مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز گسسته

رقیه حاجیان آرانی[۱]، فاطمه سعادت‌جو[۲*]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر – گرایش نرم‌افزار، دانشگاه علم و هنر یزد، ایران
۲- استادیار گروه کامپیوتر، دانشگاه علم و هنر یزد، ایران
*نویسنده مسئول: **r.hajian.a@gmail.com**

خلاصه

به‌طور سنتی، سیستم‌ها، به‌واسطه یک مدل ریاضی یا آماری مدل‌سازی می‌شوند. در این مدل‌ها، سعی در یافتن راه‌حل‌های تحلیلی است که امکان پیش‌بینی رفتار سیستم را از مجموعه پارامترها و شرایط اولیه فراهم بیاورد. شبیه‌سازی رایانه‌ای اغلب به‌عنوان سیستم کمکی یا جایگزینی برای مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اغلب این روش‌ها راه‌حل‌های ساده‌تر نسبت به روش‌های تحلیلی ایجاد کرده و در مواقعی که امکان ایجاد مدل تحلیلی به فرم بسته وجود ندارد، بسیار کارآمد عمل می‌کنند. چندین بسته نرم‌افزاری برای اجرای مدل‌سازی شبیه‌سازی مبتنی بر رایانه وجود دارد که باعث می‌شود تمام مدل‌های ریاضی و آماری تقریباً به شکل مناسب در دسترس باشند.

در این تحقیق سعی شده است تا به مقایسه چندین شبیه‌ساز رایانه‌ای پرداخته شود. مقایسه شبیه‌سازها در این تحقیق بر اساس دو رویکرد متفاوت انجام می‌شود. اولین رویکرد رده‌بندی شبیه‌سازها مبتنی بر مطالعه مقالات پیشین است که بر این اساس بهترین نرم‌افزار شبیه‌سازی گسسته، نرم‌افزار شبیه‌سازی AnyLogic بود. دومین رویکرد، یک مطالعه توصیفی- تحلیلی از نوع مقطعی، است. در این روش رتبه‌بندی بر اساس تجربه شخصی افراد (۱۰۰ نفر فروشنده و خریدار) بررسی شد که بر این اساس بهترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گسسته، دو نرم‌افزار آرنا وFlexsim می‌باشد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی رایانه‌ای، پیش‌بینی رفتار سیستم، مدل‌سازی، فعالیت سیستم، AnyLogic.

۱. مقدمه

تجربه، حاصل عملکرد سعی و خطا است. انسان با به‌کارگیری قدرت خلاقانه و تفکر خود، قادر است از گذشته یاد گرفته و برای آینده برنامه‌ریزی کند. ولی متأسفانه زمان کسب تجربه طولانی است و حتی ممکن است تجربه‌ها، نتایجی تلخ و غیرقابل‌جبران داشته باشند. به کمک شبیه‌سازی، بدون آنکه هزینه زیاد زمانی، مالی و احتمالاً جانی را متحمل شویم، عملکرد سعی و خطا را انجام داده و نتایج حاصل را به دنیایی واقعی تعمیم می‌دهیم. شبیه‌سازی را می‌توان برای نشان دادن اثرات واقعی یک پدیده روی موضوع هدف، تحت شرایط کنترل‌شده و قانونمند به‌کار برد. شبیه‌سازی‌ها همچنین در مواردی که سیستم واقعی قابل‌استفاده نباشد، مورد استفاده هستند، زیرا ممکن است چنین سیستمی در دسترس نبوده یا به‌کارگیری آن خطرناک یا غیرقابل‌قبول باشد. در حقیقت شبیه‌سازی، تقلید تقریبی از عملیات یک فرآیند یا سیستم بوده؛ که بیانگر عملکرد آن در طول زمان است.

شبیه‌سازی رایانه‌ای تلاشی برای الگوبرداری از وضعیت واقعی یا فرضی یک پدیده درون برنامه‌های رایانه‌ای است، به‌گونه‌ای که بتوان کارکرد سیستم در مواجهه با پدیده‌ها را مطالعه و از چگونگی فعالیت سیستم اطلاع حاصل کرد. با تغییر متغیرها در این شبیه‌سازی‌ها ممکن است پیش‌بینی‌هایی نیز در مورد رفتار سیستم انجام شود. این شبیه‌سازی‌ها ابزاری برای بررسی واقعی رفتار سیستم مورد بررسی هستند.

امروزه، شبیه‌سازی رایانه به یک ابزار مفید برای مدل‌سازی بسیاری از سیستم‌های طبیعی در فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی و حتی سیستم‌های انسانی در اقتصاد و علوم اجتماعی (جامعه‌شناسی محاسباتی و مهندسی اجتماعی) بدل شده است [۱]. حتی در مهندسی نیز برای به دست آوردن دیدگاه از عملکرد سیستم‌ها، از شبیه‌سازی رایانه‌ای استفاده می‌شود. نمونه مناسب برای نمایش سودمندی استفاده از رایانه‌ها برای شبیه‌سازی، شبیه‌سازی ترافیک شبکه‌های حمل‌ونقل با رایانه است [۲]. در این شبیه‌سازها، رفتار مدل را با هر بار شبیه‌سازی و با توجه به تغییر مجموعه پارامترهای اولیه محیط به دست می‌آورند. شبیه‌سازی* در بسیاری از زمینه‌های دیگر مانند شبیه‌سازی فناوری برای تنظیم عملکرد یا بهینه‌سازی [۱]، مهندسی ایمنی، آزمایش، آموزش و بازی‌های ویدیویی [۳] در نمودار جریان فرآیند کار [۴] و برنامه‌ریزی و کنترل، تولید [۵] در تعادل خط [۶] و مدل بهینه‌سازی خروجی [۷،۸،۲] برای بهبود عملکرد تعادل [۹، ۱]، همچنین در برنامه‌های کاربردی در تولید، مراقبت‌های بهداشتی، عملیات نظامی و تجاری [۱] استفاده می‌شود.

اغلب، نرم‌افزار یا سخت‌افزارهای رایانه‌ای برای مطالعه مدل‌های شبیه‌سازی‌شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه شبیه‌سازی‌ها با الگوبرداری علمی از سیستم‌های طبیعی یا انسانی برای به دست آوردن بینش از عملکرد آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. موضوعات اصلی در شبیه‌سازی، دستیابی به منابع معتبر اطلاعات در مورد انتخاب مناسب خصوصیات و ویژگی‌های رفتارهای کلیدی پدیده مورد مطالعه است. همچنین ساده‌سازی تقریبی و حداقل کردن فرضیات مدل شبیه‌سازی، به‌طوری‌که اصول واقعی پدیده را مخدوش نکرده و آن را بی‌اعتبار نسازد، از جنبه‌های دیگر شبیه‌سازی محسوب می‌شود. به همین علت شبیه‌سازی یک فعالیت علمی است که نیاز به رویه‌ها و پروتکل‌های مربوط به تأیید و اعتبار مدل، پالایش، تحقیق و توسعه در فناوری، بخصوص در شبیه‌سازی رایانه‌ای، دارد.

۲ - طبقه‌بندی شبیه‌سازی‌ها [۱۹-۱۶]

از نظر تاریخی، در ابتدای راه، تکنیک‌های شبیه‌سازی‌های مورد استفاده در زمینه‌های مختلف تا حد زیادی به‌طور مستقل، توسعه یافتند؛ اما مطالعات صورت گرفته در قرن بیستم و پدید آمدن علوم جدید مانند نظریه سیستم‌ها† و سایبرنتیک‡ همراه با گسترش استفاده از کامپیوترها، باعث شده تا دید سیستماتیک و یکسانی در علوم مختلف از مفهوم شبیه‌سازی ایجاد شود. بعضی از دسته یا طبقه‌های مطرح در شبیه‌سازی‌ها در ادامه معرفی خواهند شد.

شبیه‌سازی فیزیکی§، به شبیه‌سازی اطلاق می‌شود که در آن اشیاء بدلی و مجازی جایگزین اجسام واقعی می‌شوند. این اجسام فیزیکی اغلب به دلیل کوچک‌تر یا ارزان‌تر بودن از شیء یا سیستم واقعی انتخاب می‌شوند.

شبیه‌سازی تعاملی**، نوعی خاص از شبیه‌سازی فیزیکی است که اغلب با همکاری یک یا دسته‌ای از انسان‌ها صورت می‌گیرد. برای مثال شبیه‌ساز†† پرواز یا قایقرانی و حتی شبیه‌ساز رانندگی در این دسته قرار می‌گیرند.

---

* Simulation
† Systems Theory
‡ Cybernetics
§ Physical Simulation
** Interactive Simulation
†† Simulator

شبیه‌سازی مداوم*: شبیه‌سازی مبتنی بر زمان پیوسته به‌جای گام‌های زمانی گسسته است. این‌گونه شبیه‌سازی‌ها اغلب نیاز به محاسبات عددی و حل معادلات دیفرانسیل دارند.

شبیه‌سازی رویداد گسسته†، یک شبیه‌سازی بر اساس مراحل یا گام‌های زمانی گسسته است که برای نشان دادن لحظه‌های حساس انتخاب‌شده است. در این شبیه‌سازی، مقادیر متغیرها در هر دوره مختلف، مستقل از یکدیگر هستند.

شبیه‌سازی تصادفی‡: نوعی از شبیه‌سازی‌ها است که در آن برخی از متغیرها یا فرآیندها، تحت تأثیر پدیده‌های تصادفی هستند و با استفاده از روش‌ها یا تکنیک‌های مونت کارلو§ و بهره‌گیری از اعداد شبه تصادفی**، شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. بدین ترتیب تکرار شبیه‌سازی با همان شرایط، نتایج مختلفی را در یک بازه اطمینان خاص ایجاد می‌کند.

شبیه‌سازی قطعی††، یک شبیه‌سازی است که بر پایه عوامل تصادفی ساخته نشده، بنابراین متغیرها توسط الگوریتم‌های قطعی تنظیم می‌شوند. در این‌گونه شبیه‌سازی‌ها، تکرار عمل شبیه‌سازی در شرایط یکسان، نتایج سازگار و همسانی خواهد داشت.

شبیه‌سازی ترکیبی‡‡، به ترکیبی از شبیه‌سازی‌ها رویدادهای زمان-پیوسته و زمان-گسسته مربوط می‌شود و منجر به ادغام معادلات دیفرانسیل بین دو رویداد متوالی عددی می‌شود تا تعداد ناپیوستگی‌ها را کاهش دهد. معمولاً این‌گونه ریاضیات را به نام معادلات دیفرانسیل تصادفی می‌شناسیم.

شبیه‌سازی مستقل§§ نوعی از شبیه‌سازی‌ها است که توسط رایانه، برنامه‌ریزی و به‌تنهایی روی یک ایستگاه کاری*** اجرا می‌شود.

شبیه‌سازی توزیع‌شده†††، روشی است که از بیش از یک رایانه استفاده می‌کند تا دسترسی به منابع مختلف میسر شود. به‌عنوان‌مثال چند کاربر که برنامه کاربردی یا سیستم‌های عامل مختلفی را اجرا یا مجموعه داده‌های توزیع‌شده را به کار می‌گیرند، نمونه‌هایی کلاسیک از شبیه‌سازی تعاملی توزیع‌شده(DIS) هستند.

شبیه‌سازی موازی‡‡‡، بر روی چندین پردازنده انجام می‌شود. این کار معمولاً به علت توزیع بار محاسباتی اتفاق می‌افتد و بخصوص زمانی که لازم است محاسبات با کارایی بالا رخ دهد از این روش استفاده می‌شود.

شبیه‌سازی قابل تعامل§§§، در آن چندین مدل، یا شبیه‌ساز، به‌صورت محلی با یکدیگر توافق دارند و از طریق شبکه به‌صورت توزیع‌شده عمل می‌کنند. یک نمونه کلاسیک ازاین‌گونه شبیه‌سازی‌ها می‌تواند معماری سطح بالا**** باشد.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی خدماتی†††† که روشی برای شبیه‌سازی ارائه خدمات در اینترنت محسوب می‌شود.

شبیه‌سازی در تجزیه‌وتحلیل خرابی‡‡‡‡، نوعی از شبیه‌سازی‌ها است که در آن ما محیط و شرایط را به شکلی تنظیم می‌کنیم که علت خرابی تجهیزات شناسایی و مشخص شود. این بهترین و سریع‌ترین روش برای شناسایی علت خرابی بدون ایجاد خسارت جانی و مالی است.

---

* Continuous Simulation
† Discrete Event Simulation
‡ Random Simulation
§ Monte Carlo Methods
** Pseudo Random
†† Deterministic Simulation
‡‡ Hybrid Simulation
§§ Stand alone Simulation
*** Workstation
††† Distributed Simulation
‡‡‡ Parallel Simulation
§§§ Inter-operable
**** High Level Architecture
†††† Modeling & Simulation as a Service
‡‡‡‡ Simulation in failure analysis

۳ - نرم‌افزارهای شبیه‌سازی

در ادامه به معرفی برخی نرم‌افزارهای شبیه‌ساز رایانه‌ای می‌پردازیم.

Arena [۱۰-۱۳]: یکی از پرکاربردترین پارادایم‌های شبیه‌سازی نرم‌افزار Arena می‌باشد. در زمینه بهینه‌سازی، وجود متغیرهای احتمالی در اکثر مسائل به چشم می‌خورد. همچنین تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان و مدیریت ریسک جز موضوعات مهمی می‌باشند که امروزه هم در محافل آکادمیک و هم در صنایع متنوع مورد توجه قرار می‌گیرند. در چنین شرایطی آشنایی با تکنیک شبیه‌سازی پیشامدهای گسسته و نرم‌افزار Arena حکم مجهز بودن به صلاحی قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های احتمالی و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان را دارد.

FlexSim [۱۴]: یک بسته نرم‌افزاری رویداد گسسته است که توسط FlexSim Software Products، Inc تولید شده است. خانواده محصولات FlexSim در حال حاضر شامل اهداف کلی محصول FlexSim و مدل‌سازی سیستم‌های مراقبت های بهداشتی است. معماری نرم‌افزار FlexSim مبتنی بر مفهوم ساختار درختی است. تمام داده‌ها (از جمله اشیای مختلف یا دستورات و غیره) در این نرم‌افزار به‌عنوان گره‌ای در ساختار درختی ذخیره می‌گردند. این یک ویژگی بسیار مهم و کلیدی در نرم‌افزار FlexSim می‌باشد که امکان دسترسی به داده‌ها را بسیار ساده می‌نماید. منطق مدل نرم‌افزار فوق نیاز به برنامه‌نویسی بسیار کمی و یا حتی گاهی می‌توان بدون نیاز به هیچ برنامه‌نویسی مدل مد نظرتان را ایجاد نمایید. بیشتر اشیاء استاندارد حاوی مجموعه‌ای از لیست‌های کشویی هستند که به کاربر اجازه می‌دهند منطق مورد نیاز برای یک مدل دقیق را سفارشی‌سازی کند.

کاربران به‌راحتی می‌توانند اشیای موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار شبیه‌سازی Flexsim را به داخل نمای مدل بکشند و جریان فرآیند خود را مدل‌سازی نمایند. از این رویکرد در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دیگر نظیر Arena استفاده می‌شود. همچنین کاربران و مدل‌سازان حرفه‌ای و با تجربه می‌توانند از زبان‌های برنامه‌نویسیFlex Script و C ++برای ارتقای سطح مدل خود استفاده نمایند.

نرم‌افزار شبیه‌سازی AnyLogic [۱۵]: نرم‌افزار شبیه‌سازی AnyLogic در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از متخصصین بهینه‌سازی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. روند افزایشی استفاده از این نرم‌افزار در مقالات علمی نیز گواه این مطلب است. این نرم‌افزار با بهره‌گیری کامل از رویکرد شیءگرایی* ایجاد شده است. پایه اصلی ساخت مدل در این نرم‌افزار Active Objectبوده و همچنین با استفاده از شیءهای از پیش تعریف‌شده درLibrary نرم‌افزار، قابلیت ساخت مدل‌های متنوعی وجود دارد. دارا بودن اینترفیس، رفتار داخلی، ورود شیءها دیگر، دارا بودن انواع پارامترها، به ارث بردن مشخصات شیءهای دیگر و بسیاری از قابلیت‌های دیگر از مزایای استفاده از Active Object در نرم‌افزار شبیه‌سازی AnyLogic است. در واقع کاربر به‌راحتی می‌تواند از مراحل قبلی کار خود در مراحل بعدی استفاده نماید و از دوباره‌کاری و اتلاف زمان جلوگیری می‌شود.

AUTOMOD: یک نرم‌افزار شبیه‌سازی صنعتی است که تحت سیستم‌عامل‌های ۹۵ WIN یا به بالا کار می‌کند انیمیشن سه‌بعدی، زبان برنامه‌نویسی رویه‌های مهندسی گرا، فضای شبیه‌سازی با ماهیت مجازی و غیره از خصوصیات AUTOMODاست. این نرم‌افزار یکی از گزینه‌های مناسب برای شبیه‌سازی گرافیکی سیستم‌های تولیدی و حمل‌ونقل می‌باشد. این برنامه امکانات بی‌نظیر را برای طراحی و آنالیز سیستم‌های پیچیده فراهم می‌کند. همچنین خروجی‌های کاملاً تجزیه‌وتحلیل شده از مدل‌ها و طرح‌های اجرایی کارخانه از قبیل ربات‌ها، نقاله‌ها، بالابرها، ماشین‌آلات، مخازن و لوله‌ها و غیره از قابلیت‌های AUTOMOD است. یکی از مزیت‌های نرم‌افزار شبیه‌سازی AutoMod سطح جزئیاتی است که کاربران

* Object Oriented

می‌توانند در مدل‌های خود اضافه نمایند تا واقعیت را به‌خوبی منعکس کنند. هنگام اجرای یک مدل، می‌توانید یک تسهیلات را در عمل مشاهده کرده و از هر زاویه‌ای آن را مشاهده نمود. این سطح از جزئیات شما را قادر می‌سازد تا نقاط ضعف را در سیستم‌های موجود مشاهده کنید و مشکلاتی را که هنوز هم در صفحه ترسیم وجود دارد پیش‌بینی کنید.

Emulate۳D: نرم‌افزار شبیه‌سازی راه‌اندازی کارخانه‌ی مجازی می‌باشد. Emulate کردن یک سیستم همان تقلید رفتاری و کلی از آن می‌باشد که در همه جنبه‌ها همانند سیستم اصلی خواهد بود، به انجام این عملیات توسط نرم‌افزار و یا سخت‌افزاری Emulation گفته می‌شود. یک امولاتور تمامی قابلیت‌های سیستم مورد تقلید رو تکرار می‌نماید که در بهترین حالت به کپی دقیق از آن سیستم تبدیل می‌گردد. در دنیای کامپیوتر امولاتورهای قدرتمند حتی در سطح باینری با سیستم اصلی سازگار می‌باشند. برای مثال با یک امولاتور اندروید می‌توانید برنامه‌های تحت این نرم‌افزار را بروی سیستم‌عامل لینوکس و یا ویندوز اجرا نمایید، این Emulator با وجود این‌که در محیطی متفاوت از سیستم اصلی قرار دارد ولی سطح ورودی و خروجی کاملاً سازگار با سیستم ابتدایی خواهد بود.

نرم‌افزار شبیه‌سازی Promodel: یک فناوری شبیه‌سازی رویدادهای گسسته است که برای برنامه‌ریزی، طراحی و بهبود خطوط تولید جدید یا موجود، لجستیک و سایر سیستم‌های عملیاتی استفاده می‌شود. در واقع این نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی و بهینه‌یابی سیستم‌های مختلف را به کاربران خود می‌دهد. در واقع این نرم‌افزار ابزاری برای مدل‌سازی و انیمیشن‌سازی انواع سیستم‌ها و مخصوصاً سیستم‌های زنجیره تأمین طراحی‌شده است. کلیدی‌ترین قابلیت‌های نرم‌افزار عبارتند از: امکان برنامه‌نویسی، برازش توابع توزیع آماری، شیءگرا بودن، یادگیری سریع و آسان، انیمیشن‌سازی و تجزیه‌وتحلیل نتایج. این نرم‌افزار بیشتر در مسائل مرتبط با کارایی منابع، بهبود فرایندها، ظرفیت سیستم، شناسایی و بهبود گلوگاه‌ها و همچنین بهبود سطح خدمات به مشتریان کاربرد دارد.

SimEvents : ابزار SimEvents یک موتور شبیه‌سازی رویداد گسسته و یک کتابخانه‌ی ابزار برای Simulink متلب فراهم می‌کند. شما می‌توانید ارتباطات رویداد محور بین عناصر را برای تحلیل بهینه‌سازی دوره‌ی عملکرد، توان عملیاتی، اتلاف و سایر ویژگی‌های عملکردی با استفاده از SimEvents انجام دهید. کتابخانه‌هایی از بلوک‌های از پیش تعریف‌شده از جمله صف‌ها، سرورها و سوئی‌ها شما را قادر می‌سازد تا به‌طور دقیق سیستم خود را نمایش داده و مسیر حرکت، تأخیرهای پردازشی، اولویت‌دهی و سایر عملیات را شخصی کنید. با استفاده از SimEvents می‌توانید، سیستم‌های کنترلی توزیع‌شده معماری‌های سخت‌افزاری و شبکه‌های ارتباطی و حسگری برای کاربردهای الکترونیکی هوا فضا و مواردی از این دست را طراحی کنید. همچنین می‌توانید فرایندهای رویداد محور را شبیه‌سازی کنید.

نرم‌افزار شبیه‌سازی Witness: یکی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گسسته می‌باشد. این نرم‌افزار توسط شرکت لنر* طراحی و توسعه یافته است. این نرم‌افزار دارای امکانات بسیاری برای شبیه‌سازی انواع سیستم‌های گسسته و پیوسته را داراست. در واقع به کمک کتابخانه‌ی عناصر این نرم‌افزار می‌توان انواع سیستم‌های تولیدی، لجستیک و خدماتی را شبیه-سازی و بهینه‌سازی نمود. ابزار بهینه‌یاب Witness Optimizer در این نرم‌افزار یکی از ابزارهای مهم می‌باشد. این ابزار امکان تعیین محدودیت‌ها و تابع هدف را به کاربر می‌دهد و به کمک الگوریتم‌هایی نظیر جستجوی ممنوعه† یا شبیه‌سازی تبرید‡ بهترین سناریو را برای مدل تحت بررسی می‌یابد. البته در این نرم‌افزار امکان تعریف الگوریتم‌های بهینه‌یابی مختلف و مد نظر کاربر نیز وجود دارد. در چند نرم‌افزار دیگر نظیر نرم‌افزار Arena امکان بهینه‌یابی به کمک ابزار OptQuest وجود دارد. این نرم‌افزار شامل عناصری با وسعت و عمق زیاد، پیوندهای مستقیم و متخصصان و تردستانی§ برای پیوند دادن با

---

* lanner
† Taboo Search
‡ Simulated Annealing
§ wizard

اکسل* و پایگاه داده‌ها†، نمایش‌های آموزنده تنوع زیاد، ساختار رابط کاربری‡ نوین، گزارشات جامع، محدوده قدرتمند گزینه‌های منطقی با ضمایم برنامه‌نویسی کامل و بیشتر می‌باشند.

۴ –مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی رویدادهای گسسته

بهترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گسسته کدامند؟ این سؤال بارها توسط افرادی که شروع به یادگیری نرم‌افزار شبیه-سازی رویداد گسسته کرده‌اند، پرسیده شده است. بسیاری از مدل‌سازان با تجربه می‌گویند که همه آن‌ها دارای نقاط قوت و ضعف هستند؛ اما در تلاش برای تعیین وضعیت فعلی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، رتبه‌بندی ابزارهای مشترک مفید است.

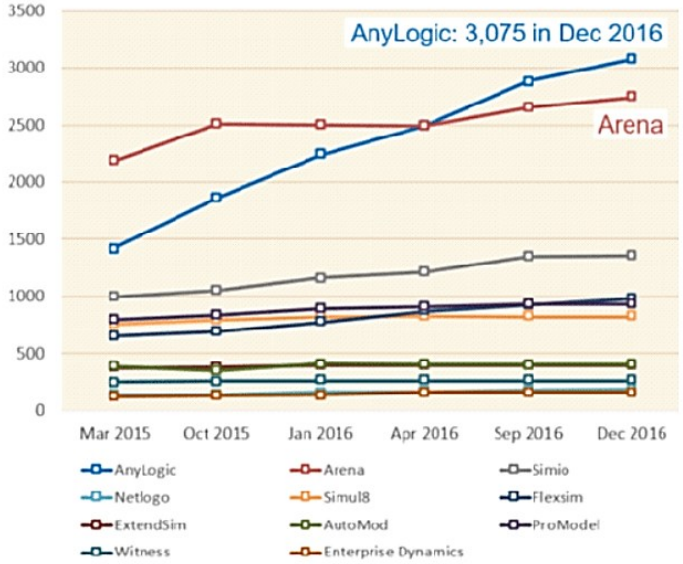
قبل از ورود به سیستم رتبه‌بندی باید گفت که دیگران نیز مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی رویدادهای گسسته را ارائه داده‌اند. یک مطالعه از این دست هر ساله توسط ORMS انجام می‌شود و آخرین نسخه‌ی این مقایسه را می‌توانید در [۱] مشاهده کنید.

ما در این تحقیق بر اساس دو روش چندین شبیه‌ساز را بررسی کردیم که در ادامه به شرح این دو روش خواهیم پرداخت.

۴-۱ رده‌بندی مبتنی بر مطالعه مقالات پیشین [۱،۱۷،۱۶]

بر اساس مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۶ انجام گردید، نرم‌افزارAnyLogic به‌عنوان برترین و پرکاربردترین نرم‌افزار شبیه‌سازی انتخاب گردید. این مطالعه با تکیه بر تعداد مقالات چاپ شده در کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی [۱۶، ۱] در زمینه شبیه‌سازی و همچنین تحلیل شبکه‌های اجتماعی نرم‌افزارهای مختلف صورت گرفت که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

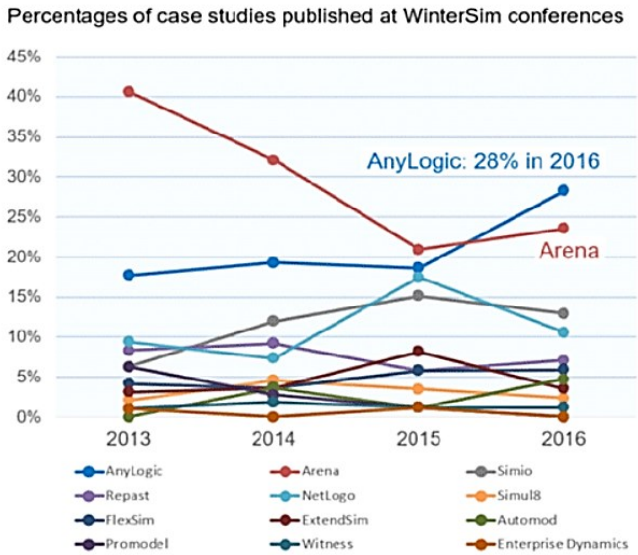
تعداد اعضای شبکه اجتماعی Linkedin مربوط به نرم‌افزارهای مختلف در نمودار شکل (۱) نشان داده شده است:



شکل (۱): تعداد اعضای شبکه اجتماعی Linkedin مربوط به نرم‌افزارهای مختلف [۱۶]

* Excel
† database
‡ interface

در شکل (۲) تعداد مقالات چاپ شده شبیه‌سازی در کنفرانس بین‌المللی (Wintersim) که معتبرترین کنفرانس تخصصی در زمینه شبیه‌سازی است، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سهم تعداد مقالات منتشرشده با استفاده از نرم‌افزار AnyLogic رشد بسیار سریعی داشته است و در حال حاضر به‌عنوان برترین و پرکاربردترین نرم‌افزار شبیه‌سازی مطرح است.

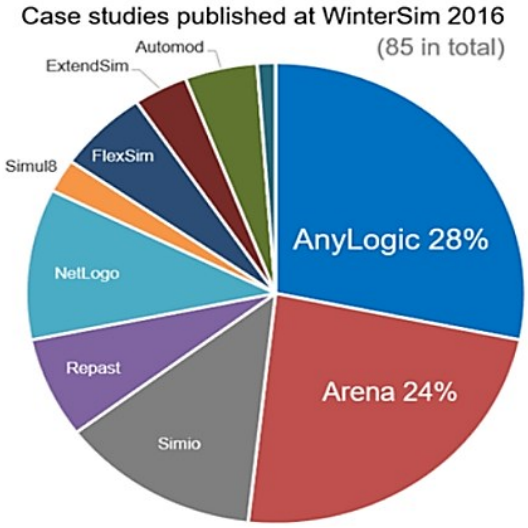


شکل (۲): تعداد مقالات چاپ شده شبیه‌سازی در کنفرانس بین‌المللی(Wintersim) [۱]

همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، نرم‌افزار شبیه‌سازیArena که زمانی به‌عنوان بهترین نرم‌افزار شبیه‌سازی دنیا مطرح بود، در حال کاسته شدن از محبوبیت و مقبولیت قبلی است. دلیل این امر استفاده نرم‌افزار شبیه‌سازی AnyLogicاز تکنولوژی به‌روزتر و امکان بهره‌مندی از مدل‌سازی ترکیبی است. شایان‌ذکر است که با بررسی مقالات مطرح‌شده در کنفرانس‌های بین‌المللی، مشاهده شد که میزان استفاده از رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان یا عامل محور* بسیار بیشتر از رویکرد شبیه‌سازی گسسته پیشامد بوده است و بسیاری از مقالات مطرح‌شده در زمینه مدل‌سازی عامل بنیان یا عامل محور توسط نرم‌افزار AnyLogic مدل‌سازی شده بودند.

در شکل (۳)، سهم هریک از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی از مقالات چاپ شده در کنفرانس‌های مطرح بین‌المللی در زمینه شبیه‌سازی در سال ۲۰۱۶ آورده شده است.

* Agent based modeling
† Discrete event simulation



شکل (۳): سهم هریک از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی از مقالات چاپ شده در کنفرانس‌های مطرح بین‌المللی [۱]

دلایل برتری نرم‌افزار شبیه‌سازی AnyLogic بر نرم‌افزار شبیه‌سازی Arena می‌توان موارد زیر را بیان کرد [۱۸، ۱۹، ۳]:

- در AnyLogic شما این قابلیت را دارید که زنجیره‌ای از شیءهای مختلف را در مدل تعریف کرده و مدل را به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم و آن را مقیاس‌پذیر* نمایید. AnyLogic شما را به یک محیط ایستا محدود نمی‌کند. همچنین شما در حین اجرای مدل می‌توانید ارتباط بین قسمت‌های مختلف مدل را قطع کنید و تأثیر آن را بر روی نتایج مشاهده کنید. این قابلیت‌ها در Arena وجود ندارند.

- در نرم‌افزار شبیه‌سازی Arena شما محدود به block library هستید. ولی تصور کنید در فرآیند مدل‌سازی به حالتی برخورده‌اید که منطق آن با منطق پیش‌فرض بلاک‌های نرم‌افزار Arena مطابقت نداشته باشد. مثلاً فرض کنید منابعی که قرار است مورد استفاده قرار گیرند، وابسته به نوع شیء، وضعیت منابع** و تعدادی پارامتر پیچیده دیگر باشد. شما در نرم‌افزار Arena مجبور خواهید بود به‌صورت سعی و خطا از بلاک‌های دیگر به‌صورت ترکیبی استفاده کنید و یا توسط کدنویسی بلاک مورد نظر را ایجاد کنید که کار بسیار پیچیده‌ای است. ولی در نرم‌افزار AnyLogic این کار به‌راحتی توسط نمودارهای حالت، پیشامدها، زمان‌سنج‌ها و بسیاری ابزارهای دیگر قابل‌اجرا است.

- قابلیت کلیدی دیگر نرم‌افزار AnyLogic استفاده از زبان برنامه‌نویسی Java است. در واقع در نرم‌افزار AnyLogic کاربر محدود به زبان مخصوص خود نرم‌افزار نیست و در تمام محیط نرم‌افزار دستورات بر پایه زبان Java وارد می‌شوند. همچنین شما می‌توانید با وارد کردن بسیاری از پکیج‌های از پیش طراحی‌شده جاوا (ریاضیات، آمار، گرافیک و غیره) به داخل نرم‌افزارAnyLogic ، از آن‌ها بهره ببرید. در نرم‌افزار Arena امکان بهره بردن از این امکانات وجود ندارد.

---

* Scalable
† resource
‡ Seize
§ entity
** resource state
†† State chart
‡‡ Events
§§ Timer

- نرم‌افزار AnyLogic به شما این امکان را می‌دهد که مدل ساخته‌شده خود را به‌صورت Java applet ذخیره نمایید و در هر کجا که نیاز به اجرای مدل دارید، صرفاً با استفاده از مرورگرهای اینترنت (FireFox، Chrome و غیره) مدل خود را اجرا کنید. بنابراین برای اجرای مدل و پرزنت کردن آن در مکان‌های دیگر شما نیاز به نصب نرم‌افزار نخواهید داشت و به‌راحتی امکان به اشتراک‌گذاری و اجرای مدل ساخته‌شده وجود خواهد داشت. این قابلیت در هیچ‌یک از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی وجود ندارد.

- مهم‌ترین مزیت نرم‌افزار شبیه‌سازی AnyLogic نسبت به سایر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی امکان استفاده از سه رویکرد «شبیه‌سازی گسسته پیشامد*»، «سیستم‌های پویا†» و «مدل‌سازی عامل بنیان‡» به‌صورت هم‌زمان در محیط نرم‌افزار AnyLogicاست. شما به‌راحتی می‌توانید در محیط نرم‌افزار AnyLogic از رویکرد شبیه‌سازی گسسته و پیوسته به‌صورت هم‌زمان استفاده کنید. این قابلیت در هیچ‌یک از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دیگر وجود ندارد و صرفاً این نرم‌افزارها توانایی ساخت مدل‌های گسسته پیشامد را دارا هستند.

۴-۲ رده‌بندی مبتنی بر تجربه افرادی

در این مطالعه توصیفی- تحلیلی از نوع مقطعی، فروشندگان و خریداران نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به شکل هدفمند انتخاب و پرسشنامه مرتبط با مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی از طریق مصاحبه تکمیل شد. در این تحقیق یک نظرسنجی جهت مقایسه نرم‌افزار شبیه‌سازی برای شبیه‌سازی سیستم‌های رویداد گسسته و محصولات مرتبط منطبق با روش ارائه‌شده در مقاله [۱۲] صورت گرفت. برای انجام تحقیق تمام اطلاعات نرم‌افزارها توسط فروشندگان ارائه‌شده است. محصولاتی که برای انجام شبیه‌سازی رویداد گسسته بر روی رایانه‌های شخصی اجرا می‌شوند، مورد تأکید قرار گرفته‌اند، زیرا این محصولات برای استفاده در علم مدیریت و تحقیقات عملیاتی مناسب‌تر هستند. محصولات شبیه‌سازی که قابلیت اولیه آن‌ها شبیه‌سازی پیوسته (سیستم معادلات دیفرانسیل مشاهده‌شده در سیستم‌های فیزیکی) یا آموزش (مانند هواپیما و شبیه‌سازها) است در اینجا حذف‌شده‌اند.

در این تحقیق از شاخص و معیار میزان محبوبیت (تعیین‌شده توسط آمار موتور جستجو) برای تعیین اینکه کدام نرم‌افزار برتر است استفاده کرده است. درحالی‌که میزان محبوبیت مهم است، اما نمی‌تواند به‌تنهایی برای رتبه‌بندی نرم‌افزارهای این حوزه استفاده گردد. به این دلیل، جهت ایجاد رتبه‌بندی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی رویدادهای گسسته، ما در پنج دسته (قابلیت‌ها، صنایع، سهولت استفاده، محبوبیت و توسعه) مقایسه را انجام داده‌ایم. این دسته‌ها به‌تفصیل در زیر تشریح شده‌اند. هر دسته ۲ تا ۹ موضوع را در بر می‌گیرد. هر نرم‌افزار شبیه‌سازی در هر مقطع در مقیاس ۱ تا ۵ رتبه‌بندی می‌شود. این رده‌بندی مبتنی بر تجربه افرادی است که با این نرم‌افزارها آشنا می‌باشند.

قابلیت‌ها: شامل موضوعاتی است که شامل ویژگی‌های کلی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است. این ویژگی‌ها نباید مخصوص صنعت یا ابزاری خاص باشد بلکه در عوض مواردی هستند که معمولاً هنگام ارزیابی نرم‌افزار شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند. مباحث موجود در رده قابلیت‌ها و شرح مختصری از معنای آن‌ها در جدول (۱) قرار دارند.

جدول (۱): ویژگی‌های کلی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی [۱۲]

* Discrete Event Simulation
† System Dynamics
‡ Agent based Modeling

نام ویژگی	توضیحات
سرعت اجرا	زمان لازم برای شبیه‌سازی سناریوی شبیه‌سازی در زمان واقعی است.
بهینه‌سازی قابلیت	قابلیت استفاده از بهینه‌ساز و بهینه‌سازی سفارشی
برازش توابع توزیع احتمالی	قابلیت برازش توابع توزیع مختلف آماری بر روی داده‌های خام
برنامه‌نویسی	قابلیت استفاده از برنامه‌نویسی برای ارتقاء قابلیت نرم‌افزارها
اتصال به بانک اطلاعاتی	قابلیت اتصال به منابع داده خارجی نظیر اکسس، اکسل و غیره
گرافیک	انیمیشن‌سازی سه‌بعدی یا دوبعدی برای اشکال‌زدایی و ارائه در جلسه‌ی مدیریت
کتابخانه	سودمندی و کیفیت اشیاء/کلاس‌ها و دسته‌بندی‌های پیش‌فرض
شخصی‌سازی	سهولتی که اشیاء سفارشی و ویژگی‌های نرم‌افزاری را می‌توان توسط کاربر اضافه کرد
نتایج آماری	قابلیت دریافت خروجی از مدل

صنایع: هدف از رتبه‌بندی صنایع، تجزیه‌وتحلیل بهترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی که می‌تواند اهداف کلی را برای تمامی صنایع برطرف سازد. صنایعی که به‌عنوان موضوعاتی برای رتبه‌بندی در نظر گرفته‌شده‌اند عبارتند از: ساخت و تولید، لجستیک و حمل‌ونقل، انبارداری، بسته‌بندی و نظام سلامت (جدول ۵).

راحتی در استفاده: هدف از این دسته، رتبه‌بندی نرم‌افزار با سهولت استفاده است. نرم‌افزارهای شبیه‌سازی رویداد گسسته بسیار توانمندی وجود دارند، اما سودمندی اغلب با سهولت استفاده از نرم‌افزار تعیین می‌شود. برای رتبه‌بندی از موضوعات موجود در جدول (۲) استفاده خواهد شد.

جدول (۲): موضوعات مرتبط با راحتی در استفاده شبیه‌سازها [۱۲]

موضوع	توضیحات
آموزش مورد نیاز	میزان آموزش لازم برای کاربر برای اینکه بتواند بدون کمک، چندین سیستم را در نرم‌افزار مدل‌سازی کند.
منابع یادگیری	در دسترس بودن منابع خودآموز و خارجی
میزان برنامه‌نویسی	میزان نیاز به برنامه‌نویسی برای ایجاد یک مدل
زمان ساخت یک مدل	زمان صرف شده جهت ساخت یک مدل

محبوبیت: هدف از این دسته، رتبه‌بندی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی بر اساس محبوبیت‌شان می‌باشد (جدول ۴). محبوبیت می‌تواند یک معیار مهم در هنگام انتخاب یک بسته نرم‌افزاری شبیه‌سازی رویداد گسسته باشد، زیرا این امر می‌تواند بر سهولتی که شرکت‌ها می‌توانند از منابع خود برای انجام کارهای شبیه‌سازی استفاده کنند، تأثیر بگذارد. در این دسته از سه معیار زیر برای رتبه‌بندی نرم‌افزارها در این دسته استفاده شده است:

ویکی‌پدیا: این یک رتبه‌بندی است که با توجه به تعداد بازدیدهای صفحه نرم‌افزارهای مختلف در ویکی‌پدیا تعیین می‌شود.

گوگل: این یک رتبه‌بندی است که با توجه به تعداد جستجوهای این نرم‌افزار در Google تعیین می‌شود.

لینکداین: این رتبه‌بندی توسط تعداد افرادی که در پروفایل‌های خود در LinkedIn از نرم‌افزار خاصی استفاده می‌کنند، تعیین می‌شود.

توسعه: معیار توسعه نشان‌دهنده‌ی توانایی ارائه‌دهنده نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای تطبیق با روندهای آینده می‌باشد.
این نرم‌افزارها در این دسته در دو موضوع زیر رتبه‌بندی می‌شوند:
آخرین نسخه
ویژگی‌های اضافه‌شده در آخرین نسخه

جدول (۳): ویژگی‌های کلی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی [۱۸]

نرم‌افزار	خروجی‌ها	سفارشی‌سازی	کتابخانه اشیا	انیمیشن‌سازی	اتصال به پایگاه داده	برنامه‌نویسی	برازش توابع توزیع آماری	قابلیت بهینه‌سازی	سرعت اجرا
AnyLogic	۵	۵	۴	۵	۳	۲	۳	۴	۳
Arena	۴	۵	۴	۵	۴	۲	۳	۴	۴
AutoMod	۳	۳	۴	۴	۳	۲	۳	۲	۳
Emulate۳D	۱	۱	۴	۲	۲	۵	۵	۲	۲
FlexSim	۵	۵	۴	۵	۴	۵	۴	۴	۵
OPS	۳	۲	۵	۳	۱	۱	۱	۱	۲
ProModel	۳	۵	۴	۲	۴	۱	۲	۲	۴
SimEvents	۵	۳	۴	۴	۳	۱	۱	۳	۲
Witness	۳	۵	۴	۳	۲	۲	۲	۲	۲

جدول (۴): رتبه‌بندی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مبتنی بر محبوبیت [۱۸]

نرم‌افزار.	Wikipedia	Google	LinkedIn
AnyLogic	۴	۴	۳
Arena	۵	۴	۵
AutoMod	۱	۲	۳
Emulate۳D	۱	۱	۱
FlexSim	۴	۴	۴
OPS	۱	۱	۱
ProModel	۳	۵	۲
SimEvents	۱	۱	۱
Witness	۲	۱	۱

بررسی نتایج حاصل از رتبه‌بندی بر اساس تجربه شخصی افراد که از تعداد ۱۰۰ نفر فروشنده و خریدار (سی فروشنده/ هفتاد خریدار) بررسی شد، مشخص است شد در بین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی معرفی‌شده، دو نرم‌افزار آرنا و Flexsimدو نرم‌افزار قدرتمند از نظر فروشندگان و خریداران می‌باشد.

جدول (۵): رتبه‌بندی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مبتنی بر صنایع[۱۸]

نرم‌افزار	ساخت و تولید	لجستیک	انبارداری	بسته‌بندی	حمل مواد	سلامت
AnyLogic	۳	۵	۲	۲	۲	۳
Arena	۴	۲	۱	۲	۲	۲
AutoMod	۳	۱	۱	۳	۵	۱
Emulate۳D	۳	۱	۴	۵	۳	۳
FlexSim	۵	۳	۵	۳	۵	۵
OPS	۳	۱	۱	۱	۱	۳
ProModel	۳	۱	۱	۲	۱	۲
SimEvents	۲	۱	۱	۱	۱	۱
Witness	۳	۱	۱	۱	۱	۲

جدول (۶): رتبه‌بندی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مبتنی بر محبوبیت[۱۸]

نرم‌افزار	آموزش مورد نیاز	منابع	برنامه‌نویسی	ساخت اولین مدل
AnyLogic	۳	۳	۲	۳
Arena	۳	۳	۲	۲
AutoMod	۱	۱	۱	۱
Emulate۳D	۳	۳	۵	۳
FlexSim	۴	۴	۴	۴
OPS	۲	۱	۴	۵
ProModel	۲	۲	۲	۲
SimEvents	۲	۳	۱	۲
Witness	۲	۱	۲	۲

نرم‌افزار Flexsim پس از ایجاد مدل، انیمیشن سه‌بعدی بسیار جذابی را ایجاد می‌نماید. این انیمیشن سه‌بعدی به‌صورت کاملاً خودکار ایجاد می‌شود. این مورد یکی از نقاط نرم‌افزار محسوب می‌شود، چراکه در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی

دیگر، مدل سه‌بعدی را بایستی کاربر ایجاد نماید که در بسیاری از موارد کار دشواری است و جذابیت بصری چندانی ندارد. نرم‌افزار آرنا از این دست نرم‌افزارهاست.

نرم‌افزار FlexSim دارای یک کتابخانه‌ای از اشیای مختلف برای شبیه‌سازی حالات منابع مختلف در سیستم‌های گوناگون می‌باشد. ازاین‌رو این نرم‌افزار را یک نرم‌افزار شیءگرا* می‌نامیم. همین رویکرد شیءگرا بودن یکی از نقاط قوت این نرم‌افزار محسوب می‌شود که سبب تسهیل فرآیند مدل‌سازی خواهد شد. البته نرم‌افزارهای مختلف نیز دارای کتابخانه-ای از عناصر و اشیای مختلف می‌باشند و این ویژگی منحصربه‌فردی برای این نرم‌افزار محسوب نمی‌شود. در این قابلیت یک ویژگی مهمی وجود دارد و آن تعداد اشیای این نرم‌افزار است که نه آن‌قدر زیاد است که موجب سردرگمی کاربر شود و نه آن‌قدر کم که نتوان جزییات سیستم را مدل‌سازی نمود. همچنین در هر شیء می‌توان تمام ویژگی‌های مرتبط با آن را به-صورت یکجا وارد نمود. مثلاً در نرم‌افزار آرنا برای مدل‌سازی کردن خرابی ماشین‌آلات نیاز به استفاده از دیتا ماژول Resource، failure و ماژول Process می‌باشد؛ اما در نرم‌افزار شبیه‌سازی Flexsim تمام این موارد را می‌توان در شی Processorایجاد کرد.

۵- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی، تقلید تقریبی از عملیات یک فرآیند یا سیستم بوده؛ که بیانگر عملکرد آن در طول زمان است. نرم-افزارهای قدرتمندی در حوزه‌ی شبیه‌سازی پیشامد گسسته در دنیا وجود دارند که مهم‌ترین و محبوب‌ترین آن‌ها در این تحقیق مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی مبتنی بر مطالعه تحقیقات پیشین و تجربیات افراد نشان داد که سه نرم‌افزار AnyLogic، Arena و Flexsim برای شبیه‌سازی پیشامدهای گسسته بسیار محبوب و قدرتمند هستند.

مراجع

۱. Schriber, T.J., Reitman, J., Ockene, A., and Hixson, H.G., ۲۰۱۷, “History of the Winter Simulation Conference: Origins and early years (۱۹٦۷-۱۹۷٤),” Proceedings of the ۲۰۱۷ Winter Simulation Conference, W. K. V. Chan, A. D’Ambrogio, G. Zacharewicz, N. Mustafee, G. Wainer and E. Page, eds.

۲. M. F. M. A. Hamzas, S. A. Bareduan, M. S. Bahari, S. Zakaria, and M. Z. Zakaria, “Double-sided assembly line optimization using witness simulation”, in The ٥th International Conference on Green Design and Manufacture ۲۰۱۹ (IConGDM ۲۰۱۹), ۲۹ - ۳۰ April ۲۰۱۹, Aston Tropicana Hotel, Bandung Indonesia, AIP Conf. Proc. vol. ۲۱۲۹, pp. ۰۲۰۱٥۱-۱–۰۲۰۱٥۱-۷, ۲۰۱۹.

۳. Hill, R. R., and Miller, J. O., ۲۰۱۷, “A History of United States Military Simulation”, Proceedings of the ۲۰۱۷ Winter Simulation Conference, W. K. V. Chan, A. D’Ambrogio, G. Zacharewicz, N. Mustafee, G. Wainer and E. Page, eds.

۴. M. F. M. A. Hamzas, S. A. Bareduan, M. Z. Zakaria, W. J. Tan and S. Zairi, “Validation of X۱ motorcycle model in industrial plant layout by using WITNESSTM simulation software”, in ۳rd Electronic and Green Materials International Conference ۲۰۱۷ (EGM ۲۰۱۷), Krabi, Thailand, ۳۰ April ۲۰۱۷, AIP Conf. Proc. ۱۸۸٥, pp. ۰۲۰۱۸۲-۱–۰۲۰۱۸۲-۱۰, ۲۰۱۷.

۵. S. M. Jeon and G. Kim, “A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC)”, Prod. Plan. Control vol. ۲۷, pp. ۳٦۰–۳۷۷, ۲۰۱٦.

۶. S. A. Bareduan and S. A. Elteriki, “Methodology For Solving Two-Sided Assembly Line Balancing In Spreadsheet”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. ۱۱, No. ۱۰, pp. ٦٥٦۸-٦٥۷۳, May ۲۰۱۶.

* Object Oriented

A. T. Bon and N. N. Shahrin, “Assembly line optimization using arena simulation”, in Proceedings of the ٦th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Kuala Lumpur, March ٢٠١٦, Volume ٨-١٠, pp. ٢٢٢٥-٢٢٣٢, ٢٠١٦.

A. Sarda and A. K. Digalwar, “Performance analysis of vehicle assembly line using discrete event simulation modelling”, International Journal of Business Excellence, vol. ١٤, No. ٢, pp. ٢٤٠-٢٥٥, ٢٠١٨. DOI: ١٠,١٥٠٤/IJBEX.٢٠١٨,١٠٠٠٩٧٦٦.

٧. Swain, J. J., ٢٠١٧, “Simulation: New and Improved Reality Show,” OR/MS Today, Vol. ٤٤, No. ٥, pp. ٣٨-٤٩.

٨. M. A. B. M. Said and N. B. Ismail, "Improvement of production line layout using arena simulation software", Appl. Mech. Mater., vol. ٤٤٦–٤٤٧, pp. ١٣٤٠–١٣٤٦, ٢٠١٤. https://www.scientific.net/AMM.٤٤٦-٤٤٧,١٣٤٠.

٩. R. M. Rani, W. R. Ismail, and M. N. A. Rahman, "Operators' Evaluation and Allocation in SME's Food Manufacturing Company Using Analytical Hierarchy Process and Computer Simulation", Int. J. Appl. Phys. Math., vol. ٤, no. ٣, pp. ٢١٥–٢٢٢, ٢٠١٤.

١٠. Tayfur, A., Melamed, B.: Simulation Modeling and Analysis with ARENA. Elsevier, Inc., Amsterdam (٢٠٠٧).

١١. Schriber, T.J.: Introduction to Simulation. Wiley, New York (١٩٩١).

١٢. Garrido, J.M.: Introduction to flexsim. In: Garrido, J.M. (ed.) Object Oriented Simulation. Springer, Boston (٢٠٠٩). doi:١٠,١٠٠٧/٩٧٨-١-٤٤١٩-٠٥١٦-١ ٣.

١٣. Mokshin, V.V., Yakimov, V.V.: System Modeling in AnyLogic: Tutorial Recomendation to Perform Laboratory Work. Shkola Publ., Kazan (٢٠١٤). (in Russian).

١٤. Sargent, Robert G., ٢٠١٧, “A perspective on fifty-five years of the evolution of scientific respect for simulation,” Proceedings of the ٢٠١٧ Winter Simulation Conference, W. K. V. Chan, A. D’Ambrogio, G. Zacharewicz, N. Mustafee, G. Wainer and E. Page, eds.

١٥. Zabawa, J., Radosi´nski, E.: Comparison of discrete rate modeling and discrete event simulation. methodological and performance aspects. In: ´Swi _ atek, J., Wilimowska, Z., Borzemski, L., Grzech, A. (eds.) Information Systems Architecture and Technology. AISC, vol. ٥٢٣, pp. ١٥٣–١٦٤. Springer, Cham (٢٠١٧). doi:١٠,١٠٠٧/ ٩٧٨-٣-٣١٩-٤٦٥٨٩-٠ ١٢.

١٦. Shishengxiong Zhong and Jinzhe Zhao, “A comparison of simulation tools for supply chain management”, Bachelor Degree Project, Computer Science, Semester ٢٠٢٠.

١٧. David Unrau, “Survey and Comparison of Modelling Software”, Defence R&D Canada Centre for Operational Research and Analysis Force Readiness Analysis Team, DRDC CORA CR ٢٠١٢-٠٦٦, March ٢٠١٢.