مقدمه ای بر کاربرد مدل های عامل مبنا در کاربری اراضی

فریدون سرمدیان
استاد گروه مهندسی علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران

مقدمه

یکی از چالش هایی که امروزه بشر با آن دست و پنجه نرم میکند مسئلهٔ رو به رشد تغییر و تخریب اراضی به واسطهٔ دخالت انسان بر اکوسیستم می باشد. این تغییرات که بیشتر مربوط به تغییر الگوهای کاربری اراضی بوده، اهمیت زیادی در مطالعات زیست محیطی دارد. در راستای افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی و سطح زندگی، به تدریج در طول چندین سال گذشته شاهد تبدیل اراضی کشاورزی، مرتعی، زراعی و حتی جنگلی به کاربری های مختلف صنعتی و شهری بوده ایم. این مسئله ضمن نابودی بخش عظیمی از منابع طبیعی به عنوان سرمایه های با ارزش جهانی، منجر به صدمات جبران ناپذیر دیگری از جمله تغییر اقلیم و گرمایش زمین نیز شده است که به نوبه خود تأثیر قابل توجهی بر شرایط فعلی کشاورزی میگذارد (Hatfield et al, 2014).

از دیگر پیامدهای مهم تغییر پوشش/کاربری اراضی در سطح جهانی، از بین رفتن تنوع زیستی، آلودگی زیست محیطی و تخریب اوزون استراتوسفری می باشد.

علاوه بر این بیشترین نگرانی مبرم برای بخش بزرگی از جمعیت انسانی و بیشتر دولتمردان، عرضه بلند مدت و تولید غذا و دیگر مواد اساسی مورد نیاز در آینده می باشد (Pontius Jr. & Chen, 2006). تا سال ۲۰۵۰ نیاز بشر به غذا ۷۰٪ بیشتر می شود. اگر فرض شود که هیچگونه پیشرفت چشمگیری در کاهش ضایعات، کاهش رشد جمعیت و توقف روبه رشد محصولات دامی دیده نشود، بسیار دور از واقعیت است که در مورد آینده امیدوار بود. بدون بهبود عملکرد، این افزایش ۷۰ درصدی نیاز مواد غذایی، نیازمند بیش از ۳۴۰۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع مزارع جدید برای کشت و کشاورزی می باشد، سطحی معادل با کل قاره آفریقا (فائو، ۲۰۱۴). جمعیت جهان الان ۷میلیارد است تا ۲۰۵۰ به ۹،۵ میلیارد میرسد.

روند های جهانی همچون پویایی جمعیت، افزایش تقاضا برای مصرف انرژی، غذا و آب، فشار قابل ملاحظه ای را بر اراضی تحمیل می کند و طبیعتاً انتظار میرود که تقاضا برای غذا، انرژی و آب در سال های آتی افزایش یابد. افزایش روز افزون تقاضا برای منابع حاصل از زمین (مثل غذا، آب شیرین، سوخت) همراه با شیوه های ناپایدار مدیریت اراضی منجر به افزایش تخریب های زیست محیطی گردیده است که به طور جدی توانایی جهانی تولید مواد غذایی را تهدید می کند (Nellemann, 2009)، بطوریکه بنا به گفتهٔ نمایندهٔ سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (فائو) اگر در جهان طی ۲۵ سال آینده تخریب اراضی با همین روند فعلی ادامه یابد ۱۲ درصد از تولیدات غذایی جهان کاسته می‌شود و به میزان ۳۰ درصد قیمت این محصولات افزایش می یابد.

رودررویی با این افزایش تقاضا نیز نیازمند آن است که سطح اراضی کشاورزی افزایش یابد که اگر چنانچه بهره وری اراضی به شیوه ای صحیح و مدیریت پایدار صورت نگیرد روند فعلی جنگل زدایی و تبدیل آن به اراضی کشاورزی به منظور رفع نیاز غذایی که هم اکنون - بخصوص در کشورهای گرمسیری- شاهد آن هستیم، تشدید خواهد یافت (Diogo et al, 2015).

لذا این مسائل: افزایش جمعیت، افزایش تقاضا برای منابع حاصل از زمین (غذا، آب، سوخت)، کاهش سطح اراضی قابل کشت، افزایش تخریب های زیست محیطی محققین سراسر دنیا را به انجام تحقیقات در زمینهٔ تغییر پوشش/ کاربری اراضی و یافتن بهترین روش مدیریتی و اجرایی و تاکید بر تشدید کشاورزی پایدار تا جاییکه ممکن است دارند. باید خاطر نشان ساخت که با کشاورزی پایدار ضمن اینکه زمین های کشاورزی قادر به بازده بالا خواهند بود بلکه کشت در آن ها ادامه خواهد داشت، بجای اینکه به کاربری های دیگر تبدیل شوند که خود ممکن است سبب از دست دادن زیستگاه های بیشتر گردد.

یکی از مهم ترین بخش هایی که در این زمینه در چندین سال گذشته بسیار مورد توجه بوده و تحقیقات مرتبط با آن با سرعت زیادی رو به رشد بوده است، مبحث تغییر پوشش/ کاربری اراضی (***LUCC***[1]) با استفاده از مدل های عامل مبنا می باشد. در چندین سال گذشته، تحقیقات جهانی گسترده ای در رابطه با مسئلهٔ تغییر پوشش/ کاربری اراضی، پیامدهای آن بر منابع اراضی و جامعهٔ انسانی و راهکارهای مقابله با آن صورت گرفته است. مدل های عامل مبنا در علوم مختلفی چون بیولوژی و علوم پزشکی، علوم اقتصادی و اجتماعی، تجارت و کسب و کار، شبکه های حمل و نقل، شبیه سازی کاربرد دارند.

در علوم مربوط به منابع طبیعی و کشاورزی، این روش ها با این هدف رو به کار آمده اند تا تکامل توأم سیستم های انسانی و سیمای اراضی را بر اساس تعاملات بین کنشگران انسانی و محیط زیستشان به خوبی بیان کنند.

این مدل ها میتوانند پویایی و چگونگی نیروهای وارد شده به اراضی را نشان دهند و مشخص کنند که چطور تصمیمات کشاورزان و زمین داران ممکن است روی جهت گیری آینده تاثیر بگذارد.

این مدل ها از سال ۱۹۶۰ توسعه یافته و از نظر تعداد و میزان محبوبیت رو به افزایش اند. برتری ویژه این مدل ها نسبت به روش های قدیمی (مثل ماشین های خودکار سلولی، مدل زنجیره مارکوف، مدل مارکوف- *CA* و مدل رگرسیون لجستیک) این است که این مدل ها قادر به وارد کردن اثر انسان ها - که عاملان اصلی تغییر محیط زیست می باشند و بر حومه ها و محیط اطراف به واسطه ی سبک زندگیشان تأثیر می‌گذارند – هستند و همچنین مدل های عامل- مبنا به دلیل ماهیت پایین به بالا، قابلیت شبیه سازی تصمیم گیری و تنوع و انعطاف پذیری بالا از جایگاه ممتازی در بین روش های مورد استفاده برخوردار شده است.

شبیه سازی، به معنای نمایش عملکردهای سیستم‌های دنیای واقعی توسط محاسبات ریاضی است. این روش به ما کمک می‌کند تا سیستم‌های پیچیده را بدون دخالت در دنیای واقعی همانندسازی کنیم.

بر اساس اطلاعات بدست آمده از شبیه‌سازی و با ساخت یک مدل می‌توان روند و نحوه کار یک سیستم را در آینده مشخص کرد.

عامل چیست؟

هنوز توافق جهانی در صحت تعریف واژه "عامل" وجود ندارد. بعضی از مدلسازان، هر نوع مولفه مستقلی (نرم افزار، مدل، فرد و ...) را یک عامل در نظر می گیرند (Bonabeau, 2002). بعضی ها نیز معتقدند که رفتار یک مولفه برای اینکه عامل شناخته شود بایستی قابل انطباق باشد؛ یعنی مولفه ای برچسب عامل را میگیرد که از محیط پیرامونش آموزش گیرد و رفتارش را در پاسخ به آن تغییر دهد.

مشخصات کلی عامل:

- ✓ یک عامل قابل شناسایی است.
- ✓ یک عامل جامع است (بدون نیاز به عامل بیرونی).
- ✓ یک عامل دارای مکان مشخصی است
- ✓ یک عامل دارای هدف جهت یافته ای است.
- ✓ یک عامل مستقل و دارای کنترل داخلی است.
- ✓ یک عامل دارای انعطاف است یعنی توانایی یادگیری و تطابق رفتارهایش را بر اساس تجربه دارد.

این امر مستلزم داشتن حافظه است.

[1] Land Use/ Cover Change

تعاریف متعددی برای واژۀ "عامل" وجود دارد. بسیاری از این تعاریف، عامل را در داشتن ویژگی های زیر مشترک می دانند (Torrens, 2003, Macal and North 2005, Castle and Crooks 2006):

- ✓ خودمختاری یا مستقل بودن (*Autonomy*): عامل ها، مستقل و دارای کنترل داخلی هستند. آن ها می توانند اطلاعات را پردازش و با سایر عامل ها مبادله کنند. یک عامل میتواند به طور مستقل در محیط خود و یا در تعامل با سایر عامل ها، حداقل در محدوده کوچکی از موقعیت های مطلوبش ایفای نقش کند.
- ✓ ناهمگونی (*Heterogeneity*): عامل ها می توانند صفات متفاوتی را شامل سن، جنسیت و تحصیلات نشان دهند.
- ✓ فعالیت (*Activity*): عامل ها باید فعال باشند زیرا آن ها اثرات مستقلی را بر شبیه سازی اعمال می کنند.
- ✓ پویایی (*Mobility*): عامل ها دارای پویایی اند و می توانند درون یک مدل به گردش درآیند. این ویژگی در کنار توانایی و هوش[۲] آن ها در طیف وسیعی از کاربردهای بالقوه، بخصوص در شبیه سازی مکانی دارای اهمیت است.
- ✓ انطباق/ یادگیری (*Adaptation / Learning*): یک عامل دارای انعطاف است یعنی توانایی یادگیری و تطابق رفتارهایش را بر اساس تجربه دارد. عامل ها می توانند طراحی بشوند تا موقعیتشان را بسته به وضعیت فعلی خود تغییر دهند.

یک مدل عامل مبنا شامل چندین عامل است که درون یک محیط شبیه سازی شده در حال تعامل اند. عامل ها می توانند طیف وسیعی از موجودات را در دنیای واقعی شامل شوند مثل اتم ها، سلول های بیولوژیکی، مردم و سازمان ها (Janssen and Jager, 2000).

در مدل عامل-مبنا، قوانینی برای اقداماتِ عامل تعریف می شود که این قوانین می تواند رفتارها و ارتباطات عامل را تحت تاثیر قرار دهد. این قوانین معمولاً از مشاهده، دانش کارشناس و تجزیه و تحلیل داده ها به دست می آید. همۀ عامل ها می توانند دارای یک قانون مشترک باشند و یا هر عامل می تواند قانون مختص به خود را داشته باشد. قوانین همیشه از پیش تعریف شده نیستند و می توانند تکامل یابند زیرا عامل ها توانایی یادگیری[۳] و آموزش را دارند. عامل ها می توانند با یکدیگر و با محیط اطرافشان تعامل برقرار کنند. آن ها از نظر مکانی واضح و مشخص اند یعنی موقعیت جغرافیایی مشخصی دارند (*An, 2012*).

مزایای مدلسازی عامل مبنا:

۱- تاکیید بر *emergent phenomena*.

ظهوریافتگی (*Emergence*)، فرایندی است که طی آن اجزا کوچک تر و یا ساده تر طی تعاملاتشان با هم، اجزا بزرگتر و یا پیچیده تری را می سازند که خواص اجزا ساده تر را ندارد. یکی از انگیزه های مدلسازی عامل مبنا، توانایی ان در دریافت پدیده ظهوریافتگی است. ظهور یافتگی یک رفتار مهم و یا جالب است که توسط عامل ها و یا فرایندهای تحت مطالعه به نمایش درمی آید که این رفتار صراحتا نمی توانست در ابتدای کار مدلسازی شود ولی وقتی مدل ران میشود در نتیجه تعاملات عامل ها، نمایان می شود. رفتار نوظهور اغلب غیرقابل پیش بینی است. اینکه چطور رفتار غیرقابل پیش بینی را در خروجی شبیه سازی بتوان شناسایی کرد در محدوده مطالعات آتی قرار میگیرد. ظهوریافتگی می تواند با مدل های عامل مبنای ساده ای چون *Life* و *Boids* نشان داده شود. مدل های پیچیده تر که مردم علاقمندند تا برای نمایش پدیده های جهان واقعی آن ها را بسازند، میتواند رفتار ظهوریافتگی را در نتیجۀ تعاملات عامل ها به نمایش درآورد. الگوریتم های مدلسازی عامل مبنایی که بر اساس ظهوریافتگی است (*algorithms based on emergence*) منجر به تکنیک های بهینه

[۲] Intelligence
[۳] Learning ability

سازی مثل بهینه سازی کلونی مورچه (*ant colony optimization*) و بهینه سازی اجتماع ذرات (*particle swarm optimization*) شده است که توانسته مشکلات عملی را حل کند (ماکال و نورث، ۲۰۱۳). در واقع این پدیده می گوید که ما نمیتوانیم رفتار پدیده ها را بصورت کلی مدلسازی کنیم چون این کلیات جمع جزئیات است. ما رفتار جزئیات را که می توانند خیلی ساده باشند را مدلسازی می کنیم و بعد میبینیم که در کل چه اتفاقی افتاده است. در تغییر کاربری اراضی نیز به همین صورت است، یعنی هر کشاورزی یک تصمیم میگیرد که ما آن را مدلسازی می کنیم ولی در کلییت میبینیم که زمینهای کشاورزی دارند از بین میروند.

۲- این روش، یک محیط طبیعی را برای توصیف و شبیه سازی یک سیستم فراهم میکند زیرا ذاتاً می تواند افراد و اشیاء را در روشی واقع بینانه شبیه سازی کند.

۳- قابل انعطاف است، چون عامل ها می توانند به طور فیزیکی در یک مکان جغرافیایی در جهت های مختلف و سرعت های متفاوت در یک مدل مکانی حرکت کنند و یا اینکه به آسانی میتوان عامل های بیشتری را به یک مدل عامل مبنا اضافه کرد. همچنین، مدل عامل مبنا یک چارچوب طبیعی را برای تنظیم پیچیدگی عامل ها فراهم میکند: رفتار، درجه عقلانیت، توانایی یادگیری و تکامل و قوانین تداخلات.

۴- روش مدلسازی عامل مبنا روشی مقرون به صرفه است که قادر به صرفه جویی زمان نیز می باشد.

مدلسازی عامل مبنا به دو گروه تک عاملی و چند عاملی تقسیم می شود که اولی توسط اکولوژیست ها توسعه یافته است و دومی بیشتر تحت تاثیر علوم اجتماعی و کامپیوتر است. مدل های تک عاملی تلاش بر معرفی مفهوم فرد به منظور فهم نقش ناهمگنی دارد اما مدلسازی چند عاملی تاکید بیشتری به فرایندهای تصمیم گیری عامل ها و سازمان اجتماعی ای که در آن این افراد گنجانده شده اند، دارد.

گام های کلی در ساخت یک مدل عامل مبنا

- ✓ عامل ها: شناسایی انواع عامل همراه با خصوصیاتشان
- ✓ محیط: معرفی محیطی که عامل ها در آن وجود خواهند داشت یا با آن ارتباط متقابل دارند.
- ✓ تداخلات عامل ها: اضافه کردن روشی که کنترل کند کدام عامل، کی و چطور در طول شبیه سازی تداخل میکند.
- ✓ اجرا: اجرای مدل عامل محور در نرم افزار محاسباتی

تقریبا تمام مدل های عامل مبنا با استفاده از زبان برنامه نویسی شیء گرا (*OOP*[۴]) ساخته می شوند، بنابراین مفهوم *OOP* برای مدلسازی عامل مبنا بسیار ضروری است. یک برنامهٔ توسعه یافته با زبان *OOP* عموما شامل مجموعه ای از **اشیاء**[۵] می باشد. یک شیء قادر به ذخیره اطلاعات در درون **صفات**[۶] خود بوده و **روش هایی** را برای تعیین چگونگی پردازش داده ها و تعامل با سایر اشیاء دارد. بنابراین نوعی وابستگی بین عامل و شیء وجود دارد، در واقع طبیعی است که هر عامل را به عنوان یک شیء برنامه نویسی کرد.

مفهوم کلاس نیز برای *OOP* بسیار اساسی است. یک کلاس در واقع شامل مجموعه ای از خصوصیات یک شیء می باشد. مثلا یک مدل اقتصادی ممکن است شامل کلاسی به نام مشتری باشد که نمایانگر یک مشتری از یک شرکت بوده و ممکن است دارای صفاتی از قبیل نام، آدرس و انواع محصولاتی که دوست دارد، باشد. یک کلاس نیز معمولا دارای روش هایی برای توصیف و نمایش فعالیت های خود (مثل حرکت، مردن و یا زنده ماندن) می باشد. هنگامیکه برنامه اجرا می شود، کلاس ها

[۴] Object- oriented Programming
[۵] Objects
[۶] Attributes

برای تشکیل اشیاء انتخاب و معرفی می شوند. مثلا کلاس مشتری ممکن است برای تشکیل دو شیء که نمایانگر دو مشتری است انتخاب شود. هر کدام از مشتری ها دارای صفات خود می باشند. اگرچه دو مشتری دارای روش ها و مجموعه صفات یکسانی هستند، اما مقدار یا ولیوی صفات آن ها (مثل اسم و آدرس) باهم فرق می کند.

در مدل عامل-مبنا، عامل ها در یک محیط سلولی یا برداری اقدام به فعالیت می کنند. محیط فعالیت عامل ها تأثیر زیادی در نحوه فعالیت آن ها و پاسخ های نهایی دارد.

در هر منطقه ای با توجه به شرایط حاکم بر محیط زیست و تعداد عاملان مورد مطالعه، باید یک مدل کاربردی و مدیریتی طراحی شده و سپس با وارد کردن تمام مشخصات مربوط به عامل و محیط زیست، نرم افزار توانایی ایجاد سناریو های مدیریتی مختلفی را با تغییر عامل ها خواهد داشت. در نتیجه میتوان با آزمون و خطا، بهترین برنامه ی مدیریتی را در جهت حفظ منابع اراضی انتخاب نمود.

تایید و اعتبار سنجی مدل

با وجود اینکه مدلسازی عامل-مبنا در زمینه های مختلفی در سطح دنیا مورد استفاده قرار گرفته است، اما این روش ها از فقدان مبانی ریاضی و روش های به رسمیت شناخته شده برای اعتبار سنجی رنج برده (Xiang et al, 2005) و محققین به تازگی شروع به مطالعهٔ مسائل اعتبار سنجی آن کرده اند. هنگام اجرای یک مدل، سه مسئله مهم تایید، واسنجی و اعتبارسنجی باید در نظر گرفته شود.

تأیید فرایندی است که منطق مدل را با استفاده از برنامه های کامپیوتری بررسی می کند.

واسنجی، فرایند شناسایی مقادیر مناسب برای پارامترهای مدل به منظور تناسب بیشتر با دنیای واقعی است.

اعتبارسنجی از طریق مقایسهٔ نتایج و مشاهدات، اندازه می گیرد که یک مدل تا چه اندازه می تواند رفتارهای دنیای واقعی را نشان دهد.

تایید مدل شامل دو مرحلهٔ اعتبارسنجی ظاهری و آنالیز حساسیت می باشد. اعتبار سنجی ظاهری به منظور اطمینان از قابل قبول بودن و منطقی بودن فرایندها و ورودی های مدل درون چارچوب تئوری و اولیهٔ مدل صورت می گیرد. آنالیز حساسیت نیز اغلب به منظور بررسی اثر پارامترهای ورودی و مقادیر آن ها بر روی رفتار و خروجی های مدل می باشد (See, 2012). برای اینکه بتوانیم از نتایج حاصل از مدل اطمینان حاصل نماییم ضروری است با ثابت نگه داشتن پارامترها و شرایط داخلی، مدل را چندین مرتبه و با ورودی های مختلف اجرا نموده و میزان تغییرات در پاسخ ها را مشاهده نماییم. بنابراین هدف تحلیل حساسیت تغییر در مفروضات مدل و نتیجهٔ مورد انتظار آن، تغییر در خروجی های مدل است. اگر اثر تغییر ورودی در خروجی مدل ناچیز بود میتوان نتیجه گرفت که آن ورودی اثر مهمی در مدل ندارد و صحت آن چندان مهم نیست (حسینعلی، ۱۳۹۱). انجام آنالیز حساسیت به منظور انتخاب پارامترهای مناسب و معنی دار برای شبیه سازی قبل از اینکه مدل کالیبره شود و یا در فرایند سناریوسازی مورد استفاده قرار بگیرد، ضروری است (See, 2012).

واسنجی یا کالیبراسیون، فرایند شناسایی مقادیر مناسب برای پارامترهای مدل به منظور تناسب بیشتر با دنیای واقعی است. معمولا کالیبراسیون همراه با تکرار مدل تا زمانی است که بر داده های واقعی منطبق شود. بنابراین کالیبراسیون نشان می دهد که آیا مدل قادر به شبیه سازی یک سیستم واقعی هست یا خیر.

اعتبارسنجی از طریق مقایسهٔ نتایج و مشاهدات، اندازه می گیرد که یک مدل تا چه اندازه می تواند رفتارهای دنیای واقعی را نشان دهد. در واقع در این مرحله تناسب بین خروجی مدل و واقعیت تعیین می شود.

۱) مقایسه نتایج مدلسازی عامل-مبنا با نتایج مدل های ریاضی (Pullum & Cui, 2012): از معایب این روش ساخت و توسعه مدل های ریاضی است و اینکه تدوین و فرمول بندی سیستم های پیچیده ممکن است دشوار باشد.

۲) استفاده از سایر شبیه سازی های مربوط به یک پدیده یکسان یا مقایسه مدل به مدل (Axtell et al, 1996; Xiang et al, 2005; Reeves, 2009; Jokar Arsanjani, 2011; Pullum & Cui, 2012): این روش دو مدل متفاوت را برای بررسی یک مسئله و پاسخ به یک سوال مشترک و ارزیابی شباهت ها و تفاوت های دو مدل به کار می گیرد.

۳) مقایسه نتایج مدلسازی عامل-مبنا با داده های واقعی (Jokar Arsanjani, 2011; Pullum & Cui, 2012): این روش یک مقایسهٔ ساده و روشن است که می تواند با مشکل دسترسی به کل داده های واقعی در مورد پدیده مورد مطالعه همراه باشد. روش های متعددی به منظور اندازه گیری و بررسی میزان درستی و خطای نتایج شبیه سازی وجود دارد که در زیر به تعدادی از آن ها اشاره میشود:

Relative Operating Characteristic (ROC)

به عنوان یک روش برای اعتبارسنجی تغییر پوشش اراضی معرفی شده است (Pontius & Schneider, 2001) که برای ارزیابی عملکرد یک طبقه بندی یا پیش بینی استفاده می شود. طبقه بندی بر اساس مقدار یک متغیر ویژه است که در آن مرز بین کلاس ها توسط یک آستانه تعیین می شود. ارزیابی ROC بر اساس منحنی ROC است که یک نمایش گرافیکی می باشد.

Confusion Matrix (CM)

ماتریس درهم ریختگی: یک ماتریس مربعی NدرN می باشد که Nهمان تعداد کلاس های ما در دسته بندی کننده است. هر ستون از ماتریس، نمونه‌ای از مقدار پیش بینی شده را نشان می‌دهد. در صورتی که هر سطر نمونه‌ای واقعی را در بر دارد. عناصر روی قطر اصلی نمونه های درست را نشان می دهند و مجموع آن ها برابر تعداد کل نمونه های درست می شود. برای بدست آوردن یک دسته بندی کافی است مجموع عناصر قطر اصلی را بر مجموع کل عناصر ماتریس تقسیم کنیم.

Kappa Index

شاخص کاپا نیز آماره ای است که می تواند نتایج مدل را با پدیده های واقعی مقایسه کند. این شاخص می تواند به روش زیر محاسبه گردد (حسینعلی و همکاران، ۱۳۹۱):

$$k = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

P(A): نشان دهندهٔ تطابق بین پاسخ های مدل و واقعیت است

P(E): نشان دهندهٔ عدم تطابق بین پاسخ های مدل و واقعیت است.

منابع

حسینعلی، ف.، آل شیخ، ع. و نوریان، ف. ۱۳۹۱. توسعهٔ مدلی عامل مبنا برای شبیه سازی گسترش کاربری اراضی شهری (مطالعه موردی: قزوین). مطالعات و پژوهش های شهری و منطقه ای، سال چهارم، شماره ۱۴، صفحه های ۱ تا ۲۲.

An L. 2012. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: review of agent-based models. Ecological Modelling, 229:pp.25-36.

Axtell R., Axelrod R., Epstein J.M. and Cohen M.D. 1996. Aligning simulation models: A case study and results. Computational & Mathematical Organization Theory, 1(2): pp.123-141.

Bonabeau E. 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 99(90003):7280 -7287.

Castle C.J. and Crooks A.T. 2006. Principles and concepts of agent-based modelling for developing geospatial simulations, Working papers series: paper 110. ISSN 1467.

Diogo V., Koomen E. and Kuhlman T. 2015. An economic theory-based explanatory model of agricultural land-use patterns: The Netherlands as a case study. Agricultural Systems, 139: pp.1-16.

Hatfield J., Takle G., Grotjahn R., Holden P., Izaurralde R.C., Mader T., Marshall E. and Liverman D.2014. Chapter 6: agriculture. In: Melillo,J.M., Richmond, T.C., Yowe, G.W. (Eds.),ClimateChange ImpactsintheUnitedStates:TheThird NationalClimate Assessment. U.S. Global Change Research Program.

Jager W. and Janssen M.A., De Vries, H.J.M., De Greef, J. and Vlek, C.A.J. 2000. Behaviour in commons dilemmas: Homo economicus and Homo psychologicus in an ecological-economic model. Ecological economics.35(3): pp.357-379.

Jokar Arsanjani J. 2011. Dynamic land use/cover change modelling: Geosimulation and multiagent-based modelling. Springer Science & Business Media.

Macal C.M. and North M.J. 2005. December. Tutorial on agent-based modeling and simulation. In Proceedings of the 37th conference on Winter simulation (pp. 2-15). Winter Simulation Conference.

Nellemann C. ed. 2009. The environmental food crisis: the environment's role in averting future food crises: a UNEP rapid response assessment. UNEP/Earthprint.

Pontius R. G., and Schneider L. C. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. Agriculture, Ecosystems & Environment. 85(1): 239-248.

Pontius Jr., R.G. and Chen H. 2006. GEOMOD Modeling, Idrisi Andes Help Contents, Massachusetts Clark University.

Pullum L.L. and Cui X. 2012. Techniques and issues in agent-based modeling validation. Technical report, Oak Ridge National Laboratory.

Reeves A. 2009. Versioning, Stability, Verification, and Validation of NAADSM.

See L. 2012. Calibration and validation of agent-based models of land cover change. In Agent-based models of geographical systems .pp. 181-197. Springer Netherlands.

Torrens P.M. 2003. Cellular automata and multi-agent systems as planning support tools, In: S Geertman, J Stillwell (Eds), Planning Support Systems in Practice, Springer, New York, pp: 203-222.

Xiang X., Kennedy R., Madey G. and Cabaniss S. 2005. Verification and validation of agent-based scientific simulation models. Pp. 47-55. In Agent-Directed Simulation Conference.