مروری بر استفاده و چالش‌های خودروهای خودران

**(Automated Guided Vehicles)**

**چکیده**

در چند سده اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای به بررسی جنبه‌های فنی و سامانه‌های کنترلی خودروهای خودران اختصاص یافته است. امروزه این خودروها برای جابه‌جایی تجهیزات صنعتی، کالاها و کانتینرها به کار گرفته می‌شوند و راهکارهایی کارآمد و انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهند. این مقاله به مرور مطالعات انجام‌شده درباره خودروهای هدایت خودکار (AGV) در صنایع تولیدی و سیستم‌های حمل‌ونقل بنادر می‌پردازد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که علاوه بر مزایای استفاده از این خودروها، چالش‌های مهمی در زمینه مدل‌سازی مسائل و ارائه راه‌حل‌ها وجود دارند. نخستین چالش، پیاده‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی برای مدیریت چینش‌های مختلف در پایانه‌های کانتینری و سامانه‌های تولیدی است. چالش دوم به استفاده از فناوری‌های پیشرفته در این خودروها مربوط می‌شود که در صنعت ۴.۰ به کار گرفته می‌شوند. چالش سوم به راهبردهای مسیریابی پویا ارتباط دارد و چالش چهارم نیز توسعه الگوریتم‌های مؤثرتر برای حل مسائل مختلف مسیریابی این خودروها است

کلمات کلیدی: برنامه­ریزی خودروهای خودران، حمل و نقل، سیستم­های تولیدی انعطاف پذیر، اتوماسیون بنادر.

۱.مقدمه

در چند دهه­ی گذشته، تحقیقات بسیاری به خودروهای خودران AGV[[1]](#footnote-1) اختصاص داده شده است. امروزه، این خودروها به دلیل داشتن توانایی در جابه­جایی تجهیزات، کالاها و کانتینرها، بسیار رایج شده­اند. خودرو­های AGV راه­حل­های کارا و انعطاف­پذیری را برای سیستم­های تولیدی و حمل­و نقل به ارمغان می­آورند. در ادامه، به مرور مهمترین نقاط قوت و ضعف استفاده از AGVها می­پردازیم.

۱.۱ نقاط قوت استفاده از AGVها

اتوماسیون و استفاده از رایانه­ها، تاثیرات قابل توجهی را در سیستم­های گوناگون داشته است. یکی از این سیستم­ها، سیستم حمل­و نقل میباشد که نقشی اصلی و یاری­رساننده در جا­به­جایی دارد. در همین راستا، سیستم حمل­و نقل، نقش به­سزایی در دگرگونی­های اجتماعی و اقتصادی هر کشور دارد. یکی از ابزارات پیشرفته­ی تکنولوژی در این حوزه، خودروهای AGV است. (Akturk & Yilmaz, 1996)

خودروهای AGV اغلب برای توسعه و‌ متنوع ساختن سیستم حمل­و نقل استفاده می­شوند. (Broadbent et al., 1985)به طور معمول برای عملیات­های تولیدی به کار می­روند؛ اما اخیرا شهرت آنها در بسیاری از حوزه­ها همچون حمل کالا­ها یا کانتینر­ها در بنادر و هم­چنین در مناطق ذخیره سازی، افزایش یافته است. این خودروها بدون راننده هدایت شده و به طور گسترده، در حال تبدیل به یکی از استانداردها در زمینه­ی­ حمل کالا و کانتینر در اتوماسیون بنادر می­باشند. علاوه بر این، به دلیل شهرت روزافزون این خودروها، می­توان آنها در محیط­های تولیدی جهت جا­به جایی مواد و لوازم نیز مشاهده نمود. مهمترین فواید کلی استفاده از این خودروهای خودران در ادامه آمده است:

**کاهش هزینه­ی نیروی کار توسط خودروهای خودران AGV :** افزایش بهره­وری و کارآیی مهم­ترین هدفی است که هر کسب­و کاری که تمایل به موفقیت دارد، آن­را دنبال می­کند. خودروهای AGV می­توانند جهت دستیابی به این مهم در بلند مدت موثر واقع شوند. دلیل این امر آن است که این خودروها قابل اطمینان و مقرون به صرفه می­باشند. این خودروها در طول روز خسته نمی­شوند و نیازی به استراحت نیز ندارند. از دقت بالایی برخوردار بوده و از آنها می توان جهت انجام کارها مکرر و پی در پی بهره برد؛ بدون اینکه آسیب جسمی ببینند یا به هر طریقی برای انسان­ها خطر آفرین باشد.

**رشد چند بخشی**[[2]](#footnote-2):خودروهای AGV می­توانند در مقیاس­های کوچک با تعداد کم استفاده شوند ولی چون تقاضا افزایش می­یابد، تعداد بر حسب این تقاضا نیز افزایش می­یابد. در نتیجه هرگاه که سیستم به آنها نیاز داشته باشد، عملکردشان یا افزایش یا کاهش می­یابد. همینطور، زمان مورد نیاز برای پیاده­سازی این تغییرات، میزان جریان عملیاتی را در سیستم افزایش می­دهد. چنانچه نیاز باشد، AGVها می توانند شامل متعلقات روباتی باشد که می­تواند راهی مقرون به صرفه برای ورود به تکنولوژی­های پیشرفته­تر باشد.

**مسیریابی در محیط های پیچیده:** AGVها می‌توانند در چینش‌های پیچیده‌ای از جمله قفسه‌های باریک، تقاطع‌ها و محدوده‌هایی با دید کم حرکت کنند. این وسایل از حسگرها و فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند لیدار[[3]](#footnote-3) و دوربین‌ها استفاده می‌کنند تا موانع را تشخیص داده و به‌طور ایمن در مسیرهای مشخص شده حرکت کنند. علاوه بر این، این قابلیت به AGVها امکان می‌دهد تا در محیط‌های صنعتی با ترافیک بالا و فضای محدود نیز به‌طور کارآمد عمل کنند.

**امنیت و قابل پیش بینی بودن:**  AGVهایی که به سادگی قابل کنترل هستند، هنوز به عنوان یک راه امن جهت جابه­جایی و توزیع کالاها در سیستم­های انبار داده[[4]](#footnote-4) می­باشند. AGV­ها به گونه­ای طراحی و نصب می­شوند که به دور از نیروی کار، کارهاشان را به پایان رسانند. این ویژگی، نگرانی­های امن بودن این دستگاه­ها را تا حد زیادی کاهش می دهد. آنچه که باعث می­شود تا این خودروها مفید واقع شوند، توانایی آنها در به کار گرفته شدن در محیط­هایی است که دماهای زیاد رایج است و یا نیاز به حمل بارهای سنگین می­باشد. استفاده از این خودروها در چنین شرایطی باعث کاهش ریسک صدمه به کارمندان می­شود.

**کاهش آلودگی هوا:** در بنادر کانتینری و پالایشگاه­های صنعتی؛ کشتی­ها، کامیون­ها و دیگر وسایلی که با سوخت­های فسیلی کار می­کنند، یکی از مهم­ترین عوامل ایجاد آلودگی می­باشند. استفاده از AGVها در این محیط ها تاثیر به­سزایی در کاهش آلودگی دارد.  
(Edrissi et al., 2019)

**۲.۱ نقاط ضعف استفاده از AGVها**

با اینکه استفاده از AGVها به نظر راه حلی مناسب در بسیاری از حوزه­های مختلف صنایع می­باشد، استفاده از این خودروها دارای نقاط ضعفی نیز می­باشد. مهم­ترین این نقاط ضعف به طور مختصر در ادامه شرح داده شده اند:

شکل1 رده­ی استفاده از AGVها

پایانه­های کانتینری

استفاده از AGVها

سیستم­های تولیدی

**هزینه اولیه­ی بالا**: برای هر سیستمی که تمایل به سرمایه­گذاری در یک تکنولوژی را دارد، هزینه مالی اولیه می­تواند یک مانع بزرگی بر سر راه سیستم باشد. میزان بازگشت­های سرمایه اولیه در دراز مدت باید با خریدهای اولیه متعادل باشند و توسط هزینه­های کم نیروی کار خنثی گردند. در طول این بازه­ی دریافت سرمایه­ی اولیه، یک سیستم می­تواند از هزینه­های اضافی جهت نگهداری اطمینان حاصل کند. هیچ دستگاهی کامل نیست و هر هزینه مازادی باید موثر در هنگام رخداد یک از کارافتادگی یا اختلال هنگام یک عملیات،‌ باشد.

**نیازهای بسترها**: افزایش استفاده از AGVها بسیار وابسته به سیستم است؛ بدین معنی که سیستم باید توانایی بیشینه­سازی نقاط قوت مرتبط با AGVها را افزایش دهد. استفاده­ی AGV­ها زمانی افزایش می­یابد که آنها کارهای تکراری انجام دهند ولی اگر بستر آن جهت استفاده مهیا نباشد، سیستم نمی­تواند از این سرمایه گذاری سودی کسب کند. **\* پیچیدگی ساخت AGVها:** همانطور که اشاره شد، از AGVها در چینش های پیچیده استفاده می گردد. طراحی سیستم های مسیریابی با قابلیت دریافت های محیطی، تصمیم گیری بی درنگ، و سازگاری با شرایط، چالش بر انگیز است. فناوری های مسیریابی پیچیده، همانند اسکنر های لیزری،‌ سیستم های بینایی[[5]](#footnote-5) و یا الگوریتم های موضعی همزمان و الگوریتم های نگاشتی (SLAM)، جهت برطرف نمودن این چالش ها مورد نیاز می باشند.

**نبود انعطاف پذیری:** اگر مسیر حرکت یک AGV با مشکلات پیش بینی نشده سریعا تغییر کند، زمان قابل توجهی نیاز خواهد بود که AGV خاموش گردد و دوباره جهت وفق داده شدن با جریان کار، زمان­بندی شود. در بهترین حالت، مرکز توزیع به خوبی یک ماشین روان کار خواهد کرد ولی تقاضای متغیر و سریع از انبار داده بدین معنی است که مرکز باید به سرعت عکس­العمل نشان دهد. اگر چرخه­ی کاری AGV متناسب با تغییرات سریع و منظم در عملیات­ها باشد، می­تواند گزینه­ی مناسبی هنگام خرید لوازم در کارخانه­ها باشند. دو مساله­ی بسیار مهم در حوزه خودروهای AGV، زمان بندی و مسیریابی می­باشند که برای هر دو باید الگوریتم­های بهینه، توسعه داده شوند. (Qiu & Hsu, 2000)

**۳.۱ مسائل مرتبط با AGV ها**

اولین مساله، زمان بندی[[6]](#footnote-6) AGV می­باشد که شامل اختصاص دادن خودروها جهت ارسال به نقاط مختلف با توجه به یک جدول زمانی[[7]](#footnote-7) جهت کمینه کردن هزینه­ی کل سفر است. هر سفر در جدول زمانی باید توسط یک خوردو کامل گردد. به یک خودرو نمی­تواند بیش از یک سفر در یک زمان اختصاص داد. به طور معمول، ما تمایل داریم که درخواست­ها را با شیفت­ها و مسیرها ترکیب کنیم تا محدودیت­های سرویس رسانی به روندهای تجاری ارضا شوند و هزینه­های کل نیز کمینه گردند. در جهان امروز، انجام این فرآیند به صورت دستی بسیار سخت و پیچیده می­باشد. یکی از بخش­های اصلی در برنامه­ریزی در هر سیستم حمل و نقلی، تولید یک جدول زمانی بهینه است.

دومین نوع از مسائل مرتبط با خودروها شامل مسیریابی[[8]](#footnote-8) خودروها (VRP[[9]](#footnote-9)) می­باشد و به اختصار معروف به مسئله­ی است. مسأله­ی VRP یک مساله­ی NP-Hard می باشد. این مسئله حاوی رده­های بسیاری می­باشد. (Dondo et al., 2003; Gribkovskaia et al., 2001; Shih & Chang, 2001; Tan et al., 2001)

هسو و هوآنگ[[10]](#footnote-10) (۱۹۹۴) مساله­ی مسیریابی برای عملیات­های مقدماتی بر روی توپولوژی­های راه­های خاص مطالعه نمودند. (Hsu Wen Jing & Huang Shell Ying, 1994) این راه­ها به صورت ستاره، حلقه، چینش خطی، H-شکل، بافت دوبعدی[[11]](#footnote-11)، دورهای مکعبی شکل، n-مکعبی و گراف­های کاملا همبند می­باشند. جهت تعیین نمودن نیروی محاسباتی و حافظه استفاده شده برای حل VRP در این پژوهش، پیچیدگی محاسباتی در نظرگرفته شده است و پیچیدگی فضای مورد نیاز نیر است. در اینجا n تعداد یال­ها در مدل گرافی شبکه هاست.

انگیزه­ی اصلی این پژوهش، مرور مسائل زمان­بندی و مسیریابی AGVها می­باشد. ساختار بخش­های بعدی این پژوهش به این ترتیب می­باشد: بخش دوم به مرور ادبیات به کار رفته شده در حوزه اتوماسیون بنادر و جابه­جایی توسط خودروهای AGV پرداخته خواهد شد. بخش ۳ نتایج اصلی مقالاتی که مطالعه شده اند، مطرح می­گردد. بخش ۴ نیز چالش­های استفاده­ی بیش از اندازه از AGVها سیستم­های مختلف را مورد مطالعه قرار می­دهد. در بخش آخر نیز به ارائه­ی خلاصه و نتیجه­گیری پرداخته می­شود.

۲. مرور ادبیات

AGVها وسایلی هستند که علامت­ها یا سیم­کشی­ها[[12]](#footnote-12) یا لیزرهایی که راهنمای مسیر هستند را دنبال می­کنند. این خودروها، تاسیسات تولیدی را اتوماسیون می­نمایند و به همین جهت به صورت خودکار تولید را افزایش و هزینه­ها را نیز کاهش می­دهند. در این بخش، آخرین تحقیقات انجام شده در حوزه استفاده از AGVها روی زمین، نقد و بررسی می شوند. این بررسی­ها نشان می­دهند که استفاده­ی اصلی از AGVها در اتوماسیون بنادر برای منتقل کردن خودکار کانتینرها و سیستم­های تولیدی جهت جابه­جایی انعطاف­پذیر مواد، می­باشد. (همان­گونه که در شکل 1 مشاهده می­گردد.)

**۱.۲ استفاده از AGV ها در ترمینال کانتینری**

\*ترمینال‌های کانتینری در جهان نقش مهمی در توسعه اقتصادی کشورها ایفا می‌کنند. بنابراین، برای ساخت یک ترمینال کانتینری خودکار، استفاده از AGVها برای جابه‌جایی کانتینرها ضروری است، زیرا این وسایل نقلیه خودکار می‌توانند کارایی و سرعت عملیات ترمینال را بهبود بخشیده و هزینه‌های نیروی انسانی را کاهش دهند. در این بخش، جدیدترین تحقیقات در زمینه به‌کارگیری AGVها در ترمینال‌های کانتینری مرور می‌شود.

\*در پژوهشی،(Rashidi & Tsang, 2011) مسئله­ی زمان­بندی پویا و ایستای AGVها را به عنوان یک مدل کمترین جریان هزینه[[13]](#footnote-13) مطرح گردید. در این مدل، تابع هدف سه جمله دارد :زمان سفر AGV در طی مسیر پایانه، زمان انتظار AGVها در اسکله، و میزان تاخیر در انجام وظیفه. برای حل مدل، در این تحقیق ابتدا پیشرفت­هایی بر روی الگوریتم سیمپلکس شبکه (NSA[[14]](#footnote-14)) صورت گرفت و سپس یک الگوریتم جدید، به نام NSA+ جهت حل مسائل ایستا پیشنهاد گردید. جهت تکمیل NSA+ برای مسائل پویا، در پژوهش یک الگوریتم ناقص به نام جستجوی حریصانه­ی خوردوها (GVS[[15]](#footnote-15)) ارائه گردید. برای ارزیابی فواید و اشکالات نسبی NSA+ در مقایسه با GVS این الگوریتم­ها برای مسائل زمان­بندی پویای خودروهای خودران به کار گرفته شدند. نتایج پژوهش حاکی از کاهش زمان انتظار و انتقال در راستای افق، بود. با وجود دستیابی به جواب بهینه عمومی، زمان اجر برای مسائل پویا به دلیل ساخت دوباره ی گراف، زیاد می باشد .در این مساله، امکان برخورد AGVها و ترافیک در راه ها بررسی نگردید.

\*در پژوهشی دیگر(Rashidi, 2014)، جهت حل مشکل ساخت مجدد گراف، الگوریتم سیمپلکس شبکه ی پویا (DNSA) توسط رشیدی (۲۰۱۴) مطرح و برای زمان بندی AGV ها استفاده گردید. در این الگوریتم، گراف مورد نظر دوباره ساخته نشد و برخی کمان ها و پارامتر های جواب درختی پوشا به روز رسانی شدند. عملکرد روش پیشنهادی، برای مسائل زمان بندی پویا در بنادر بررسی شد. نتایج نشان دادند الگوریتم پیشنهادی به جواب بهینه عمومی می رسد و از NSA+ عملکرد بهتری دارد. با این حال، در برخی از مسائل با ابعاد بالا، تعداد عملیات های مورد نیاز برای بروز رسانی درخت پوشا، زیاد است و به همین علت، نیاز به مدیریت حافظه می باشد. همچنین، پیکربندی بندر، به صورت مسیر های یک جهتی می باشد.

\***در یک تحقیق**، دو مساله­ی برنامه ریزی یکپارچه سازی تجهیزات پایانه های کانتینری و AGVهای متعدد بدون تداخل را مورد بررسی قرار داد.(Zhong et al., 2020) نویسندگان، مساله را به صورت مدل برنامه ریزی عدد صحیح ترکیبی با هدف کمینه نمودن تاخیر AGVها، مدلسازی نمودند. این مدل بر پایه­ی برنامه­ریزی یکپارچه، مسیر بهینه و عدم تداخل خودروها می­باشد. برای حل این مساله، محققین، یک الگوریتم ترکیبی بر پایه­ی الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات با استفاده از منطق فازی، پیشنهاد نمودند. شبیه سازی پویای گره­های مسیری نشان داد که مدل پیشنهادی می­تواند مسائل دارای تداخل و تراکم AGVها را حل نماید و قابل استفاده در ترمینال­های کانتینری موجود می باشد.

\***در تحقیقی دیگر**،(Wang & Zeng, 2022) مسئله­ی مسیریابی و ارسال AGVها بررسی گردید و یک مدل عدد صحیح ترکیبی جهت کمینه نمودن زمان تکمیل کارها[[16]](#footnote-16) و برای حل یک الگوریتم B&B براساس روش شاخه و کران ارائه گردید. همچنین یک الگوریتم ابتکاری حریصانه دو مرحله ای (TGH)[[17]](#footnote-17) جهت بهبود سرعت الگوریتم برای مسئله­هایی با ابعاد بالا ارائه گردید.هم­چنین یک الگوریتم ابتکاری جهت اطمینان حاصل کردن از عدم برخورد در هر عمق از الگوریتم B&B مطرح گردید. در این پژوهش هم نمونه­های ایستا و هم نمونه هایی پویا از بندر چینگدائو چین جهت ارزیابی کاربردهای عملی این الگوریتم، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با دو رویکرد مرسوم برنامه ریزی FCFS[[18]](#footnote-18) و SETTF[[19]](#footnote-19) مقایسه گردید. هم در مقیاس کوچک و هم در مقیاس بزرگ الگوریتم به طور قابل توجهی از دو ریکرد بهتر عمل می کند. (میزان انحراف[[20]](#footnote-20) از جواب بهینه ۱۳.۳۹٪ نسبت به FCFS و ۲۱.۱۲٪ نسبت به SETTF)

\***در یک تحقیق دیگر**، برنامه­ریزی مسیری بدون تداخل در پایانه­های کانتینری خودکار (ACT) با استفاده از روش یادگیری تقویتی[[21]](#footnote-21)، مورد بررسی قرار گرفت.(Hu et al., 2023) در این پژوهش، چینش ACT به صورت شبکه از گره­ها می­باشد و یک مدل برنامه­ریزی عدد صحیح جهت کمینه سازی مسافت طی شده توسط AGVها توسعه یافت و سپس جهت حل، یک الگوریتم یادگیری تقویتی چند عاملی براساس یک سیاست معین گرادیانی چند عاملی عمیق (MADDPG[[22]](#footnote-22)) مطرح شد. نتایج این گزارش با دو رویکرد مطرح شده در نرم افزار ILOG CPLEX و الگوریتم دایجسترا با پنجره زمانی[[23]](#footnote-23) مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که زمان اجرای این الگوریتم از الگوریتم دایجسترا بیشتر، ولی خطای کمتری دارد. علاوه بر آن، زمان اجرای الگوریتم استفاده شده، از نرم افزار ILOG CPLEX به طور قابل توجهی کمتر بود.

\***در پژوهشی**(Kong et al., 2024)به زمان‌بندی وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار AGVها برای جرثقیل‌های دوگانه ی اسکله ( TQC[[24]](#footnote-24)ها) در پایانه‌های خودکار کانتینری( ACTها) پرداخته شده است و به‌طور خاص تعاملات بین( AGV ها) و ( TQCها) را برای افزایش کارایی عملیاتی تحلیل گردید. در این مطالعه، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط MILP استفاده شده است که محدودیت‌های مربوط به حافظه‌های موقت[[25]](#footnote-25) در محوطه و تراکم AGVها را در نظر می‌گیرد. آزمایش‌ها با حداکثر ۱۴ عدد AGV، ۵ عدد TQC و پیکربندی‌های مختلف تا ۱۳ عدد حافظه موقت در محوطه انجام شده است. الگوریتم ابتکاری جستجوی محلی چندآغازی[[26]](#footnote-26)(که روشی بر مبنای کاهش همسایگی(VND[[27]](#footnote-27)) متغیر است)، بهبود ۳۰ درصدی در کارایی عملیاتی هنگام استفاده از TQCها در مقایسه با جرثقیل‌های اسکله ای QC عادی را نشان داد.

**۲.۲ استفاده از AGV ها در سیستم های تولیدی انعطاف پذیر**

در این بخش آخرین دستاوردهای محققان درکاربرد AGVها در سیستم­های تولید مطالعه و مورد بررسی قرار می­گیرند.

\***در مطالعه ای**، به مسئله­ی کمینه نمودن کل مسافت طی شده و انرژی مصرف شده توسط AGVها چند نوعی در کارگاه­های انعطاف­پذیر صنعتی پرداخته شد(Gao et al., 2022). در این پژوهش، به بررسی میزان تاثیر مصرف انرژی بر عملکرد AGV و چند نوعی بودن از نظر وزن، میزان ابعاد، میزان توانایی موتور و ... پرداخته شد. مدل بهینه­سازی جهت مدلسازی مسئله و الگوریتمی فرا ابتکاری بر اساس الگوریتم ژنتیک و جستجوی محلی با ابعاد بالا ([[28]](#footnote-28)GA-LNS) ارائه شد. نتایج نشان دادند که استفاده از چندین نوع از خودروها، می تواند مصرف سوخت را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

\*در پژوهشی، مسئله­ی زمان بندی AGVها در سیستم­های خودکار نگهداری و بازیابی (AS/AR[[29]](#footnote-29)) را مورد بررسی قرار داد.(Lin et al., 2023) در این پژوهش که در یک سیستم تولیدی منعطف شبیه­سازی شده با ۲۰ ردیف از قفسه­ها (هر ردیف شامل ۵ عدد قفسه) انجام گردید، الگوریتم برنامه ریزی وظایف برای AGVهای چند محموله­ای ([[30]](#footnote-30)MLATSO) بر اساس الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب(NSGA)[[31]](#footnote-31)، مطرح شد. نتایج مطالعه، با الگوریتم ازدحام ذرات ممتیک تغییر یافته (MMPSO)[[32]](#footnote-32) مقایسه گردید. زمان رسیدن به مقدار بهینه بیشتر از MMPSO بود ولی دقت مقدار بهینه بهتر از MMPSO مشاهده گردید.

\***یک تحقیق دیگر** بر روی زمان­بندی بی درنگ AGVها در کارگاه­های کاری [[33]](#footnote-33) تمرکز داشته است.(Cai et al., 2023) در این پژوهش تلاش بر حل مشکلاتی نظیر درواست­های تصادفی یا خرابی ناگهانی دستگاه­ها شده است. در این پژوهش از تعدادی پردازنده (PU[[34]](#footnote-34)) جهت پیش­بینی زمان مورد نیاز برای انجام صفی[[35]](#footnote-35) از وظایف اولویت­دار استفاده گردید. در این مطالعه، هدف بیشینه نمودن رضایت مشتری، استفاده از وسایل نقلیه و کمینه نمودن استفاده از انرژی است. در این تحقیق که در یک کارگاه کاری شبیه سازی شده انجام گردید، زمان انتشار اطلاعات مربوط به وظیفه بعدی به AGV هنگامی است که AGV وظیفه قبلی را به اتمام رسانده است. نتایج تجربی نشان دادند که این رویکرد می تواند منجر به امکان پیش­بینی بهتر و دقیق تر AGV گردد.

\***در پژوهشی دیگر** (Ahmadi-Javid et al., 2024)، به زمان بندی وسایط انتقال دهنده[[36]](#footnote-36) در کارگاه های کاری پرداخته شد. در این تحقیق، به دلیل استفاده از انتقال دهنده های ناهمزاد[[37]](#footnote-37) در مقابل انتقال دهند های متعارف همزاد[[38]](#footnote-38) سرعت AGVها و ربات های متقل کننده مختلف بوده و از لحاظ کارکرد، برخلاف ماشین های همگون، متفاوت با یکدیگر هستند.. به دلیل استفاده از این ماشین های ناهمزاد، پیچیدگی مساله افزایش یافته ولی در مقابل کارایی کارگاه کاری نیز بهبود گردیده است. برای کمینه نمودن زمان کل عملیات، یک مدل عدد صحیح ترکیبی خطی (MILP) توسعه گردید و این مساله با یک راه حل مبتنی بر شاخه و کرانه حل گردید. در این الگوریتم شاخه و کرانه، برای حد پایین، یک روش ابتکاری دو سطحی ارائه شد. سپس، جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، با حل کننده ی CPLEX 12.1 مقایسه گردید. در ۴۰ آزمایش انجام شده، در تمامی آزمایشات، الگوریتم پیشنهادی زود تر به جواب بهینه رسید.

**۳. نتایج بدست آمده از پژوهش ها**

در این بخش به ارزیابی پژوهش های انجام شده، پرداخته می شود و سپس نتایج حاصل از این ارزیابی ها، در قالب مشاهداتی ارائه می­گردد.

**۱.۳ مقایسه نتایج کلی**

در این بخش به شرح نتایج پژوهش­های اصلی در دو حوزه­ی استفاده از AGVها در پایانه­های کانتینری و محیط­های تولیدی پرداخته می­شود. جدول-1 به پژوهش­های اصلی مربوط به تصمیم گیری، مسیریابی و زمان¬بندی خودروهای خودران AGVدر پایانه های کانتینری و جدول 2 نیز در محیط­های تولیدی می­پردازد. ستون­های دو جدول عبارتند از: سال نام پژوهشگر (سال)، رویکرد مدل­سازی و راه حل­ها (الگوریتم/روش/برنامه کامپیوتری)، ابعاد مسئله و نتایج تجربی. مهم ترین نتایج بدست آمده از بررسی جدول- 1 را می توان در قالب مشاهدات زیر خلاصه نمود:

**مشاهده-۱:** همانطور که در جدول ۱ مشهود است، در اکثر تحقیقات از برنامه ریزی عدد صحیح ترکیبی جهت مدلسازی استفاده شده است.

**مشاهده-۲:** مسائل را میتوان به چهار گروه مختلف دسته بندی نمود: (الف) مسائل با توپولوژی مسیر کلی (ب) مسائل بهینه سازی مسیر (ج) مسائل با یک توپولوژی مسیر خاص و (د) مسائل مربوط به ارسال AGVها.

**مشاهده-۳:** در مسائل با توپولوژی های مسیری کلی، بر اساس چینش ترمینال های کانتینری، روش های حل به سه دسته ، شامل روش های پنجره زمانی، ایستا و پویا، تقسیم بندی می شوند

**مشاهده-۴:** در مسائل بهینه سازی با یک توپولوژی مسیر خاص، برای چینش بنادر، سه نوع توپولوژی، شامل دایره ای، خطی و مشبک را می توان طراحی و توجه نمود.

**\*مشاهده-۵:** بزرگترین مسئله با بیشترین ابعاد توسط (Lin et al., 2023) با تعداد ۳۵ AGV حل گردیده است.

**مشاهده-۶:**AGVهای چند ظرفیتی به ندرت در محیط­های تولید استفاده می­شوند. (Chawla et al., 2018). دلیل آن ، این است که بسیاری از سیستم­های تولید نیاز به اجرای جواب­های بهینه با انعطاف­پذیری بالا می باشند.

**\*مشاهده-۷:** گستره­های مسئله­های مسیریابی خودروها برای AGVها در این پژوهش­ها دیده نشدند. این گستره­ها با توجه به زمان و ظرفیت خودروها و تعداد انبارها، نوع ارسال، خودرو با یا بدون بازگشت و کنترل خودرو، دسته بندی می­شوند. این دسته­بندی جهت مطالعه­ی مسائل گسترده تر دیگری، همچون مسئله­ی مسیریابی متناوبی، مسئله مسیریابی حاوی ظرفیت و نظایر آن می­باشند.

**\*مشاهده-۸:** محیط­های پویا جهت زمان­بندی و مسیریابی AGVها به ندرت هم در اتوماسیون بنادر و هم سیستم­های تولیدی دیده شده است.

**\*مشاهده-۹:** روش­های پیشنهادی در سیستم های AGV در آزمایشگاه مطالعه گردیدند و کاربردشان در محیط های صنعتی کم می باشد.

**\*مشاهده-۱۰:** مساله ی تداخل و وقفه ی AGVها به دلیل زیاد شدن تعداد پارامتر ها و محدودیت های، در مسائل کمی مورد بررسی قرار گرفته اند، با وجود اینکه در دنیای واقعی، تداخل و یکی از رایج ترین چالش های استفاده از AGVها می باشد.

**\*مشاهده-۱۱:** در روش های مبتنی بر شاخه و کرانه، از روش های ترتیبی [[39]](#footnote-39) بیشتر استفاده گردیده است. این رویکرد، باعث کند بودن شدن پروسه ی جستجوی جواب می گردد. از روش های شاخه و کرانه مبتنی بر محاسبات موازی[[40]](#footnote-40) در پژوهش ها، جهت حل مدل عدد صحیح مختلط کمتر استفاده شده است.

# . چالش­های استفاده از AGVها

در این بخش به چالش­های استفاده­ی بیش از حد AGVها در سیستم­های گوناگون پرداخته می­شود. یکی از چالش­ها، اجرای محیط­های شبیه­سازی که بتوانند چندین چینش را هم در پایانه­ی کانتینری و هم در سیستم­های تولیدی داشته باشند، است.(مشاهدات ۱ الی ۸) در این سیستم­های، میتوان تعداد AGV متغیر و تعداد زیادی خطوط عبوری به همراه عابرین در حرکت کنار خطوط عبوری داشت.

همچنین سومین چالش، کار بر روی رویکردهایی جهت زمان­بندی پویا و مسیریابی بر پایه­ی شبیه سازی دو لایه ای است. (مشاهده-۱۵) این رویکردها در دو مرحله انجام می­پذیرد. در قدم اول در شبیه سازی در زمان حل هر مساله­ی مسیریابی، زیر شبیه سازی­ها برای هر مسیر جایگزین تولید می گردند. سپس در مرحله دوم، عملکردهای تجربی توسط این زیر شبیه سازی­ها جهت ساخت حل مسیری در شبیه­سازی­های بعدی مورد استفاده قرار می­گیرند.

چهارمین چالش، توسعه­ی الگوریتم­های بهینه برای مسائل عملی گوناگون مسیر یابی AGVها می­باشد. (مشاهده-ی ۱۶) یکی از گستره­های خاص، خودروهای ظرفیت­دار می باشند. تعداد این خودروها ثابت و دارای ظرفیت واحد می­باشند و باید حداکثر خدمات مورد نیاز یک کالا و ARP را در پنجره زمانی­ای، تامین نمایند. در این پنجره زمانی، همچنین محدودیتی اضافی روی زمان تقاضای سرویس نیز وجود دارد.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **مرجع** | **مدل** | **روش حل مدل** | **ابعاد مساله (تعداد)** | **نتایج تجربی** |
| (Rashidi & Tsang, 2011) | IP | روشی مبتنی بر سیمپلکس شبکه |  |  |
| (Rashidi, 2014) | IP | ارتقای الگوریتم NSA+ و حل به صورت داینامیک |  |  |
| (Zhong, Yang, Dessouky, & Postolache, 2020) | MIP | الگوریتم ترکیبی ژنتیک و ازدحام ذرات با منطق فازی | ۵-۲۰۰ کانتینر و ۳-۲۴ عدد AGV  با ۴ عدد QC و ۴ عدد YC[[41]](#footnote-41) | کارایی الگوریتم نسبت به الگوریتم های ژنتیک هم در ابعاد پایین و هم بالا بسیار بهتر بود. |
| (Wang & Zeng, 2022) | MIP | رویکردی بر اساس روش شاخه و کران | حالت ایستا: ۱۲-۱۸ عدد AGV و ۱۰۰-۲۰۰ کانتینر  حالت پویا: ۱۸ عددAGV و ۱۰۰۰ کانتینر | عملکرد الگوریتم از هر دو روش FCFS و SETTF بهتر بود. |
| (Hu, Yang, Xiao, & Wang, 2023) | IP | یادگیری تقویتی | ۴۵ الی ۱۳۵ کار کانتینری و ۲ الی ۵ عدد AGV | زمان حل روش از الگوریتم دایجسترا بیشتر ولی خطای بسیار کمتر و زمان حل از نرم افزار CPLEX کمتر بود |
| (Kong et al., 2024) | MIP | روش جستجوی چند آغازی | ۱-۱۴ AGV، ۵ TQC ، ۰-۱۳ حافظه موقت در محوطه | ۳۰ درصد افزایش در کارایی عملیاتی |

**جدول 1 - پژوهش های اصلی انجام شده در ارتباط با استفاده از AGVها در پایانه های**

**جدول 2- تحقیقات اصلی انجام شده در حوزه ی استفاده از AGV ها در سیستم های تولیدی منعطف**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **مرجع** | **مدل (الگوریتم/روش/برنامه)** | **ابعاد مساله (تعداد)** | **نتایج تجربی** |
| (Gao, Zheng, Gao, Tong, & Han, 2022) | برنامه ریزی AGVهای چند نوعی جهت کمینه نمودن مصرف انرژی | ۶ عدد AGV  ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ وظیفه | مصرف کمتر انرژی با استفاده از چند نوع AGV در مقایسه با تک نوع |
| (Cai, Li, Luo, & He, 2023) | برنامه ریزی بی درنگ تعدادی AGV و تعدادی پردازنده با قابلیت آماده سازی به روز رسانی وظایف | ۲ AGV و ۴ پردازنده برای مقیاس کوچک  ۱۰ عدد AGV و ۲۰ پردازنده برای مقیاس بزرگ  ۵۶ وظیفه | آماده سازی بیشتر و پیش بینی دقیق تر با رویکرد جدید انتقال اطلاعات وظیفه ی بعدی به AGVها |
| (Lin et al., 2023) | برنامه ریزی AGV چند محموله ای با حل بر اساس الگوریتم ژنتیک NSGA | 5-35 عدد AGV هر یک با ۵ یا ۱۰ ظرفیت، ۱۰-۷۰ وظیفه در هر آزمایش | الگوریتم زمان اجرای بیشتری نسبت به MMPSO ولی دقت بالاتری داشت. |
| (Ahmadi-Javid et al., 2024) | مدلی عدد صحیح ترکیبی خطی و  حل با الگوریتم شاخه و کران با حد پایین دو مرحله ای | ۲ نوع انتقال دهنده، ۴ ماشین، وظایف ۵-۸، عملیات ۲۱-۳۶ | در تمامی آزمایشات، روش پیشنهادی از مدل MILP مرسوم بهتر عمل نمود ولی از مدل ارضای محدودیت (CP) بهتر عمل ننمود. |

۵. جمع بندی

امروزه، دو بازوی اصلی صنعت کشتیرانی و صنعت تولیدات باید به روزرسانی و هوشمند شوند. زیرساخت این صنایع دارای تکنولوژی­های جدید هوشمند خودرو های AGV است. در این پژوهش به مرور استفاده از AGVها در اتوماسیون بنادر و سیستم­های تولیدی پرداخته شد. در این مقاله­ی مروری، مسائل مدل­سازی و راه­حل­هایشان مورد بررسی قرار گرفت. امروزه این خودروهای AGV ، بدون راننده هستند. (De. Ryck, 2020) این مقاله، نشان می­دهد که سیستم­های AGV یک موضوع جدید برای پژوهش در حوزه­ی اتوماسیون بنادر و سیستم­های تولیدی می­باشد. همچنین، تحقیقات آینده باید پاسخگوی چالش­های آتی باشند و برای چینش­های مختلف مسیر الگوریتم­های بهینه توسعه داده شوند. بی­شک، تولیدات در هر دو صنایع، کشتیرانی و تولیدات، تحت تاٍثیر سه عامل می باشند: کیفیت خدمت­رسانی، سرعت خدمت­رسانی و مجموع کل هزینه­ها. این عوامل نقش مهمی در رقابت کسب­و کارهای امروز، ایفا می کنند.

مراجع

1. Ahmadi-Javid, A., Haghi, M., & Hooshangi-Tabrizi, P. (2024). Integrated job-shop scheduling in an FMS with heterogeneous transporters: MILP formulation, constraint programming, and branch-and-bound. *International Journal of Production Research*, *62*(9), 3288–3304. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2230489
2. Akturk, M. S., & Yilmaz, H. (1996). Scheduling of Automated Guided Vehicles in a Decision Making Hierarchy. *International Journal of Production Research*, *34*(2), 577–591. https://doi.org/10.1080/00207549608904920
3. Broadbent, A. J., Besant, C. B., Premi, S. K., & Walker, S. P. (1985). *Free ranging AGV Systems: Promises, Problems and Pathways*. 221–237.
4. Cai, L., Li, W., Luo, Y., & He, L. (2023). Real-time scheduling simulation optimisation of job shop in a production-logistics collaborative environment. *International Journal of Production Research*, *61*(5), 1373–1393. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2023777
5. Chawla, V. K., Chanda, A. K., & Angra, S. (2018). Scheduling of multi load AGVs in FMS by modified memetic particle swarm optimization algorithm. *Journal of Project Management*, 39–54. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2017.10.001
6. Dondo, R., Méndez, C., & Cerdá, J. (2003). An Optimal Approach to the Multiple-depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows and Capacity Constraints. *Latin American Applied Research Pesquisa Aplicada Latino Americana = Investigación Aplicada Latinoamericana*, *33*.
7. Edrissi, A., Askari, M., & Smaniotto Costa, C. (2019). Electric-vehicle car-sharing in one-way car-sharing systems considering depreciation costs of vehicles and chargers. *International Journal of Transportation Engineering*, *7*(2). https://doi.org/10.22119/ijte.2018.121054.1395
8. Gao, J., Zheng, X., Gao, F., Tong, X., & Han, Q. (2022). Heterogeneous Multitype Fleet Green Vehicle Path Planning of Automated Guided Vehicle with Time Windows in Flexible Manufacturing System. *Machines*, *10*, 197. https://doi.org/10.3390/machines10030197
9. Gribkovskaia, I., Halskau, Ø., & Myklebost, K. (2001). *Models for Pick-Up and Deliveries from Depots with Lasso Solutions”. Working Paper*.
10. Hsu Wen Jing & Huang Shell Ying. (1994). Route planning of automated guided vehicles. *Proceedings of the Intelligent Vehicles ’94 Symposium*, 479–484. https://doi.org/10.1109/IVS.1994.639565
11. Hu, H., Yang, X., Xiao, S., & Wang, F. (2023). Anti-conflict AGV path planning in automated container terminals based on multi-agent reinforcement learning. *International Journal of Production Research*, *61*(1), 65–80. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1998695
12. Kong, L., Ji, M., Yu, A., & Gao, Z. (2024). Scheduling of automated guided vehicles for tandem quay cranes in automated container terminals. *Computers & Operations Research*, *163*, 106505. https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106505
13. Lin, Y., Xu, Y., Zhu, J., Wang, X., Wang, L., & Hu, G. (2023). MLATSO: A method for task scheduling optimization in multi-load AGVs-based systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *79*, 102397. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102397
14. Qiu, L., & Hsu, W. J. (2000). *Routing AGVs by Sorting*. *3*, 1465–1470.
15. Rashidi, H. (2014). A dynamic version for the Network Simplex Algorithm. *Applied Soft Computing*, *24*, 414–422. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.07.017
16. Rashidi, H., & Tsang, E. P. K. (2011). A complete and an incomplete algorithm for automated guided vehicle scheduling in container terminals. *Computers & Mathematics with Applications*, *61*(3), 630–641. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.12.009
17. Shih, L.-H., & Chang, H.-C. (2001). A Routing and Scheduling System for Infectious Waste Collection. *Environmental Modeling & Assessment*, *6*(4), 261–269. https://doi.org/10.1023/A:1013342102025
18. Tan, K. C., Lee, L. H., Zhu, Q. L., & Ou, K. (2001). Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. *Artificial Intelligence in Engineering*, *15*(3), 281–295. https://doi.org/10.1016/S0954-1810(01)00005-X
19. Wang, Z., & Zeng, Q. (2022). A branch-and-bound approach for AGV dispatching and routing problems in automated container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, *166*, 107968. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107968
20. Zhong, M., Yang, Y., Dessouky, Y., & Postolache, O. (2020). Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, *142*, 106371. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106371

1. Automated guided Vehicles [↑](#footnote-ref-1)
2. Modular growth [↑](#footnote-ref-2)
3. Lidar [↑](#footnote-ref-3)
4. Warehouse [↑](#footnote-ref-4)
5. Vision Systems [↑](#footnote-ref-5)
6. Scheduling [↑](#footnote-ref-6)
7. Timetable [↑](#footnote-ref-7)
8. Routing [↑](#footnote-ref-8)
9. Vehicle Routing Problem [↑](#footnote-ref-9)
10. Hsu and Haung [↑](#footnote-ref-10)
11. Two-Dimensional-Mesh [↑](#footnote-ref-11)
12. wirings [↑](#footnote-ref-12)
13. Minimum Cost Flow [↑](#footnote-ref-13)
14. Network Simplex [↑](#footnote-ref-14)
15. Greedy Vehicle Search [↑](#footnote-ref-15)
16. Makespan [↑](#footnote-ref-16)
17. Two-staged Greedy Heuristic [↑](#footnote-ref-17)
18. First Come Frist service [↑](#footnote-ref-18)
19. Shortest empty travel time first [↑](#footnote-ref-19)
20. Optimality Gap [↑](#footnote-ref-20)
21. Reinforcement Learning [↑](#footnote-ref-21)
22. Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient [↑](#footnote-ref-22)
23. Time windows based Dijkstra algorithm [↑](#footnote-ref-23)
24. Tandem Quay Cranes [↑](#footnote-ref-24)
25. ‌Buffer [↑](#footnote-ref-25)
26. Multi Local Search Algorithm [↑](#footnote-ref-26)
27. Variable Neighborhood Descent [↑](#footnote-ref-27)
28. Genetic Algorithm- Large-scale Neighborhood Search [↑](#footnote-ref-28)
29. Automatic Storage and Retrieval System [↑](#footnote-ref-29)
30. Multi-Load AGVs Task Scheduling Optimization [↑](#footnote-ref-30)
31. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm [↑](#footnote-ref-31)
32. Modified Memetic Particle Swarm Optimization [↑](#footnote-ref-32)
33. Job Shop [↑](#footnote-ref-33)
34. Processing Unit [↑](#footnote-ref-34)
35. Queue [↑](#footnote-ref-35)
36. Transporter [↑](#footnote-ref-36)
37. Heterogeneous [↑](#footnote-ref-37)
38. Homogenous [↑](#footnote-ref-38)
39. Sequential [↑](#footnote-ref-39)
40. Parallel Branch and Bound [↑](#footnote-ref-40)
41. Yard Crane [↑](#footnote-ref-41)