیشتری برای کاهش آلودگی باشد می‌بایست هزینه‌ی بیشتری کنیم بنابراین هر چقدر هدف ما این باشد که آلودگی زیست‌محیطی کاهش یابد می‌بایست هزینه‌ی بیشتری کنیم که تابع هدف زیست‌محیطی کاهش یابد و برعکس.

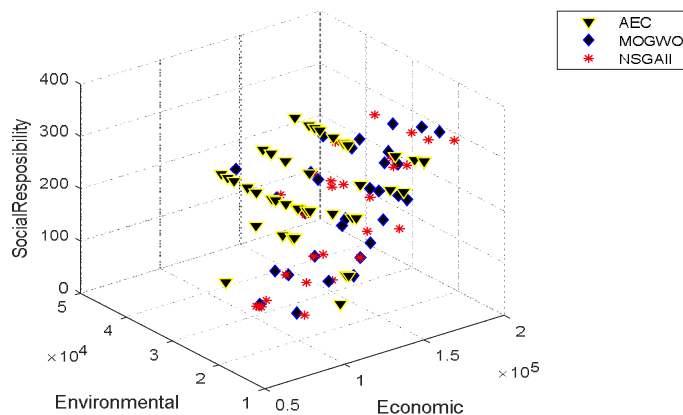
5.3. ارتباط بین توابع هدف اقتصادی و مسئولیت اجتماعی

با توجه به شکل (5) و اینکه تابع هدف سوم ($Z3$) مسئولیت اجتماعی را دنبال می‌کند برای اینکه تابع هدف سوم ($Z3$) افزایش یابد و ما به خواسته‌ی خود یعنی ایجاد فرصت شغلی بیشتر و توسعه‌ی منطقه‌ای برسیم که هر چه بیشتر باشد بهتر است و از طرفی رسیدن به این مهم وابسته به این است که هاب‌های بیشتری احداث کنیم و این نیاز به سرمایه بالایی دارد که تابع هدف اقتصادی دنبال کاهش هزینه‌هاست و با افزایش تابع هدف مسئولیت اجتماعی هزینه‌ها نیز افزایش می‌یابد که کنترل هزینه‌ها با تابع هدف اقتصادی می‌باشد. در شکل 3 علاوه بر اینکه ارتباط بین توابع هدف را مورد بررسی قرار دادیم یک مقایسه‌ای نیز میان دو روش مورد استفاده این تحقیق انجام شد همانطور که در شکل پیداست، بعضی از نقاط حاصل از روش EC مغلوب روش AEC می‌شوند که این نشان می‌دهد جواب‌های حاصل از روش AEC همواره کارا هستند (Mavrotas 2009).



شکل (5) ارتباط بین توابع هدف با روش ϵ -Constraint و Augmented ϵ -Constraint

همانطور که گفته شد جواب‌های حاصل از روش تقویت شده همواره کار هستند لذا برای اعتبار سنجی الگوریتم‌های NSGA-II و MOGWO با محدودیت افسیلون تقویت شده مطابقت داده می‌شود که همانطور از شکل (6) جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های مورد استفاده نزدیک به جواب دقیق است و می‌توان به الگوریتم برای حل مدل در ابعاد بزرگ اعتماد کرد.



شکل (6) مقایسه جواب‌های دقیق با جواب‌های الگوریتم‌های MOGWO, NSGA-II

4.3. الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOGWO

مسئله مکان‌یابی هاب در زنجیره تامین پایدار یک مسئله چالش برانگیز است که برای ارائه مرز پارتو مناسب نیاز به راه حل موثر دارد. از آنجایی که مسئله مکان‌یابی هاب به عنوان یک مسئله NP-hard شناخته شده است (O’Kelly 1987) و اینکه مدل مورد نظر این تحقیق علاوه بر مسئله مکان‌یابی هاب دارای متغیرها و پارامترهای بیشتری (مانند چندمحصولی بودن با سطوح کیفیت متفاوت) می‌باشد لذا حل مسئله با رویکردهای دقیق حتی برای مسائل با ابعاد کوچک نیاز به زمان قابل توجهی دارد. اما برای مسائل با ابعاد بزرگ این روش‌ها کارایی خود را از دست می‌دهند. لذا در این پژوهش الگوریتم‌های NSGA-II و MOGWO برای حل مسئله در ابعاد بزرگ پیشنهاد می‌شوند. به این منظور ابتدا روش نمایش جواب تشریح شده سپس ساختار الگوریتم‌ها در ادامه آمده است.

1.4.3. الگوریتم NSGA-II

الگوریتم ژنتیک به دلیل کارایی و پیاده‌سازی‌های متعدد آن انتخاب شده است و همچنین توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته و بعنوان یک الگوریتم کارآمد شناخته شده است. این الگوریتم، یک الگوریتم جستجوی مبتنی بر جمعیت است که از طبیعت ژنتیکی الهام گرفته است. و بر اساس مرتب سازی جواب‌های نامغلوب عمل می‌کند ساختار اصلی آن شامل عملگر تقاطع و جهش است.

• عملگر تقاطع

در الگوریتم ژنتیک (GA) تقاطع معمولاً بر روی یک جفت کروموزوم کار می‌کند و یک جفت کروموزوم جدید به عنوان فرزند تولید می‌کند. تقاطع در GA موجب انتقال ویژگی‌های خوب جواب‌های هر نسل به نسل بعد می‌گردد و این خود سبب همگرایی نسل‌ها می‌شود. به عنوان مثال، شکل زیر بخش اول کروموزوم که مربوط احداث یا عدم احداث هاب در گره می‌باشد را برای والد 1 و والد 2 نشان داده است. سپس از تقاطع آن‌ها دو فرزند جدید حاصل شده است.

والد 1	0	1	1	0	1	0
والد 2	1	1	0	0	0	1
فرزند 1	0	1	1	0	0	1
فرزند 2	1	1	0	0	1	0

عملگر تقاطع برای یک جفت کروموزوم

به دلیل اینکه بخش دوم و سوم نمایش جواب، وابسته به بخش اول نمایش جواب می‌باشند، پس از انجام تقاطع بر روی بخش اول نمایش جواب، بخش دوم و سوم نمایش جواب به صورت تصادفی تولید می‌شوند. بر روی بخش چهارم نمایش جواب نیز، همانند بخش اول نمایش جواب، تقاطع یک نقطه‌ای اعمال می‌شود.

• عملگر جهش

در GA معمولاً عملگر جهش روی تک کروموزوم/جواب اعمال می‌شود و سبب می‌شود که به طور تصادفی برخی از ژن‌های کروموزوم تغییر پیدا کنند و به اصلاح فرزند/جواب جدید تولید شود. این عملگر باعث بالا رفتن پراکندگی جواب‌ها می‌شود و شانس گیر افتادن در بهینه‌ی محلی را کاهش می‌دهد.

والد	1	0	1	0	1	0
فرزند	1	1	1	0	0	0

عملگر جابجایی/تعویض برای جهش فرزندان/جواب‌ها

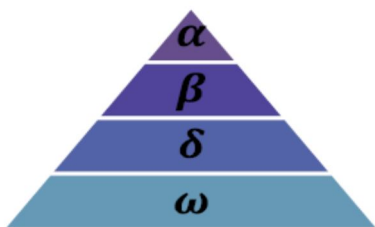
والد	1	1	0	0	1	0
فرزند	1	0	1	0	0	1

عملگر معکوس سازی برای جهش فرزندان/جوابها

نمونه‌ای از جهش بر روی بخش اول نمایش جواب را نشان داده شد. پس از اعمال جهش بر روی بخش اول نمایش جواب، بخش دوم و سوم نمایش جواب به صورت تصادفی تولید می‌شوند. بر روی بخش چهارم نمایش جواب نیز یکی از این دو نوع جهش بیان شده، اعمال می‌شود.

2.4.3. الگوریتم MOGWO

این الگوریتم توسط میرجلیلی و همکاران برای اولین مرتبه در سال 2014 ارائه شد و در سال 2016 نیز به چند هدفه تعمیم داده شد. الگوریتم MOGWO از رهبری سلسله‌مراتبی و مکانیزم شکار گرگ‌های خاکستری در طبیعت تبعیت می‌کند. گرگ‌های خاکستری یک قبیله، به چهارگروه موسوم به آلفا (α)، بتا (β)، دلتا (δ) و امگا (ω) برای تشکیل سلسله مراتب رهبری و تقسیم وظایف تقسیم می‌شوند. این رفتار طبیعی گرگ‌ها الهام بخش الگوریتم MOGWO می‌باشد که در ادامه بیشتر توضیح داده می‌شود.



شکل (7) شمایک سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری

اولین گروه، آلفاها هستند. آلفا به گرگ یا گرگ‌هایی اطلاق می‌شود که رهبران می‌باشند. تصمیم‌های جامعه گرگ‌ها بر عهده گرگ‌های آلفا می‌باشد. سطح بعدی در سلسله مراتب گرگ‌های بتا هستند. این گرگ‌ها به آلفا در تصمیم‌گیری کمک می‌کنند و مانند مشاوران و معاونان عمل می‌کنند از گرگ‌های آلفا دستور می‌گیرند ولی به اعضای پایین دست خود دستور می‌دهند. گروه دیگر گروه دلتا می‌باشد که از گرگ‌های آلفا و بتا دستور می‌گیرند. وظایفی مانند دیده‌بانی، نگهبانی و شکار نیز از جمله وظایف آنان است. گرگ‌های امگا پایین‌ترین رتبه را در ساختار سلسله‌مراتبی دارند و در مقابل دستورات دیگر گروه‌ها تسلیم‌اند.

فازهای شکار گرگ‌ها شامل: ردیابی، دنبال کردن و نزدیک شدن به طعمه، تعقیب کردن، محاصره کردن و خسته کردن طعمه و حمله به طعمه

در حالت تک هدفه بهترین جواب‌های موجود آلفا نام‌گذاری می‌شوند، و به همین ترتیب دومین و سومین دسته جواب‌های مناسب نیز بتا و دلتا نام‌گذاری می‌شوند. مابقی راه حل‌ها نیز امگا می‌باشند. شکار (جواب بهینه) توسط آلفا و بتا و دلتا راهنمایی شده و توسط امگا نیز دنبال می‌شود. اما در حالت چندهدفه نیاز به تعریف یک مجموعه به نام آرشیو داریم که جواب‌های نامغلوب تا آخرین تکرار را در خود ذخیره می‌کند. عضو جدید توسط حداقل یکی از اعضای آرشیو مغلوب شود.

• جستجو، محاصره و شکار طعمه

برای شبیه‌سازی ریاضی شکار گرگ‌ها در نظر گرفته می‌شود که آلفاها (بهترین جواب‌های کاندید)، بتاها (جواب‌های اولویت دوم) و دلتاها (اولویت سوم جواب‌ها) اطلاعات بهتری در مورد مکان‌های احتمالی طعمه دارند. بنابراین با توجه به موقعیت آلفا و بتا و دلتا توسط روابط زیر موقعیت شکار احتمالی شناسایی و گرگ‌های امگا نیز با توجه به آن مکان‌های خود را بروز گردانی می‌کنند. در شکل 8 نحوه تغییر موقعیت عوامل جستجو در فضای جواب با توجه به موقعیت آلفا و بتا و دلتا نمایش داده شده است. قابل ملاحظه است که

مکان نهایی یک نقطه تصادفی در یک دایره خواهد بود که توسط آلفا و بتا و دلتا در فضای جستجو تعریف می‌شوند. درواقع می‌توان این‌گونه تعبیر کرد که آلفا، بتا و دلتا مکان طعمه را تخمین زده و بقیه گرگ‌ها مکان خود را در اطراف آن تغییر می‌دهند.

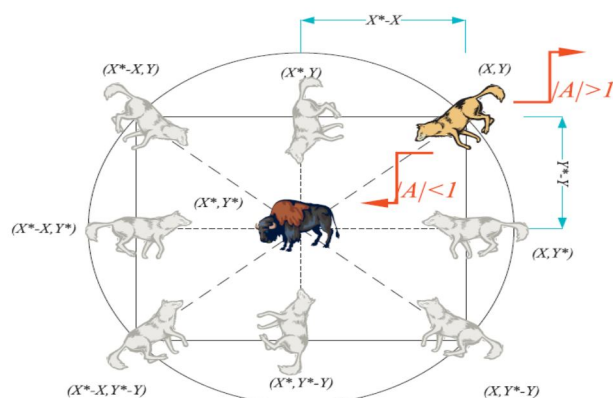
$$\begin{aligned}\vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \\ \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \\ \vec{X}(t+1) &= \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}\end{aligned}$$

مقادیر A و C با توجه به روابط زیر بدست می‌آیند.

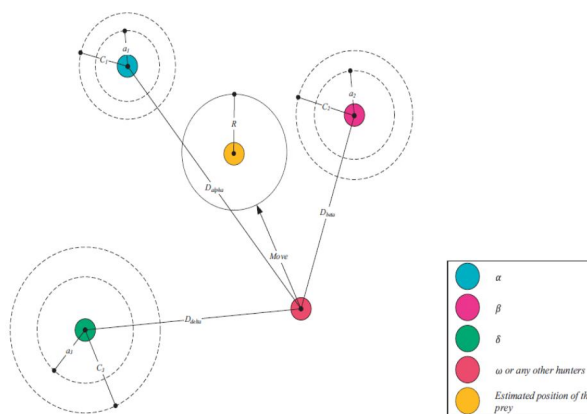
$$\begin{aligned}\vec{A} &= 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \\ \vec{C} &= 2 \cdot \vec{r}_2\end{aligned}$$

در این روابط المان a به طور خطی در طول تکرار الگوریتم از مقدار 2 تا مقدار 0 کاهش پیدا می‌کند و همچنین r1 و r2 بردارهای رندم در بازه [0,1] می‌باشند.

با توجه به روابط بالا، موقعیت طعمه در این مدل سازی وابسته به مقادیر X1، X2 و X3 که خود وابسته به مکان‌های آلفا، بتا و گاما هستند، می‌باشد. اکتشاف توسط A در صورتی که مقادیر بزرگ‌تر از 1 و یا کوچک‌تر از 1- داشته باشد تضمین می‌شود. عامل دیگری که سبب افزایش کاوش و جستجوی الگوریتم می‌شود، C می‌باشد. بردار C مقادیر احتمالی بین 0 و 2 را می‌گیرد که در صورتی که مقدار C بزرگ‌تر از 1 باشد، بدین معنی است که برای تعیین مسافت مورد نیاز حرکت عامل جستجو، بر موقعیت شکار تاکید شده است و در صورتی که کمتر از 1 باشد و همین‌طور هرچقدر که کمتر باشد، موقعیت شکار کمتر مورد اهمیت قرار می‌گیرد. دامنه C بر خلاف A کاهش نمی‌یابد تا در تکرارهای آخر نیز جستجو وجود داشته باشد. این دو کمک می‌کنند که الگوریتم در نقاط بهینه محلی گیر نکرده و جستجو مختل نشود. شکل (8 و 9) تصمیم‌گیری در مورد نزدیک شدن به طعمه و یا فاصله گرفتن و جستجو کردن را نشان می‌دهد (Mirjalili, Saremi, and Mohammad 2016), (Mirjalili, Mohammad, and Lewis 2014).



شکل (9) تغییر مکان گرگ نسبت به مقادیر مختلف A



شکل (8) نمایش موقعیت شکار و بروز رسانی موقعیت امگا

در پایان برای جمع‌بندی مجدداً یادآور می‌شویم که متغیرهای A و a الگوریتم را در گذاری یکنواخت بین اکتشاف و استخراج سوق می‌دهد. همچنین مکانیزم شبکه‌ای و مولفه انتخاب رهبر باعث حفظ تنوع آرشیو در طول بهینه‌سازی می‌شود.

5.3. تنظیم پارامتر الگوریتم با استفاده از روش تاگوچی

روش تاگوچی دو مزیت مهم دارد، اول آنکه نیازی به بررسی تمام آزمایشات ممکن برای عوامل ندارد و تنها کسر مشخصی از آزمایشات بررسی می‌شوند و دوم آنکه از کسر بررسی شده مقدار مناسبی اطلاعات استخراج می‌شود و با استفاده از اطلاعاتی نسبتاً خوب تنظیم عوامل صورت می‌پذیرد. در روش تاگوچی، عوامل تاثیر گذار بر نتیجه آزمایش به دو دسته غیر قابل کنترل (که اصطلاحاً اختلال (N) نامیده می‌شود) و قابل کنترل (که اصطلاحاً سیگنال (S) نامیده می‌شود) تقسیم می‌شود. سپس یک متغیر S/N تعریف می‌شود که نسبت سیگنال به اختلال است. روش تاگوچی در تنظیم پارامترها، عوامل را در سطوحی تنظیم می‌کند که نسبت S/N بیشینه شود. یکی از روش‌های فراابتکاری مورد استفاده در این پژوهش الگوریتم NSGAI می‌باشد، هفت پارامتر NPOP، MaxIt، PC، PM باید در سطوح بهینه تنظیم شوند. برای این منظور، نخست، برای هر پارامتر سه سطح کم (1) متوسط (2) و زیاد (3)، به‌طور مجزا برای حل مسائل، تعریف شده است که در جدول (3) آورده شده است. سپس مجموعه آزمایشات پیشنهادی روش تاگوچی برای چهار عامل در سه سطح محاسبه شده است که 9 حالت مختلف توسط روش تاگوچی طراحی می‌شود، (لازم به ذکر است که هر آزمایش 10 مرتبه انجام می‌شود و میانگین آن‌ها ثبت می‌شود که این کار جهت کاهش خطای الگوریتم‌ها انجام می‌شود و جواب قابل اعتمادتر خواهد شد).

جدول (3) سطوح تعریف شده برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک (NSGAI) برای حل مسائل

سطح زیاد (3)	سطح متوسط (2)	سطح کم (1)	پارامتر / عامل GA
120	100	80	Max it
60	40	30	npop
0.8	0.75	0.7	PC
0.30	0.25	0.2	PM

جدول (4) نتیجه حاصل شده از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل آزمایش

Diversity	MID	SNS	RAS
320372.9	835900.9	37032.69	0.045733
325863.4	826515.7	36519.31	0.030905
261114	825570.1	31482.51	0.033692
295027	831505.7	40524.99	0.046276
269823.3	830213.6	37697.63	0.037856
248962.6	821096.4	37322.17	0.024375
284535.9	829421.4	36719.23	0.031023
280432.8	810806.4	35007.29	0.032392
246326.7	822921.8	37027.54	0.029981

حال بمنظور ایجاد یک خروجی از هر آزمایش با استفاده از روش زیر همه‌ی شاخص‌ها را به یک پاسخ تبدیل خواهد شد.

- 1- ابتدا ماهیت هر شاخص مبنی بر منفی (کمتر - بهتر) یا مثبت بودن (بیشتر - بهتر) باید مشخص شود که در این مورد شاخص Diversity هرچه بیشتر باشد بهتر است و سایر شاخص‌ها ماهیتی منفی دارند. جدول (7) شاخص‌ها و موقعیت متفاوت که همان آزمایش‌های طراحی شده هستند و با O_i تعریف می‌شوند را نمایش می‌دهد.

جدول (8) ماهیت شاخص‌های مورد نظر پژوهش

		+	-	+	-
		x_1	x_2	x_3	x_4
Q_i		(Diversity)	(MID)	(SNS)	(RAS)
Q_1		r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}
Q_2		r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}
Q_i		r_{ij}	r_{ij}	r_{ij}	r_{ij}

که Q_i و x_j به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معیار j -ام و موقعیت i -ام هستند. همچنین r_{ij} برابر با مقداری است که موقعیت i در شاخص j کسب خواهد کرد.

2- مقادیر حاصل شده شاخص‌ها را مطابق با تکنیک بی واحد نمودن فازی در معادله‌های 18 و 19 نرمالیزه می‌شود:

$$x_j^+ \rightarrow R_{ij} = \frac{r_{ij} - \min(r_{ij})}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})} \quad 18$$

$$x_j^- \rightarrow R_{ij} = \frac{\max(r_{ij}) - r_{ij}}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})} \quad 19$$

در این روش نرمال سازی شاخص‌های با ماهیت منفی، ماهیتی مثبت پیدا خواهند کرد. با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی، شاخص‌ها بر حسب اهمیت اولویت‌بندی شده و متناسب با آن وزنی برای هر شاخص در نظر گرفته می‌شود که در این پژوهش اهمیت هر وزن از مرجع (Jolai et al. 2013) استفاده می‌شود. آنگاه با توجه به ضرایب اهمیت، مجموع وزن شاخص‌های هر آزمایش در معادله $Response$ محاسبه می‌گردد.

$$Response = \sqrt[2]{(MID)^2 + (RAS)^2 + (SNS)^1 + (SNS)^1 + (Diversity)^1}$$

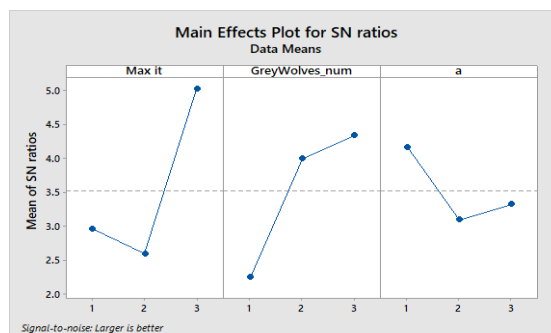
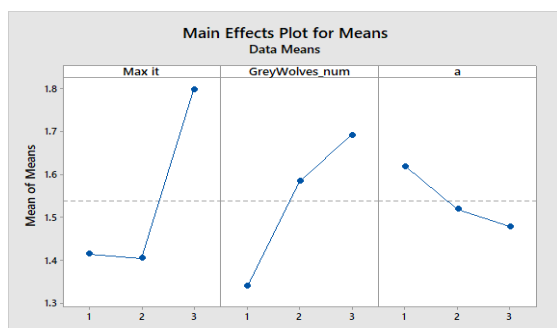
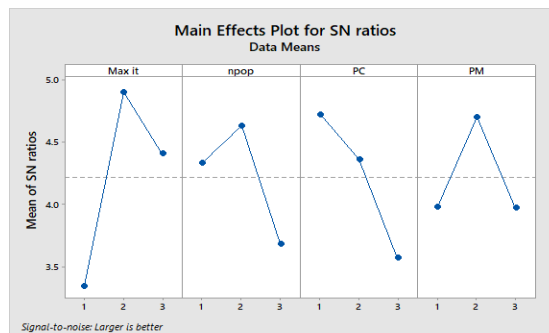
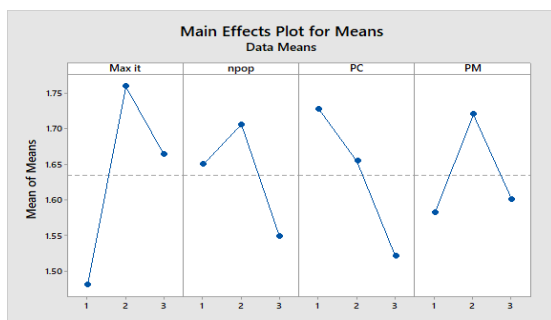
حال بر اساس مقادیر $Response$ هر الگوریتم، نرخ $\frac{S}{N}$ محاسبه شده و بر اساس آن، سطوح هریک از پارامترهای ورودی مشخص می‌گردد. برای این کار $Response$ حاصل شده به عنوان پاسخ نهایی برای آزمایشات ارائه می‌شود و از فرمول بیشتر-بهرتر تاگوچی برای محاسبه نسبت S/N استفاده می‌شود.

Response	1.5365	1.6573	1.2467	1.7614	1.6658	1.8526	1.6516	1.7951	1.5457
----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

جدول (9) نتیجه تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGAIII پیشنهادی به روش تاگوچی

Max it	npop	PC	PM
100	40	0.7	0.25

Max it	GreyWolves_num	a	alpha	nGrid	beta	gama
120	40	1	0.1	10	4	1



شکل (10) خروجی نرم افزار مینی تب برای تنظیم پارامتر

6.3. تعریف معیارهای ارزیابی

اگر یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه (مسئله کمینه‌سازی Z_1) موردنظر باشد، پر واضح است که هر روش حل که جواب شدنی ارائه دهد که به ازای آن Z_1 کمتر باشد، بهتر است. اما در مسئله MODM، نحوه ارزیابی متفاوت است و نمی‌توان به‌صورت تک هدفه ارزیابی کرد. بر همین اساس، معیارهای زیر را برای ارزیابی دو روش MODM و مقایسه آن‌ها نسبت به هم تعریف می‌کنیم. معیار بیشترین گستردگی: طول قطر مکعب فضایی را که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود، اندازه گیری می‌کند که در رابطه (20) محاسبه می‌شود. هر چه این مقدار بزرگتر باشد، بهتر است (Jolai et al. 2013).

$$DM = \sqrt{(\max f_{1i} - \min f_{1i})^2 + (\max f_{2i} - \min f_{2i})^2} \quad (20)$$

معیار میانگین انحرافات از جواب ایده آل (MID): در این معیار، ابتدا یک جواب ایده‌آل برای مسئله در نظر گرفته می‌شود و سپس میانگین انحرافات مجموعه جواب‌های پارتو از جواب ایده آل محاسبه می‌شود (Behnamian, Ghomi, and Zandieh 2009). جواب ایده‌آل حالتی است که به‌طور همزمان هر دو جواب در حالت بهینه خود باشند و یا در مسائل کمینه‌سازی می‌توان مبدأ مختصات رو به‌عنوان جواب ایده‌آل در نظر گرفت. معادله MID در رابطه (21) تعریف می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (21)$$

در رابطه‌ی فوق n تعداد جواب‌های پارتو است و مقدار c_i از رابطه‌ی (22) محاسبه می‌شود.

$$c_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2} \quad (22)$$

با توجه به اینکه تابع هدف اول و دوم از نوع مینیم سازی و تابع هدف سوم از نوع ماکزیمم سازی است، برای تعیین نقطه‌ی ایده آل، تابع هدف ماکزیمم را با معکوس کردن به مینیم تبدیل کرده و نقطه‌ی (0.0) را به عنوان نقطه‌ی ایده آل در نظر می‌گیریم. واضح است که هرچه معیار MID کمتر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر است.

معیار گسترش راه‌حل‌های نامغلوب (معیار SNS): SNS به‌عنوان شاخص تنوع می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود بالا بودن مقدار SNS به منزله‌ی بهتر بودن الگوریتم می‌باشد که در رابطه (23) تعریف می‌شود (Jolai et al. 2013).

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MID - c_i)^2}{n-1}} \quad (23)$$

معیار میزان دستیابی دوهدف بطور همزمان (معیار RAS): معیار ارزیابی دیگری که در این پژوهش پیشنهاد شده است، RAS است. معادله RAS در رابطه (24) نشان داده شده است.

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{1i} - F_i}{F_i} \right) + \left(\frac{f_{2i} - F_i}{F_i} \right)}{n} \quad (24)$$

4. نتایج عددی و بحث

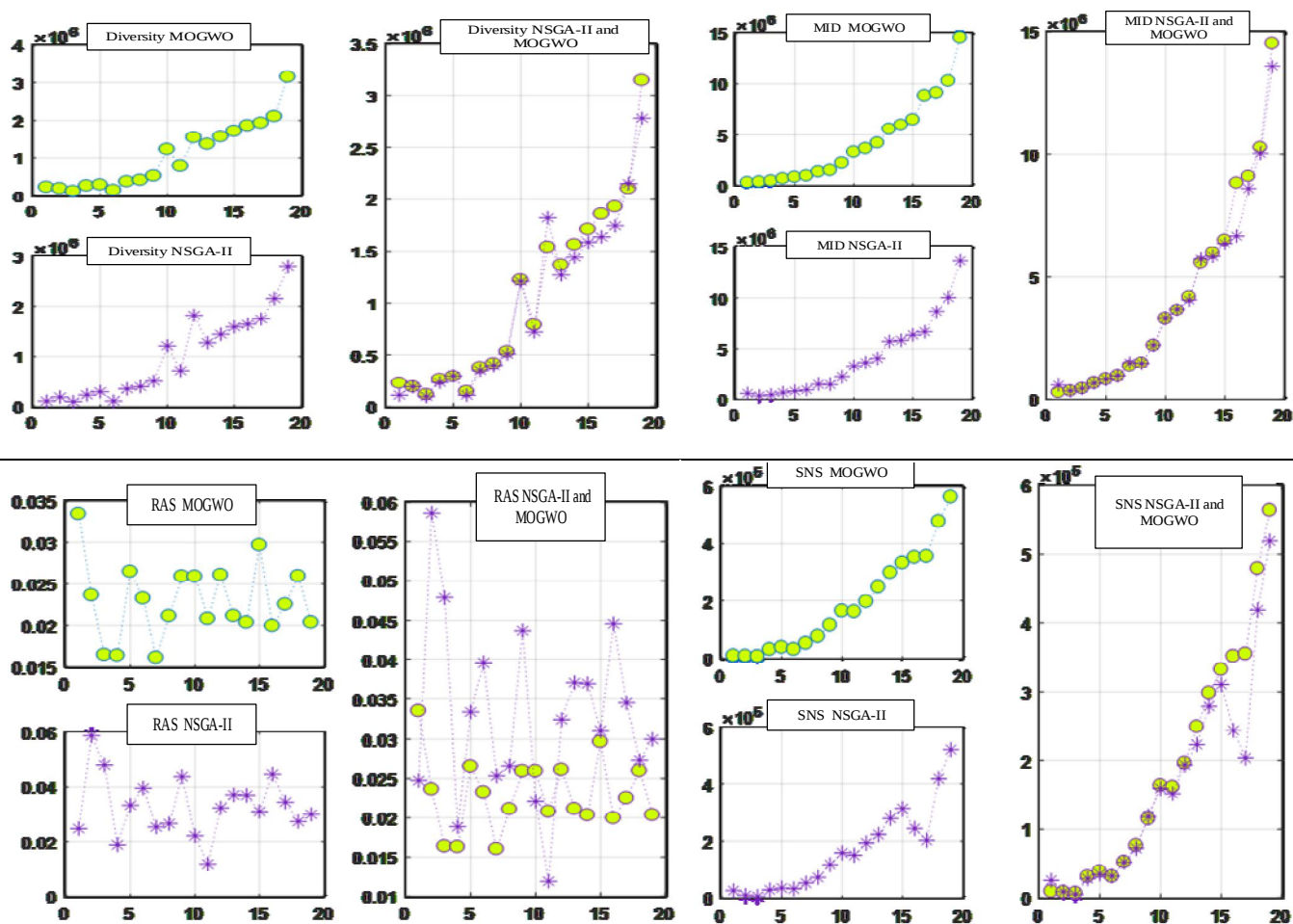
پس از تنظیم پارامترهای هر دو الگوریتم پیشنهادی به روش تاگوجی که در بخش قبل توضیح داده شد، در این بخش، مسائل تصادفی بعد کوچک، متوسط و بعد بزرگ بر اساس معیارهای تعریف‌شده ارزیابی می‌شوند. مقادیر بدست آمده در جدول (10) مشاهده می‌شود.

جدول (10) خروجی حاصل از الگوریتم‌های پژوهش

ابعاد مسئله	شاخص‌ها							
	Diversity		MID		SNS		RAS	
$i * j * k * p \quad q$	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II	MOGWO	NSGA-II
$3*6*2*2 \quad 3$	226576.6	111009.7	288322.86	591488	9545.321	25928.567	0.033467	0.0247386
$3*8*2*2$	191063.3	191746.2	352219.57	350818.96	8427.0044	9063.031	0.023622	0.0586487
$3*10*2*2$	115503.8	98252.33	451988.66	450849.74	7004.4801	5180.9789	0.0163859	0.0478642
$5*12*3*3 \quad 3$	263745	233949.4	669778.95	670684.82	31338.513	28375.168	0.0163046	0.0188644
$5*14*3*3$	291452.4	298092.3	826348.61	822201.89	38953.267	35293.3	0.0264956	0.0333455
$5*16*3*3$	144033.1	110800.1	958337.71	960280.05	31590.688	32272.41	0.0232484	0.0395719
$7*18*4*4 \quad 3$	376225	352173.2	1357647.3	1500082.3	52805.778	52747.212	0.0160413	0.025309
$7*20*4*4$	414121.1	398602.5	1498081	1480656.7	76831.584	72833.935	0.0211224	0.0265559
$7*30*4*4$	529689.9	506550.1	2209725.3	2221126.5	115186.8	118391.28	0.025905	0.0437101
$9*35*5*5 \quad 3$	1223356	1209275	3289412.5	3304972.1	163672.26	159507.52	0.0258937	0.0221233
$9*40*5*5$	786248.6	719113.6	3634393.2	3653850.2	161307.01	151625.54	0.0207928	0.0119172
$9*45*5*5$	1539800	1822495	4194610.6	4065330.7	196091.37	193310.74	0.02608	0.0323891
$11*50*6*6 \quad 3$	1362529	1271553	5562950.5	5713760.5	249350.95	223007.17	0.0211414	0.0371039
$11*55*6*6$	1563855	1439283	5958104.3	5827459.9	298420.93	279659.52	0.0203474	0.0369575
$11*60*6*6$	1711752	1586350	6500261.2	6359207.6	332643.53	310897.72	0.0296675	0.0310223
$13*65*7*7 \quad 3$	1859006	1639215	8827478.2	6671499.3	352329.32	243887.92	0.019951	0.044572
$13*70*7*7$	1928697	1746163	9104329.3	8596573.6	355758.71	203428.03	0.0225211	0.0345075
$13*80*7*7$	2105717	2154919	10275699	10036011	479089.67	418461.08	0.025943	0.0273012

20*100*8*10	3147054	2785497	14536442	13589574	564291.99	519107.89	0.0203618	0.03
میانگین کل	1041075	982896.8	4236638.5	4045601.5	185507.32	162262.05	0.0229101	0.0329738

با توجه به جدول نتایج و شکل (11) مشخص است، الگوریتم MOGWO نسبت به NSGA-II در سه شاخص Diversity, SNS, RAS نتایج بهتری ارائه داده است. در اکثر مسائلی که حل شد، به جز بعضی از مسائل MID الگوریتم NSGA-II مقدار کمتری نسبت به الگوریتم MOGWO دارد، ولی این اختلاف در تمامی ابعاد مسئله زیاد نیست و نمی توان قطعی در مورد عملکرد دو الگوریتم تصمیم گرفت. در واقع می توان گفت اختلاف معناداری بین دو الگوریتم وجود ندارد.



شکل (11) نمایش شاخص های مورد بررسی برای الگوریتم های پژوهش

با توجه به جدول نتایج، سطر مربوط به میانگین کل می توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOGWO عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. برای اعتبار دادن به این برتری، می بایست از آزمون ANOVA استفاده کرد که در قسمت بعدی به این مهم می پردازیم.

• آنالیز واریانس

برای مقایسه عملکرد دو الگوریتم پیشنهادی و بالا بردن اعتبار الگوریتم MOGWO از آزمون ANOVA استفاده می‌شود، شرط استفاده از این آزمون نرمال بودن داده هاست. برای بررسی این شرط از نرم افزار Minitab استفاده شد. برای نرمال بودن داده‌ها لازم است مقدار $P\text{-VALUE} \geq 0.01$ باشد. با توجه به نتایج کسب شده برای تمامی داده‌ها مقدار این احتمال از 0.01 بزرگتر بوده لذا نرمال بودن داده‌ها را با استفاده از این آزمون نمی‌توان رد کرد و همه داده در بازه اطمینان 99% قرار دارند. بنابراین داده‌ها دارای توزیع نرمال می‌باشند.

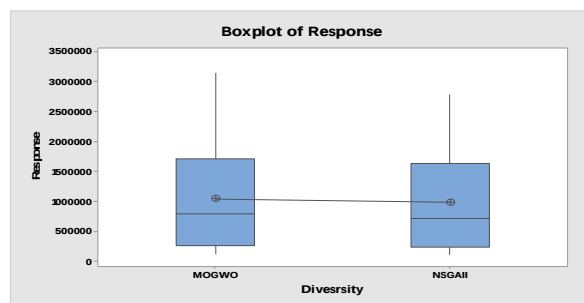
برای ارزیابی کارایی و عملکرد الگوریتم‌های پیشنهاد شده در این پژوهش از 19 مسئله استفاده شده است. با داشتن دو نوع الگوریتم MOGWO و NSGA-II هدف یافتن تفاوت معنی دار در کارایی الگوریتم‌هاست. بدین منظور هر الگوریتم در شرایط یکسان برای هر مسئله خاص 10 مرتبه اجرا شد و میانگین به عنوان جواب اصلی هر مسئله در جدول نتایج گزارش شد. حال با داشتن اطلاعات کافی و بررسی شرط لازم برای انجام آزمون آنووا در این قسمت تحلیل آماری انجام می‌شود در این تحقیق از آزمون فرض برابری میانگین دو جامعه یکطرفه استفاده می‌شود (آزمون توکی). عامل‌ها در اینجا الگوریتم‌ها هستند که در دو سطح مورد بررسی قرار می‌گیرند. باید با توجه به مقدار آماره بدست آمده در مورد فرض صفر قضاوت کنیم. اگر $P\text{value} \geq \alpha$ برقرار باشد آنگاه فرض H_0 (عدم وجود اختلاف معنادار بین میانگین‌های الگوریتم‌ها) رد می‌شود ولی اگر داشته باشیم $P\text{value} \leq \alpha$ باشد دلیلی برای رد H_0 وجود نخواهد داشت. در این آزمون مقدار α ، 0/05 در نظر گرفته شده است.

با توجه به جدول (11) و آزمون فرض که اگر مقدار $P\text{value} \geq \alpha$ باشد اختلاف معنا دار بین الگوریتم‌ها وجود دارد و اگر خلاف این باشد فرض H_0 مبنی بر برابر بودن میانگین جامعه و نداشتن اختلاف معنا دار پذیرفته می‌شود.

با توجه به خروجی نرم افزار Minitab و شکل (12) مقدار $P\text{value} = 0.833$ است که فرض H_0 پذیرفته می‌شود و از نظر شاخص Diversity اختلاف معناداری میان الگوریتم‌ها وجود ندارد.

جدول (11) آنالیز واریانس برای شاخص Diversity

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diversity	1	3.22E+10	3.22E+10	0.05	0.833
Error	36	2.56E+13	7.10E+11		
Total	37	2.56E+13			



شکل (12) نمودار مقایسه‌ی شاخص Diversity

همچنین با توجه به شکل (13) و جدول (12) که خروجی حاصل از آزمون آنوا برای شاخص MID می‌باشد مقدار $P\text{value} = 0.881$ می‌باشد لذا می‌توان نتیجه گرفت اختلاف معناداری بین این دو الگوریتم وجود ندارد هرچند که در مقایسه میانگین کلی الگوریتم NSGA-II بهتر است.

جدول (12) آنالیز واریانس برای شاخص MID

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
MID	1	3.47E+11	3.47E+11	0.02	0.881
Error	36	5.51E+14	1.53E+13		
Total	37	5.52E+14			

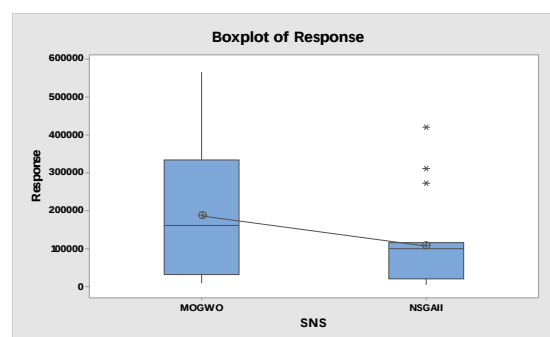


شکل (13) نمودار مقایسه شاخص MID

با توجه به جدول (13) الگوریتم‌های این پژوهش در دو گروه تفکیک شده‌اند. همانطور که مشخص است برای شاخص SNS، مقدار $Pvalue = 0.039$ می‌باشد که فرض صفر رد می‌شود و اختلاف معنادار میان دو الگوریتم وجود دارد که با توجه به شکل (14) می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOGWO بهتر است.

جدول (13) آنالیز واریانس برای شاخص SNS

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
SNS	1	5.97E+10	5.97E+10	.868	0.039
Error	36	7.51E+11	2.09E+10		
Total	37	8.11E+11			
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence					
SNS	N	Mean	Grouping		
NSGAI	19	106209	A		
MOGWO	19	185507	B		

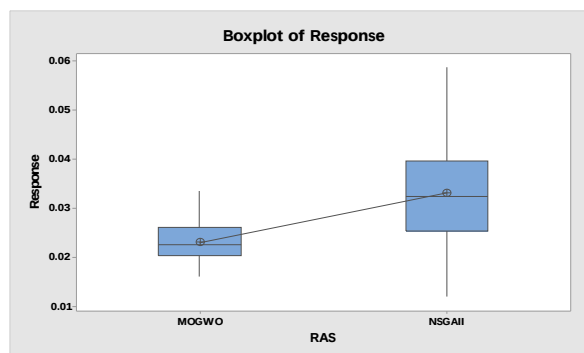


شکل (14) نمودار مقایسه شاخص SNS

در نهایت برای شاخص RAS با توجه به جدول (14) مقدار $Pvalue = 0.001$ می‌باشد که نشان دهنده‌ی اختلاف معنا دار بین دو الگوریتم می‌باشد. با توجه به خروجی آزمون آنوا دو الگوریتم در دو گروه تفکیک شده‌اند و با توجه به شکل (15) می‌توان نتیجه گرفت با توجه به نتایج ارائه شده و تحلیل آن می‌توان گفت الگوریتم MOGWO در دو شاخص SNS و RAS نسبت به الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری دارد.

جدول (14) آنالیز واریانس برای شاخص RAS

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
RAS	1	0.000962	0.000962	13.55	0.001
Error	36	0.002557	0.000071		
Total	37	0.003519			
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence					
RAS	N	Mean	Grouping		
NSGAI	19	0.033	A		
MOGWO	19	0.023	B		



شکل (15) نمودار مقایسه شاخص RAS

6. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به فضای رقابتی موجود و نیاز مشتریان برای محصولات با سطوح کیفیت متفاوت، صنایع تولیدی می‌بایست شبکه زنجیره تامین را بر اساس توجه به انواع مشتریان جهت بهره‌وری بیشتر طراحی کنند. در این پژوهش سه بخش مصرف‌کننده بر اساس آگاهی آن‌ها از سبز بودن محصول یعنی مصرف‌کنندگان سبز، ناسازگار و قرمز تعریف شد و یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی این شبکه زنجیره تامین که همزمان سه جنبه‌ی پایداری را در نظر دارد ارائه گردید که شامل تولیدکنندگان، سیستم حمل‌ونقل هاب و مراکز توزیع که تقاضای سه بخش مشتریان در آن برآورد می‌شود. در نظر گرفتن تقاضای انواع مشتریان برای انواع محصولات در سطوح کیفیت متفاوت باعث می‌شود که مدیران صنایع تولیدی بینش قابل توجهی را برای مدیریت زنجیره تامین شرکت به‌دست آورند، علاوه بر این توجه به نیاز مشتریان و کسب رضایت آنان که امروزه یک امر لازم و ضروری می‌باشد یکی از جنبه‌های مسئولیت اجتماعی است که در استاندارد ایزو 29000 در قالب "مسائل مربوط به مشتریان" مطرح شده است. بطوری که اگر اطلاعات کسب شده از مرکز توزیع (اطلاعات حاصل از مطالعه‌ی بازار) نشان دهنده‌ی آن باشد که تقاضای بخش مصرف‌کننده سبز در حال گسترش است مدیران می‌توانند با همکاری با تأمین‌کنندگان در سطح سبز مورد نیاز و متناسب با نیاز مشتریان تولید خود را هدفمند کنند.

در این مقاله یک مدل چند هدفه که به بهینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل، هزینه احداث هاب و هزینه تولید محصولات به عنوان بخش اقتصادی، انتشار گاز کربن توسط وسایل نقلیه به عنوان مسائل زیست‌محیطی، ایجاد اشتغال و توسعه‌ی منطقه‌ای به عنوان مسئولیت اجتماعی جهت رسیدن به پایداری ارائه گردید. با توجه نتایج حاصل از پژوهش‌های قبلی و مزیت سیستم حمل‌ونقل هاب، هاب‌ها در کاهش هزینه‌ها تأثیر بسزایی دارند و از طرفی با کاهش حمل‌ونقل موجب کاهش آلاینده‌ی نیز می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که اگر تمرکز مدیران بر کاهش آلاینده‌ی و ایجاد اشتغال و توسعه منطقه‌ای که منوط به احداث هاب باشد می‌بایست هزینه بیشتری را متحمل شد که مدیران صنایع می‌بایست تصمیم‌گیری کنند که به دنبال چه سطحی از پایداری هستند. مدل این پژوهش یک راه حل جامع برای شرکت‌های زنجیره تأمین که می‌خواهند به یک تعادل منطقی بین سه جنبه‌ی پایداری برسند ارائه می‌دهد. برای حل این مدل در ابعاد کوچک از نرم‌افزار GAMS استفاده شد توجه به این موضوع که در چنین پژوهشی محقق به دنبال جواب کارایی می‌باشد که مغلوب نشود، در این پژوهش برای یافتن جواب دقیق، از طریق نرم‌افزار Gams روش اپسیلون محدودیت و روش اپسیلون محدودیت تقویت شده استفاده شد و مقایسه‌ای بین این دو روش انجام شد که همانطور انتظار می‌رفت جواب‌های روش تقویت شده همواره کارا هستند و در هیچ نقطه‌ای مغلوب روش اپسیلون محدودیت نمی‌شوند برای حل مدل در ابعاد بزرگ از روش‌های فراابتکاری NSGA-II و MOGWO استفاده شد با توجه شاخص‌های تعریف شده و تحلیل‌های آماری این نتیجه حاصل شد که الگوریتم MOGWO عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد.

مراجع

- Aghaei, J., N. Amjady, and H. A. Shayanfar. 2011. "Multi-Objective Electricity Market Clearing Considering Dynamic Security by Lexicographic Optimization and Augmented Epsilon Constraint Method." *Applied Soft Computing Journal* 11(4):3846–58. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2011.02.022>).
- Amin, Saman Hassanzadeh and Guoqing Zhang. 2013. "A Multi-Objective Facility Location Model for Closed-Loop Supply Chain Network under Uncertain Demand and Return." *Applied Mathematical Modelling* 37(6):4165–76. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.039>).
- Arampanitzi, Christina and Ioannis Minis. 2017. "A New Model for Designing Sustainable Supply Chain Networks and Its Application to a Global Manufacturer." *Journal of Cleaner Production* 156:276–92. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.164>).
- Babazadeh, Reza, Jafar Razmi, Mir Saman Pishvaei, and Masoud Rabbani. 2017. "A Sustainable Second-Generation Biodiesel Supply Chain Network Design Problem under Risk." *Omega (United Kingdom)* 66:258–77. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.010>).
- Behnamian, J., S. M. T. Fatemi Ghomi, and M. Zandieh. 2009. "Expert Systems with Applications A Multi-Phase

Covering Pareto-Optimal Front Method to Multi-Objective Scheduling in a Realistic Hybrid Flowshop Using a Hybrid Metaheuristic." *Expert Systems With Applications* 36(8):11057–69. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.02.080>).

Chen, Ying Jian. 2013. "Environmental Sustainability and Green Supply Chain Management." *Advanced Materials Research* 664(1):123–28.

Coskun, Semih, Leyla Ozgur, Olcay Polat, and Askiner Gungor. 2016. "A Model Proposal for Green Supply Chain Network Design Based on Consumer Segmentation." *Journal of Cleaner Production* 110:149–57. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.063>).

Devika, K., A. Jafarian, and V. Nourbakhsh. 2014. "Designing a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Based on Triple Bottom Line Approach : A Comparison of Metaheuristics Hybridization Techniques." *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.032>).

Diabat, Ali, Tarek Abdallah, Abbas Al-refaie, Davor Svetinovic, and Kannan Govindan. 2013. "Strategic Closed-Loop Facility Location Problem." *IEEE Transactions on Engineering Management* 60(2):398–408.

Diabat, Ali and Mohammed Al-Salem. 2015. "An Integrated Supply Chain Problem with Environmental Considerations." *International Journal of Production Economics* 164:330–38. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.004>).

Elhedhli, Samir and Ryan Merrick. 2012. "Green Supply Chain Network Design to Reduce Carbon Emissions." *Transportation Research Part D* 17(5):370–79. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2012.02.002>).

Eskandarpour, Majid, Pierre Dejax, Joe Miemczyk, and Olivier Péton. 2015. "Sustainable Supply Chain Network Design :". *Omega* 54:11–32. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>).

Ge, Houtian and Stephan Goetz. 2016. "Hub Location in Fresh Produce Supply Chains." 1–25.

Graves, Stephen C., Rohit Bhatnagar, and Michelle L. F. Cheong. 2007. "Logistics Network Design with Supplier Consolidation Hubs and Multiple Shipment Options." *Journal of Industrial and Management Optimization* 3(1):51–69.

Harraz, Nermine A. and Noha M. Galal. 2011. "Design of Sustainable End-of-Life Vehicle Recovery Network in Egypt." *Ain Shams Engineering Journal* 2(3–4):211–19. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2011.09.006>).

Hugo, A. and E. N. Pistikopoulos. 2005. "Environmentally Conscious Long-Range Planning and Design of Supply Chain Networks." *Journal of Cleaner Production* 13(15):1428–48.

Jafari, H. R., M. Seifbarghy, and M. Omidvari. 2017. "Sustainable Supply Chain Design with Water Environmental Impacts and Justice-Oriented Employment Considerations : A Case Study in Textile Industry." 24.

Jolai, F., H. Asefi, M. Rabiee, and P. Ramezani. 2013. "Bi-Objective Simulated Annealing Approaches for No-Wait Two-Stage Flexible Flow Shop Scheduling Problem." *Scientia Iranica* 20(3):861–72.

Madani, Seyed Reza and Morteza Rasti-Barzoki. 2017. "Sustainable Supply Chain Management with Pricing, Greening and Governmental Tariffs Determining Strategies: A Game-Theoretic Approach." *Computers and Industrial Engineering* 105:287–98. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.017>).

Mavrotas, George. 2009. "Effective Implementation of the ϵ -Constraint Method in Multi-Objective Mathematical Programming Problems." *Applied Mathematics and Computation* 213(2):455–65. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>).

Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad, and Andrew Lewis. 2014. "Advances in Engineering Software Grey Wolf Optimizer." *Advances in Engineering Software* 69:46–61. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>).

Mirjalili, Seyedali, Shahrzad Saremi, and Seyed Mohammad. 2016. "Multi-Objective Grey Wolf Optimizer : A Novel Algorithm for Multi-Criterion Optimization." *Expert Systems With Applications* 47:106–19. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2015.10.039>).

Musavi, Mir Mohammad and Ali Bozorgi-Amiri. 2017. "A Multi-Objective Sustainable Hub Location-Scheduling Problem for Perishable Food Supply Chain." *Computers and Industrial Engineering* 113:766–78. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.039>).

O'Kelly, Morton E. 1987. "A Quadratic Integer Program for the Location of Interacting Hub Facilities A Quadratic Integer Program for the Location of Interacting Hub Facilities." 2217(December 1987).

Osmani, Atif and Jun Zhang. 2017. "Multi-Period Stochastic Optimization of a Sustainable Multi-Feedstock Second Generation Bioethanol Supply Chain – A Logistic Case Study in Midwestern United States." *Land Use Policy*

61:420–50. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.028>).

Pishvaei, M. S., J. Razmi, and S. A. Torabi. 2014. "An Accelerated Benders Decomposition Algorithm for Sustainable Supply Chain Network Design under Uncertainty: A Case Study of Medical Needle and Syringe Supply Chain." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 67:14–38. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.04.001>).

Pishvaei, M. S., J. Razmi, and S. A. Torabi. 2012. "Robust Possibilistic Programming for Socially Responsible Supply Chain Network Design : A New Approach." *Fuzzy Sets and Systems* 206:1–20. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>).

Roni, Mohammad S., Sandra D. Eksioğlu, Kara G. Cafferty, and Jacob J. Jacobson. 2016. "A Multi-Objective , Hub-and-Spoke Model to Design and Manage Biofuel Supply Chains."

Saffar, Mohammad Mahdi, G. Hamed Shakouri, and Jafar Razmi. 2015. "A New Multi Objective Optimization Model for Designing a Green Supply Chain Network under Uncertainty." *International Journal of Industrial Engineering Computations* 6(1):15–32.

Santibañez-Aguilar, José Ezequiel, J. Betzabe González-Campos, José María Ponce-Ortega, Medardo Serna-González, and Mahmoud M. El-Halwagi. 2014. "Optimal Planning and Site Selection for Distributed Multiproduct Biorefineries Involving Economic, Environmental and Social Objectives." *Journal of Cleaner Production* 65:270–94. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>).

Seuring, Stefan. 2013. "A Review of Modeling Approaches for Sustainable Supply Chain Management." *Decision Support Systems and Electronic Commerce* 54(4):1513–20.

Soleimani, Hamed, Kannan Govindan, Hamid Saghafi, and Hamid Jafari. 2017. "Fuzzy Multi-Objective Sustainable and Green Closed-Loop Supply Chain Network Design." *Computers and Industrial Engineering* 109:191–203. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.038>).

Srivastava, Samir K. 2007. "Green Supply-chain Management: A State-of-the-art Literature Review." *International Journal of Management Reviews* 9(1):53–80.

Varsei Mohsen and Sergey Polyakovskiy. 2017. "Sustainable Supply Chain Network Design : A Case of the Wine Industry in Australia." (January).

Xifeng, Tang, Zhang Ji, and Xu Peng. 2013. "A Multi-Objective Optimization Model for Sustainable Logistics Facility Location." *Transportation Research Part D* 22:45–48. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2013.03.003>).

Zhalechian, Mohammad, Reza Tavakkoli-moghaddam, and Yaser Rahimi. 2017. "Engineering Applications of Artificial Intelligence A Self-Adaptive Evolutionary Algorithm for a Fuzzy Multi-Objective Hub Location Problem : An Integration of Responsiveness and Social Responsibility." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 62(March):1–16. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2017.03.006>).

Zhang, Shuzhu, Carman Ka Man Lee, Kan Wu, and King Lun Choy. 2016. "Multi-Objective Optimization for Sustainable Supply Chain Network Design Considering Multiple Distribution Channels." *Expert Systems with Applications* 65:87–99.