

مهندسی فرایند پردازش سفارشات صنعت پخش، با رویکرد نوآورانه مدلسازی ریاضی ترکیب استراتژی Wave-Picking با تکنولوژی Pick-to-Light

محسن قانون

فوق لیسانس مهندسی لجستیک و زنجیره تامین، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه خوارزمی، مشاور لجستیک و طراح انبار
ایمیل: mohsenghanoon@gmail.com وبسایت: www.parstadbir.com

چکیده

این مطالعه به بررسی راهکارهای بهینه‌سازی فرایند پردازش سفارش در لجستیک انبار می‌پردازد. فرایند پردازش سفارش به عنوان یکی از پیچیده‌ترین فعالیت‌های لجستیک داخلی شامل مراحل دریافت سفارش، برنامه‌ریزی، برداشت کالا، کنترل کمی، بسته‌بندی و ارسال است که تحت تأثیر دو عامل کلیدی تنوع SKU و تعداد برداشت از هر SKU قرار دارد. در مقاله حاضر با تمرکز بر ترکیب تکنولوژی Pick-to-Light و استراتژی Wave Picking، راهکاری نوآورانه به نام Wave Pick-to-Light (WPtL) معرفی شده. تکنولوژی Pick-to-Light یک سیستم نوری دیداری است که با راهنمایی پردازشگران از طریق اعلام تعداد برداشت از هر sku، دقت و سرعت عملیات را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، استراتژی Wave Picking نیز امکان پردازش مدیریت شده سفارشات را در بازه‌های زمانی مشخص (موج‌ها) فراهم می‌سازد. لذا در این مقاله با هدف بهینه‌سازی پارامترهای مختلف پردازش، اقدام به ایجاد مدل ریاضی WPtL، تحت مدلسازی ریاضی چندهدفه، با لحاظ نمودن پارامترهای موثر در فرایند پردازش شده است.

نتایج اجرای مدل ریاضی که در قالب یک مسئله عددی حاصل گردیده، نشان می‌دهد که WPtL می‌تواند زمان کل پردازش را نسبت به Pick-to-Light کلاسیک تقلیل دهد. این سیستم با تمرکز بر توزیع بهینه بار کاری بین پردازشگران و مدیریت پویای موج‌های پردازش، انعطاف‌پذیری عملیاتی را به نحو چشمگیری بهبود می‌بخشد. مزیت اصلی WPtL، حذف محدودیت‌های روش‌های کلاسیک مانند منطق پلکانی ثابت در زمان‌بندی عملیات و محدودیت صف انتظار مربوط به الزام بکارگیری نقاله در مدل‌های سنتی است.

این راهکار به‌ویژه برای انبارهای با تنوع SKU متوسط و تعداد برداشت زیاد مناسب بوده و قادر است چالش شرکت‌های پخش در مواجهه با سفارشات پرحجم را بهبود بخشد. پیشنهاد برای تحقیقات تکمیلی نیز شامل بهینه‌یابی تعداد موج‌ها، ادغام یادگیری ماشین برای پیش‌بینی بار کاری و توسعه مدل ریاضی برای پیکربندی‌های پیچیده‌تر است. با عنایت به نتایج این مطالعه بنظر می‌رسد ترکیب هوشمندانه تکنولوژی Pick-to-Light و استراتژی پردازش موجی می‌تواند تحولی در کارایی عملیات فرایند پردازش سفارش در انبارها و شرکت‌های پخش ایجاد نماید.

کلمات کلیدی:

استراتژی پردازش سفارش - راهبری نوری مبتنی بر برداشت موجی - الگوریتم ژنتیک - مدلسازی ریاضی.

Multi-Objective - Wave Picking - Wave Pick-to-Light - Pick-to-Light - Order Processing.

۱- مقدمه

در دنیای رقابتی کنونی، کارایی فرآیندهای لجستیکی به عاملی کلیدی در موفقیت سازمان‌ها تبدیل شده است. این مقاله به بررسی چالش‌های پیش‌روی سیستم‌های پردازش سفارش در انبارها و شرکت‌های پخش می‌پردازد که عمدتاً ناشی از افزایش حجم بالای سفارشات است و لذا مطالعه حاضر بر ارائه راهکاری عملی به منظور بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی پردازش سفارش تمرکز دارد.

مشاهدات میدانی نشان می‌دهند سیستم‌های سنتی با محدودیت‌های جدی در مواجهه با سفارشات متنوع و پرتکرار روبرو هستند، مشکلاتی مانند زمان‌بر بودن فرآیندها، خطای انسانی و عدم انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی عملیات که این مهم، لزوم توسعه راهکارهای نوین را آشکار می‌سازد، از سوی دیگر، سیستم‌های تمام خودکار نیز به دلیل پیچیدگی و هزینه‌های سنگین پیاده‌سازی، برای بسیاری از سازمان‌ها غیرعملی هستند، بنابراین قصد داریم بهبود فرایند مورد بحث را بیشتر از طریق اصلاح رویه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی عملیات فراهم سازیم.

این پژوهش، با ترکیب هوشمندانه تکنولوژی Pick-to-Light و استراتژی Wave Picking، مدل WpTL را به عنوان راهکاری نوین معرفی نموده و در رویکرد پیشنهادی، ضمن حفظ مزایای سیستم‌های نیمه‌خودکار، از طریق مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی چندهدفه، امکان دستیابی به ظرفیت‌های بهینه‌تر فراهم شده است. لذا یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنای ارتقای دانش لجستیک، به‌ویژه در رابطه با فرایند پردازش و آماده‌سازی سفارشات و همچنین بهبود عملکرد تجهیزات پردازش سفارش قرار گیرد.

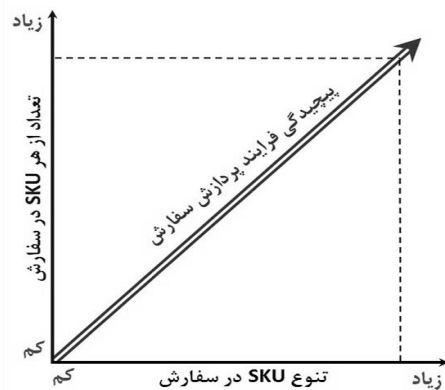
۲- معرفی اجمالی استراتژی‌ها و تکنولوژی‌های پردازش سفارش

گستره فعالیت‌های لجستیک داخلی، به عنوان بخش مهمی از زنجیره تامین، به‌ویژه در انبارها و شرکت‌های پخش، شامل دریافت کالا از بخش‌های بالا دستی زنجیره تا خروج کالا برای تحویل به مشتریان پائین دستی زنجیره را شامل می‌گردد. اصولاً هدف از طرح‌ریزی فرایند پردازش سفارش، حصول اطمینان از دقت لازم و کارآمدی در آماده‌سازی و تحویل به‌موقع سفارشات به مشتریان، با حداقل خطا می‌باشد و براین اساس، فرایند پردازش سفارش^۱، مجموعه‌ای از فعالیت‌های منسجم و فرایندهای سازمان یافته است که با اخذ سفارش مشتریان آغاز شده و ضمن عملیات آماده‌سازی، بسته‌بندی و ارسال کالای مورد سفارش، پایان می‌یابد. بطور معمول، فرایند پردازش سفارش به عنوان یکی از پیچیده‌ترین فعالیت‌های لجستیک داخلی محسوب می‌شود و از اجزاء متعددی تشکیل می‌گردد که رایج‌ترین بخش‌های آن به ترتیب فرایند، عبارتند از:

۱. دریافت سفارش^۲: که شامل ورود سفارشات مشتریان از طریق سیستم فروش و نرم‌افزار مدیریت انبار^۳ و اعلام نیاز مستقیم مشتریان.
۲. برنامه‌ریزی سفارش^۴: که در قالب تعیین اولویت سفارشات، زمان‌بندی پردازش سفارش و تخصیص منابع، آتم از نیروی انسانی، تجهیزات و ... می‌باشد.
۳. مسیریابی و تجمیع سفارشات: به معنی گروه‌بندی سفارشات مشابه برای بهینه‌سازی مسیرهای برداشت کالا^۵ است.
۴. برداشت کالا^۶: مشتمل بر انتخاب و جمع‌آوری اقلام مورد سفارش از مکان‌های ذخیره‌سازی (به عنوان مثال قفسه‌ها)، توسط گستره‌ای از روش‌های دستی تا تجهیزات اتوماتیک.
۵. بررسی و کنترل اقلام^۷: شامل بررسی تطبیق اقلام برداشت شده با سطرهای سفارش از لحاظ تعداد، نوع، کیفیت و

-
- 1 Order Processing
 - 2 Order Reciving
 - 3 Warehouse Management System
 - 4 Order Planning
 - 5 Picking
 - 6 Order Picking
 - 7 Checking/Quality Control

۶. **تجمیع سفارش**^۸ ترکیب چند بخش از یک سفارش در صورت برداشت از مناطق مختلف انبار یا انبارهای متعدد.
 ۷. **بسته‌بندی**^۹: بسته‌بندی اقلام جمع‌آوری شده هر سفارش طبق درخواست مشتری، با رعایت استانداردهای مربوطه.
 ۸. **انتقال به ناحیه ارسال**^{۱۰}: به معنی انتقال سفارش آماده شده به ناحیه بارگیری و ارسال.
 ۹. **حمل و خروج بار از انبار**^{۱۱}: شامل بارگیری سفارش در وسائل نقلیه مناسب و ارسال اقلام جمع‌آوری شده به مشتریان.
- باعنایت به توضیحات فوق و ویژگی‌های متداول فرایند پردازش سفارش، دو عامل تنوع sku در سفارش (تعداد سطر سفارش) و تعداد از هر sku در سفارش (تعداد برداشت از هر کالا)، جزو مولفه‌های مهم و تاثیرگذار بر پیچیدگی فرایند پردازش سفارش قلمداد می‌گردند بگونه‌ای که سه ترکیب ممکن را ذیل رقم خواهند زد:



۱. تنوع sku زیاد باشد ولی تعداد از هر sku کم باشد.
 ۲. تنوع sku کم باشد ولی تعداد از هر sku زیاد باشد.
 ۳. هم تنوع sku زیاد باشد و هم تعداد از هر sku زیاد باشد.
- ترکیبات فوق و عوامل دیگری ازجمله ظرفیت موردنیاز یا ظرفیت مورد انتظار در فرایند پردازش سفارش و همچنین سطح تکنولوژی قابل قبول و به تبع آن، میزان سرمایه‌گذاری در عملیات پردازش سفارش، بازه گسترده‌ای از استراتژی‌های پردازش را شکل می‌دهند که ذیل عناوین مهم‌ترین استراتژی‌ها و تکنولوژی‌های روزآمد پردازش نامبرده شده است^{۱۲}:

۱- استراتژی حرکت جمع‌آوری‌کننده سفارش^{۱۳} (پردازشگر) به سمت مکان‌های ذخیره‌سازی اقلام^{۱۴}

۱-۱- جمع‌آوری سفارش برپایه عملکرد جمع‌آوری‌کننده سفارش

۱-۱-۱- پیمایش جمع‌آوری‌کننده سفارش^{۱۵} به سمت اقلام انبار

۱-۱-۱-۱- استراتژی Discrete Order Picking / Single Order Picking

۱-۱-۱-۲- استراتژی Batch Picking

۱-۱-۱-۳- استراتژی Zone Picking

۱-۱-۱-۴- استراتژی Cluster Picking

۱-۱-۱-۵- استراتژی Wave Picking

۱-۱-۱-۶- استراتژی ترکیبی براساس پیمایش پردازشگر

۱-۲- حرکت جمع‌آوری‌کننده سفارش توسط تجهیزات مکانیزه^{۱۶} غیرهوشمند

۱-۲-۱- تجهیزات مکانیزه ویژه جمع‌آوری سفارش مانند Order Picker

۱-۲-۱-۱- تجهیز Crain غیرهوشمند و تکنولوژی ذخیره-بازیابی حامل پردازشگر^{۱۷}

۲- انتقال کالا به محل جمع‌آوری‌کننده سفارش

۲-۱- Carousal

8 Consolidation

9 Packing

10 Shipping Area

11 Shipping

۱۲ جهت کسب اطلاعات بیشتر، به مقاله "مطالعه تطبیقی استراتژی‌های پردازش سفارش در صنعت پخش با تکنولوژی‌های نوآورانه لجستیکی"، تالیف محسن قانون مراجعه شود - مقاله برگزیده ششمین کنفرانس بین‌المللی صنعت پخش - اردیبهشت ۱۴۰۳ - جزیره کیش، مراجعه فرمایید.

13 Order picker

14 Picker to Item یا Man to Pick

15 Walk and Pick System (WPS)

16 Ride and Pick System (RPS)

17 Person a Board AS/RS

۳- ترکیب روش‌های نیمه اتوماتیک پردازش، شامل حرکت جمع‌آوری‌کننده سفارش به سمت اقلام کالا و انتقال اقلام به سمت جمع‌آوری‌کننده سفارش

Pick-to-Light - ۱-۳

Pick to Belt - ۲-۳

۴- جمع‌آوری سفارش توسط تجهیزات مکانیزه هوشمند

AS/RS^{۱۸} - ۱-۴

2D & 3D Shuttle - ۲-۴

Shuttle Rack - ۳-۴

Pick to Robot - ۴-۴

A-Frame - ۵-۴

لازم به یادآوری است که در این مقاله سعی داریم که از بین انواع استراتژی‌ها و تکنولوژی‌های متنوع پردازش سفارش، به معرفی و تحلیل راهکاری بپردازیم که از منظر قابلیت‌های تکنولوژیکی، ظرفیت‌های عملیاتی، هزینه‌های پیاده‌سازی، میزان سهولت تامین تکنولوژی در ایران و صعوبت استقرار، در سطح قابل قبولی بوده و هم اینکه از انعطاف‌پذیری بالایی در مواجهه با اقلام متفاوت از لحاظ ابعاد و وزن، که از ویژگی‌های مطرح در شرکت‌های پخش است نیز برخوردار باشد و لذا بنظر می‌رسد تمرکز بر روی راهکاری که ضمن تامین الزامات فوق، دارای ویژگی نیمه اتوماتیک بودن نیز باشد، می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای قابل تعمق محسوب گردد و در این راستا به مطالعه ترکیب تکنولوژی Pick-to-Light و همچنین یکی از استراتژی‌های مبتنی بر "پیمایش جمع‌آوری‌کننده سفارش (پردازشگر) به سمت اقلام انبار"، با هدف هم‌افزایی حاصل از ترکیب آنها، پرداخته شده است.

۲-۱- مروری بر استراتژی‌های مبتنی بر پیمایش جمع‌آوری‌کننده سفارش به سمت اقلام انبار

گروهی از استراتژی‌های پردازش سفارش که برپایه حضور مستقیم پردازشگر در طی فرایند پردازش می‌باشند، اغلب به واسطه تفاوت در رویه‌های مستتر در عملیات پردازش از یکدیگر تفکیک می‌شوند، بنابراین نقش پردازشگر در قالب انتخاب، برداشت و حمل آیتم‌های سفارش، در بستر فرایند مبتنی بر استراتژی‌های مذکور تجلی خواهد یافت، لذا در ادامه اختصاراً به معرفی انواع استراتژی‌های مبتنی بر پیمایش جمع‌آوری‌کننده سفارش پرداخته شده است.

۲-۱-۱- Discrete Order Picking / Piece Picking / Single Order Picking

در استراتژی Single Order Picking، skuهای مندرج در هر سفارش، بصورت اختصاصی و مستقل از سایر سفارشات، در یک مرحله، توسط پرسنل پردازشگر جمع‌آوری می‌شوند لذا برای سفارشات بزرگ^{۱۹} (تعداد زیاد) که دارای تقاضای کم^{۲۰} باشند (تکرار درخواست از سوی مشتری کم است) یا سفارشات اضطراری یا سفارشات با ارزش مالی بالا که نیازمند دقت در جمع‌آوری می‌باشند، مناسب است. بدیهی‌است سادگی و زمان پاسخ نسبتاً سریع برای تحقق سفارشات، از مزایای قابل توجه استراتژی مذکور است. استراتژی مذکور به دلیل پیمایش‌های درون انبار و زمان الزامی برای پردازش تکی skuها، از کارایی کمتری نسبت به سایر استراتژی‌ها برخوردار است. در ادامه مهم‌ترین الزامات استراتژی Single Order Picking را برشمردیم:

۱- مسیر یابی بهینه:

- طراحی کوتاه‌ترین مسیر از طریق الگوریتم‌هایی مانند Nearest Neighbor
- به‌روزرسانی بلادرنگ مسیرها در صورت تغییر موجودی.

18 Automatic Storage and Retrieval System
19 Large Order
20 Low Demand

۲- ساده سازی فرآیند:

- استفاده از لیست های ساده برداشت کالا و یا دستگاه هایی مانند اسکنرهای بارکد.
- کاهش الزامات آموزشی برای پردازشگرها.

۳- سیستم های پاسخگویی سریع:

- امکان پردازش فوری برای سفارشات اضطراری.

۲-۱-۲ Batch Picking

استراتژی Batch Picking مبتنی بر پردازش همزمان یک sku در یک گروه (Batch) از سفارشات می باشد، بنابراین هنگامی که چندین سفارش برای یک sku وجود دارد سبب کمینه شدن تعداد مراجعات پرسنل پردازشگر برای جمع آوری یک sku خاص خواهد شد (یک مراجعه برای تعدادی از سفارشات شامل یک sku مشترک). همچنین در استراتژی Batch Picking، هر گروه از اقلام مورد سفارش می تواند توسط یک پردازشگر بازیابی گردند و این بدان معنی است که سفارشات مشتریان در داخل Batch ها با هم تجمیع می شوند، که در اینجا ضروریست اندازه بهینه Batch ها تعیین شده و سپس مطابق روش اولین سرویس دهی به اولین ورودی^{۲۱}، Batch ها ایجاد گردند. Batch Picking در مورد سفارشات کوچک^{۲۲} (تعداد کم) که دارای تقاضای زیاد^{۲۳} هستند (تکرار سفارش از سوی مشتری زیاد باشد)، مناسب است و منجر به کاهش زمان تردد بین مکان های برداشت کالا از طرق بهینه سازی تراکم کالای انتخابی می گردد، لذا بهبود عملیات تفکیک، به منظور تجمیع و تشکیل سفارشات^{۲۴} هر مشتری از ویژگی های این روش می باشد. در ادامه مهم ترین الزامات استراتژی Batch Picking درج گردیده است:

۱- الگوریتم های هوشمند گروه بندی:

- شناسایی سفارشات با اقلام مشترک (Cluster Analysis)
- اولویت بندی سفارشات بر اساس مهلت تحویل یا ارزش مشتری.

۲- ظروف جمع آوری مناسب:

- استفاده از سبدها یا کارت های چند قسمتی برای تفکیک سفارشات.
- برچسب گذاری واضح برای جلوگیری از اختلاط سفارشات.

۳- نرم افزار مدیریت سفارش:

- قابلیت چاپ لیست های جمع آوری ترکیبی یا نمایش دیجیتالی.

۲-۱-۳ Zone Picking

استراتژی Zone Picking در قالب تفکیک انبار به چند منطقه (Zone)، تقسیم سفارشات برحسب نواحی و تعریف مسیرهای جمع آوری سفارشات بین نواحی عمل می کند و لذا هر پردازشگر، مسئول انتخاب کالاها از یک منطقه خاص خواهد بود. هر یک از پرسنل انبار در این روش، فقط یک بخش از هر سفارش را پردازش می کنند و بخش های بعدی آن سفارش، توسط سایر پردازشگرها جمع آوری می گردند و سپس کالاها در یک مکان مشترک گردآوری می شوند. این استراتژی برای انبارهای وسیع مناسب است که هر پردازشگر مسئول انتخاب و بازیابی اقلام ناحیه معینی از انبار باشد. در ادامه مهم ترین الزامات استراتژی Zone Picking نوشته شده است:

21 First Come First Served
22 Large Order
23 Hight Demand
24 Order Integrity

۱- طراحی چیدمان بهینه مناطق:

- تقسیم انبار براساس معیارهایی مانند فرکانس پردازش^{۲۵} یا نوع کالا (مانند حجیم/سبک).
- اطمینان از دسترسی آسان به مناطق پرترافیک.

۲- سیستم‌های راهنمای برداشت کالا:

- استفاده از سیستم‌های الکترونیکی برای کاهش خطا در نواحی انبار.
- نصب نشانگرهای فیزیکی برای تعیین مرز مناطق.

۳- توزیع متعادل بار کاری:

- مانیتورینگ لحظه‌ای ترافیک مناطق و تعدیل نیروی انسانی.

۲-۱-۴ Wave Picking

استراتژی Wave Picking جهت جلوگیری از بروز تلاطم در عملیات پردازش و افزایش بهره‌وری فرایند آماده‌سازی سفارشات طراحی شده است. در این استراتژی، سفارشات براساس شاخص‌هایی از جمله تاریخ تحویل یا ناحیه خرده‌برداری، جمع‌آوری و پردازش می‌گردند، لذا برخی از محصولات به‌صورت همزمان انتخاب می‌شوند و سپس محصولات به ایستگاه‌های پردازش ارسال می‌شوند. شایان ذکر است که بهره‌گیری از برنامه زمانبندی، یکی از نقاط قوت استراتژی Wave Picking محسوب می‌شود و به این ترتیب، سفارشات، مطابق Wave از قبل برنامه‌ریزی شده، در زمان‌های خاصی پردازش می‌گردند که این ویژگی، برای هماهنگی بهتر و بیشینه‌سازی ظرفیت عملیات انتخاب و حمل، ضروری می‌باشد. در ادامه مهم‌ترین الزامات استراتژی Wave Picking درج گردیده است:

۱- برنامه‌ریزی زمانی دقیق:

- تعیین بازه‌های زمانی (موج‌ها) بر اساس الگوی سفارشات (مثلاً ساعات اوج مصرف).
- هماهنگی با بخش‌های دیگر لجستیک مانند حمل و نقل برای تحویل به موقع.

۲- سیستم مدیریت انبار (WMS) پیشرفته:

- قابلیت گروه‌بندی سفارشات براساس مهلت تحویل.
- یکپارچه‌سازی با سیستم‌های حمل و نقل برای کاهش تأخیرات.

۳- انعطاف‌پذیری نیروی کار:

- استخدام کارگران موقت در ساعات اوج سفارشات.
- آموزش پردازشگرها برای کار در بازه‌های زمانی فشرده.

۲-۱-۵ Cluster Picking

در استراتژی Cluster Picking، محصولات براساس ارتباطات طبیعی یا تشابه درخواست‌ها، به گروه‌هایی تقسیم می‌شوند و هر گروه به عنوان یک واحد، انتخاب و پردازش می‌گردد، لذا استراتژی مذکور، روشی مبتنی بر انتخاب و استقرار اقلام مورد سفارش در ظروف سفارش چندگانه‌ای که می‌توانند شامل سبد حاوی دسته سفارش^{۲۶} یا سفارش گسسته^{۲۷} بوده که در یک زمان (از طریق راهکارهای دستی یا خودکار) پردازش می‌گردند نیز باشد.

در ادامه، طی جدول ۰۱، مقایسه انواع روش‌های پردازش مبتنی بر پیمایش جمع‌آوری‌کننده (پردازشگر)، از منظر معایب، مزایا و الزامات، ارائه شده است:

معیارها	Wave Picking	Zone Picking	Batch Picking	Cluster Picking	Single Picking
تعریف	پردازش سفارشات در دسته‌های زمانی (موج‌ها) بر اساس مکان یا زمان حمل.	تقسیم انبار به مناطق مجزا، هر کارگر در یک منطقه عمل می‌کند.	جمع‌آوری همزمان چند سفارش مشابه توسط یک کارگر.	جمع‌آوری چند سفارش در یک طرف بدون تفکیک اولیه.	پردازش تک‌به‌تک سفارشات (یک کارگر = یک سفارش).
مزایا	کاهش تردد کارگران	تخصصی‌شدن کارگران	صرفه‌جویی در زمان	حذف سورتینگ	دقت بالا
	یکپارچه با حمل‌ونقل	کاهش خطا در مناطق پیچیده	کاهش مسافت	سرعت بالا	سادگی پیاده‌سازی
معایب	نیاز به برنامه‌ریزی دقیق	وابستگی به مناطق دیگر	نیاز به سورتینگ پس از پیکینگ	محدودیت ظرفیت حمل	بازدهی پایین در حجم بالا
	تأخیر در سفارشات خارج از موج	ترافیک در نقاط انتقال	خطای احتمالی در سفارشات مشابه	نامناسب برای اقلام حجیم	هزینه نیروی کار بیشتر
مناسب برای	انبارهای بزرگ با حجم سفارشات بالا و حمل‌ونقل منظم.	انبارهای با تنوع محصولی بالا و فضاهای مجزا.	سفارشات با اقلام تکراری و حجم متوسط.	سفارشات کوچک با اقلام سبک و متنوع.	انبارهای کوچک یا سفارشات کاملاً اختصاصی.
نیازمند فناوری	WMS پیشرفته و سیستم زمان‌بندی حمل	WMS با قابلیت تقسیم منطقه‌ای و ردیابی کارگران	اسکنرهای بارکد و سیستم سورتینگ خودکار	ربات‌های حمل بار و سیستم اعلام نوری هوشمند	اسکنرهای دستی و سیستم ثبت سفارش ساده
سرعت پردازش	متوسط (وابسته به برنامه ریزی موج‌ها)	بالا (به شرط توازن مناطق)	بالا (برای سفارشات متوسط)	بالا (به شرط کلاستریگ صحیح)	پائین
هزینه پیاده‌سازی	بالا (نیاز به نرم‌افزار و سخت‌افزار پیشرفته)	متوسط (ساختار منطقه‌بندی نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه)	پایین تا متوسط (وابسته به سطح اتوماسیون)	متوسط (در صورت استفاده از ربات یا سایر تجهیزات هزینه‌بر است)	پایین (نیاز به حداقل تجهیزات)

جدول ۰۱ - مقایسه انواع روش‌های پردازش مبتنی بر پیمایش جمع‌آوری‌کننده

باتوجه به ویژگی‌های فوق، از طریق ترکیب و تجميع نقاط قوت هر یک از استراتژی‌های فوق، امکان دستیابی به ظرفیت‌های فراتر، با هدف ارتقاء کارایی فرایند پردازش، فراهم خواهد شد که در جدول ۰۲ مزایا و چالش‌های آن به اختصار درج گردیده:

بهترین کاربرد	مزیت کلیدی	چالش کلیدی	ترکیب روش‌ها
انبارهای بزرگ با تنوع کالا	مدیریت ازدحام و زمان‌بندی	هماهنگی پیچیده	Wave + Zone
انبارهای با اقلام تکراری	بهره‌وری بالا در زون‌ها	محاسبه اندازه بچ بهینه	Bach + Zone
خرده فروشی آنلاین	سرعت و هماهنگی با حمل و نقل	نیاز به الگوریتم هوشمند	Wave + Bach
کالاهای حجیم یا گران	دقت بالا در مناطق خاص	کاهش بهره‌وری	Single + Zone
مراکز توزیع چند منظوره	بهینه‌سازی کامل فرایند	پیاده‌سازی پیچیده و هزینه‌بر	Wave + Zone + Bach

جدول ۰۲ - ترکیب روش‌های پردازش مبتنی بر پیمایش پردازشگر

۲-۲- مروری بر تکنولوژی Pick-to-Light

تکنولوژی Pick-to-Light یک سیستم دیداری برای بهبود دقت و افزایش سرعت در فرایند انتخاب و برداشت کالا در انبارها است. این تکنولوژی راهکاری اقتصادی است که کمیت و کیفیت عملیات را در بخش خرده‌برداری و جورچینی بوضوح افزایش می‌دهد. تکنولوژی مذکور، پرسنل پردازشگر را قادر می‌سازد تا مکان و تعداد دقیق برداشتن کالا را به سرعت و از طریق نشانگرهای نوری، بدون نیاز به آشنایی با کالای مورد نظر تشخیص دهند. امتیاز اصلی این سیستم، اطلاع رسانی بصری، تعیین

تعداد اقلام برداشت شده، اطلاع از موجودی روزآمد قفسه‌ها (اغلب قفسه‌های خودجریان^{۲۸})، تعیین تعداد هر نوع کالا در سفارشات واصله، کاهش خطاهای انسانی و نهایتاً بهره‌گیری از **رویه پردازش گروهی سفارشات** می‌باشد. سیستم نرم‌افزاری مورد استفاده در تکنولوژی Pick-to-Light معمولاً یک سامانه مدیریت انبار (WMS^{۲۹}) است که با این تکنولوژی ارتباط برقرار می‌کند. سیستم نرم‌افزاری مذکور با اطلاعات دریافتی از دیگر دستگاه‌ها (مانند Hand-held یا انواع بارکدخوان) تعامل برقرار نموده و هدایت بهینه عملیات جمع‌آوری سفارشات را به کمک مندرجات نمایشگرهای نوری، مدیریت می‌کند.



۲-۲-۱- تاریخچه تکنولوژی Pick-to-Light

تکنولوژی Pick-to-Light برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ در کشور ژاپن ابداع شد. در آن زمان، شرکت‌ها به دنبال روش‌هایی برای افزایش سرعت و دقت عملیات پردازش کالا در خطوط مونتاژ و انبارها بودند و هدف اصلی، کاهش خطاهای انسانی و افزایش بهره‌وری در فرآیندهای برداشت کالا بود. در دهه ۱۹۹۰، این فناوری وارد بازارهای آمریکا و اروپا شد. اوائل عمدتاً در صنایع الکترونیک و قطعات کوچک صنعتی مورد استفاده قرار گرفت و شرکت‌هایی مانند SSI Schaefer و Dematic از پیشگامان معرفی این تکنولوژی در کشورهای غربی بودند. در دهه ۲۰۰۰، با افزایش تقاضا برای مدیریت سفارشات پرسرعت و دقیق (مخصوصاً در تجارت الکترونیک)، سیستم Pick-to-Light به یکی از محبوب‌ترین تکنولوژی‌های Order Processing در انبارها تبدیل شد و ویژگی‌های ذیل نیز به این تکنولوژی افزوده گردید:

- یکپارچه‌سازی با سیستم‌های مدیریت انبار (WMS)
- امکان استفاده همزمان توسط چند پردازشگر
- اضافه شدن امکاناتی مانند شمارنده دیجیتال، LEDهای رنگی و اسکنرهای دستی

امروزه تکنولوژی Pick-to-Light بخش مهمی از سیستم‌های هوشمند انبارداری^{۳۰} است و در کنار فناوری‌هایی مانند put-to-light ، vision-picking ، voice-picking (عینک‌های هوشمند)، جزء لاینفکی از انبارهای نوین محسوب می‌شود.

۲-۲-۲- انواع تکنولوژی Pick-to-Light

تکنولوژی Pick-to-Light در طول زمان، بسته به نیاز سازمان‌ها از منظر نوع کالا و میزان خودبستگی^{۳۱}، توسعه‌های متنوعی داشته که براساس رویکردهای متفاوت و سطوح مختلفی از تکنولوژی در چند دسته کلی قابل تقسیم‌بندی است:

28 Flow Rack
29 Warehouse Management System
30 Smart Warehousing
31 Automation

۲-۱-۱-۲ Pick-to-Light کلاسیک



در تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک که در این مقاله Pick-to-Light نیز نامیده می‌شود، از نمایشگر LED و دکمه تأیید تعداد برداشت که مختص به یک sku از یک سفارش مشخص است، استفاده می‌شود. برداشت کالا در این تکنولوژی توسط پردازشگرها از منطق پلکانی تبعیت می‌کند و براین مبنا، تنوع و تعداد کالای (sku) تخصیص یافته به هر پردازشگر، تعیین کننده اندازه پلکان پردازش است و در نتیجه پردازشگران بعدی تنها زمانی شروع به کار خواهد نمود که عملیات پردازشگر قبلی (در پلکان قبل)

بطور کامل تکمیل شده باشد. ضمناً اغلب سیستم نرم‌افزاری Pick-to-Light با سیستم WMS (مدیریت انبار) یا سیستم‌های ERP، مرتبط و یکپارچه می‌گردد و از این طریق اعلام اجزاء هر سفارش تحت علائم نوری، با دقت و به سهولت تحقق می‌یابد. در این تکنولوژی انتقال مازول حمل کالا (مانند سبد پلاستیکی، کارتن یا پالت)، توسط نقاله‌های مستقر در مقابل قفسه‌ها که عمدتاً از انواع قفسه‌های خودجریان هستند، انجام می‌شود.

بطور خلاصه گردش فرایند در Pick-to-Light کلاسیک به شرح زیر است:

- سفارشات توسط سیستم مدیریت انبار یا سیستم مدیریت سفارشات شناسایی و ثبت می‌شوند.
- اطلاعات سفارش پردازش شده و جزئیات هر کالا در سفارش، شناسایی می‌شود.
- دستورات مربوط به پردازش هر کالا به نمایشگر LED همان کالا تخصیص داده می‌شوند.
- نمایشگرهای LED مرتبط با اعلام سفارش، به ترتیب توالی پردازشگرها روشن می‌شوند.
- پرسنل پردازشگر به ترتیب، نمایشگرهای روشن را دنبال کرده و تعداد کالای اعلام شده را برداشت می‌کند.
- پس از انتخاب هر کالا، تأیید انتخاب از طریق دکمه مربوطه که بر روی نمایشگر قرارداد انجام می‌شود.
- سیستم اطلاعاتی، تأییدهای پردازشگر را دریافت کرده و از موجودی انبار کسر می‌کند.
- اعلام قرار گرفته در سبدها (یا سایر انواع مازول‌های حمل)، توسط شبکه نقاله، به انتهای فرایند پردازش انتقال می‌یابند.

مزایا:

- سرعت بالا در انتخاب و برداشت کالا، چون پردازشگر فقط با دیدن علائم نوری اقدام به برداشت کالا می‌کند و نیازی به خواندن لیست یا آشنائی با اقلام مورد سفارش ندارد.
- مناسب پردازش سفارشات که دارای تعداد sku متوسط تا زیاد ولی تعداد برداشت از هر sku کم تا متوسط باشند.
- گستردگی قابلیت انطباق با تنوع کالا از لحاظ تعداد sku و گوناگونی ابعادی.
- دقت بالا در عملیات پردازش که به واسطه راهنمایی بصری، احتمال بروز اشتباه پردازشگر در شناسائی و برداشت را به شدت تقلیل می‌دهد. (حدود کمتر از ۰/۰۱٪ خطا).
- سهولت آموزش پردازشگرها و کاربری آسان که نیازی به مهارت خاص یا تسلط به زبان ندارد.
- دستان آزاد^{۳۲} پردازشگرها که می‌توانند همزمان از هر دو دست خود برای جمع‌آوری کالا استفاده کنند. (در مقایسه با بکارگیری لیست کاغذی یا تبلت).
- سازگاری با انواع سیستم‌های WMS/ERP و امکان اتصال به گستره‌ای از سیستم‌های مدیریت انبار برای به‌روزرسانی لحظه‌ای اطلاعات موجودی.
- مناسب برای محیط‌های پرسرعت به ویژه پردازش سفارشات آنلاین در انبارهای دارویی، انبارهای FMCG و ...

معایب:

- انعطاف پذیری کم در تغییر چیدمان انبار.
- لزوم توقف پردازشگران، بدلیل انتظار برای اتمام عملیات پردازشگر قبلی.
- عدم امکان بکارگیری تکنیک‌های برنامه‌ریزی، جهت افزایش ظرفیت و بهره‌وری عملیات.
- هزینه استقرار نسبتاً زیاد، بدلیل نیاز به نصب سخت‌افزارهای مجزا برای هر sku و برقراری اتصال کابلی یا بی‌سیم.
- انعطاف‌پذیری محدود، چون اگر چیدمان انبار مدام تغییر کند، جابجائی نمایشگرها الزامی و دشوار خواهد بود.
- محدود بودن ظرفیت پردازش و خروجی کل سیستم به توالی عملیات پردازشگرها و همچنین سرعت انتقال نقاله.
- مناسب برای محیط‌های خاص، زیرا در انبارهای بزرگ با تراکم پایین یا با مکان‌های متغیر، کارایی کمتری دارد.
- وابستگی به برق یا باتری و در صورت قطعی برق یا خرابی سخت‌افزار، عملکرد سیستم مختل می‌شود.
- مقیاس‌پذیری محدود، زیرا در انبارهایی با هزاران موقعیت قفسه، توسعه سیستم پیچیده و گران است.

۲-۱-۲-۲- Pick-to-Light سیار (Mobile Pick-to-Light)



در این تکنولوژی برخلاف Pick-to-Light کلاسیک، بجای انتقال ماژول حمل کالا توسط نقاله، پرسنل پردازشگر مسئولیت پیمایش راهروهای انبار و جمع‌آوری اقلام مندرج در سفارشات را براساس دستور برداشت اعلام شده بر روی تابلت یا نمایشگر مستقر روی چرخ‌دستی، برعهده دارند و پردازشگران با حرکت به سمت قفسه‌هایی که سیستم به‌صورت پویا محل برداشت را با علائم نوری مشخص می‌کند، اقدام به جمع‌آوری سفارشات می‌کنند. این تکنولوژی از بابت نحوه تعیین اقلام قابل برداشت مشابه Pick-to-Light کلاسیک است ولی بیشتر مناسب محیط‌هایی با تغییرات زیاد در مسیرها و موقعیت کالاها است. مهم‌ترین ویژگی تکنولوژی مذکور، انعطاف‌پذیری در انبارهای بزرگ و مناسب بودن برای انبارهای با چیدمان متغیر است و همچنین مهم‌ترین اشکال آن وابستگی به اتصالات بی‌سیم، الزام رعایت توالی پردازش‌ها و پیمایش زیاد پرسنل می‌باشد.

۲-۱-۲-۲- Scanner و Pick-to-Light

در این تکنولوژی، بجای نمایشگر LED، از اسکنر بارکد یا RFID مستقر روی قفسه‌ها استفاده می‌شود و خوانش تعداد اقلام کاندید برداشت نیز پس از اسکن هر بارکد و از روی نمایشگر اسکنر بارکد صورت می‌پذیرد.

۲-۱-۲-۲- Pick-to-Light رباتیک (Robotic Pick-to-Light)

در این تکنولوژی با هدف افزایش بهره‌وری عملیات از طریق ارتقاء اتوماسیون، ضمن ترکیب تکنولوژی Pick-to-Light با ربات‌های خودران (AGV یا AMR)، شرائط کاهش نیاز به نیروی انسانی و افزایش دقت عملیات پردازش فراهم گردیده است که البته بدلیل بکارگیری گسترده روبات‌ها، دارای هزینه راه‌اندازی بالائی نیز خواهد بود.

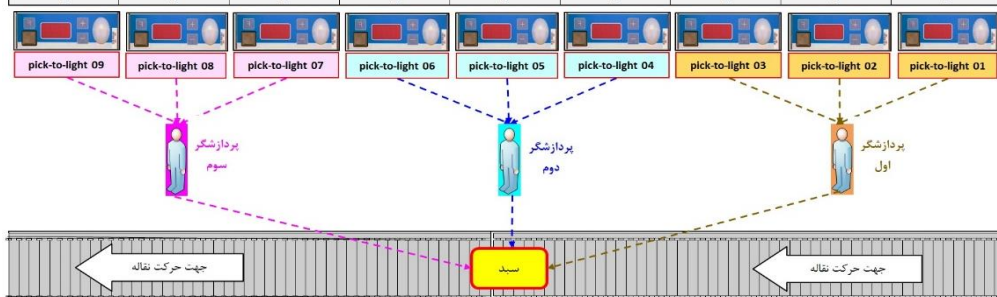
۲-۳- مطالعه کمی تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک

براساس شناختی که از ساختار و نحوه عملکرد تکنولوژی Pick-to-Light حاصل شد، در ادامه قصد داریم از طریق یک مثال عددی، به بررسی منطق عملکرد تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک و برآورد ظرفیت پردازش قابل حصول از آن به پردازیم. در این راستا، خلاصه صورت مسئله و قواعد مستتر در آن به شرح زیر می باشد:

۱. در این مسئله، عملیات پردازش برای آماده سازی ۹ سفارش مدنظر است که هر سفارش نیز دارای ۹ سطر می باشد. (هر سطر سفارش معادل یک نوع sku است)، همچنین ساختار سالن پردازش بگونه ای است که عملیات پردازش باید به ترتیب از سفارش ۰۱ الی سفارش ۰۹ انجام شوند و ترتیب برداشت کالاهای یک سفارش نیز بایستی رعایت گردد. ۲. برای هر sku یک Pick-to-Light اختصاص یافته (از Pick-to-Light شماره ۰۱ الی ۰۹) و هر کالا الزاماً در یک Pick-to-Light قرار دارد و از طریق مکان اختصاصی مذکور برداشته می شود، ضمناً Pick-to-Light ها بصورت خطی مستقر هستند و دارای توالی ۰۱ الی ۰۹ می باشند.

۳. در این مسئله از ۳ پردازشگر به عنوان منابع مسئله استفاده شده که همگی دارای توان و تخصص یکسان هستند ضمناً هر پردازشگر فقط به ۳ sku موجود در ناحیه (Zone) اختصاص یافته به خود، دسترسی دارد که به عنوان ناحیه عملیاتی ایشان تلقی می گردد. تعداد و زمان پردازش کل، به تفکیک sku و ناحیه عملیات هر پردازشگر در نمودار ۰۱ درج شده است و به منظور تسهیل در تحلیل نتایج، تعداد برداشت و زمان برداشت sku ها ثابت و مشابه می باشند. ۴. هر سبد عبوری از روی نقاله، معادل یک سفارش بوده و sku های هر سفارش باید به سبد همان سفارش انتقال یابند. ۵. رعایت منطق پلکانی در عملیات پردازشگرها الزامی است و هر پلکان به یک پردازشگر تخصیص یافته و اندازه هر پله در مسئله مورد مطالعه معادل ۳ sku در نظر لحاظ شده است.

Zone 3			Zon 2			Zone 1			
SKU 09	SKU 08	SKU 07	SKU 06	SKU 05	SKU 04	SKU 03	SKU 02	SKU 01	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد اول
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش کل، برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد دوم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد سوم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد چهارم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد پنجم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد ششم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد هفتم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد هشتم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه
4	4	4	4	4	4	4	4	4	تعداد برداشت از هر sku در عبور سبد نهم
2	2	2	2	2	2	2	2	2	زمان پردازش برحسب دقیقه



نمودار ۰۱ - دیاگرام تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک به همراه لیست تعداد و زمان پردازش کل، به تفکیک sku و ناحیه عملیات هر پردازشگر

باعنایت به توضیحات فوق، در ادامه اقدام به ترسیم نمودار زمانبندی عملیات در تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک نموده ایم. در این مسئله، گام های زمانی پردازش هر sku معادل ۲ دقیقه لحاظ شده و باتوجه به الزام رعایت الگوی پلکانی در عملیات پردازش و مطابق نمودار ۰۲، تکمیل کل ۹ سفارش، به زمان کل پردازشی^{۳۴} معادل ۶۶ دقیقه نیاز خواهد داشت.

مطابق برآورد انجام شده، پردازشگر ۲ در پله اول و پردازشگر ۳ در پله اول و دوم، واقع در سفارش ۱، امکان انجام پردازش را ندارد و همچنین پردازشگر ۱ از پله دهم و پردازشگر ۲ از پله یازدهم فاقد کار قابل تخصیص خواهند بود.

به علت اینکه تعداد sku در کلیه پله‌ها یکسان در نظر گرفته شده‌اند لذا زمان انتظار اجباری پردازشگرها و در نتیجه کاهش بهره‌وری منبع مذکور، اجتناب‌ناپذیر است که با لحاظ نمودن بازه زمانی کل پردازش، متوسط مدت هر سفارش به ۱۸ دقیقه بالغ می‌گردد و همین‌طور نسبت تجمعی زمان در دسترس (مجموع زمان عملیات و زمان انتظار) به تجمعی زمان کارکرد مفید در طی پردازش کل سفارشات نیز به ۴۲٪ می‌رسد. در تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک، مدیریت منابع از رویه تخصیص خطی (ثابت) و الگوی پردازش ترتیبی پلکانی که نسبت به تغییرات، از واکنش ضعیفی برخوردار است، تبعیت می‌کند.

[illegible]

نمودار ۰۲ - زمانبندی عملیات در تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک

با استناد به توضیحات فوق، بنظر می‌رسد جنبه قابل بهبود در تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک، برنامه‌پذیر نمودن و پیاده‌سازی رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی زمانبندی عملیات مذکور خواهد بود که می‌تواند ضمن بهبود تخصیص منابع محدود مسئله، توزیع صحیح‌تر بار کاری، در بازه‌های زمانی را نیز محقق نماید.

۳- معرفی تکنولوژی راهبری نوری مبتنی بر برداشت موجی (Wave Pick-to-Light = WPtL)

در بخش‌های پیشین، به بررسی تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک و شناخت نقاط قوت و ضعف آن پرداخته شد، همچنین با استراتژی‌های پردازش مبتنی بر پیمایش پردازشگر نیز آشنا شدیم. نتایج بررسی کمی Pick-to-Light کلاسیک نشان داد که به واسطه عدم امکان برنامه‌ریزی زمانبندی و توالی عملیات در تکنولوژی مذکور و همچنین الزام رعایت پلکان‌های با تعداد sku یکسان، از انعطاف‌پذیری و بهره‌وری بالایی برخوردار نیست و لذا بنظر می‌رسد افزودن قابلیت برنامه‌پذیری، از طریق ترکیب با یکی از استراتژی‌های پردازش، امکان ارتقاء ظرفیت‌های تکنولوژی مذکور فراهم گردد، لذا در ادامه این مقاله، ضمن ارائه رویکردی نوآورانه در حوزه تکنولوژی‌های پردازش مبتنی بر پیمایش پردازشگر، تحت عنوان "**Wave Pick-to-Light = WPTL**" و با معادل فارسی "**راهبری نوری مبتنی بر برداشت موجی**"^{۳۵}، به مدلسازی ریاضی و تحلیل ظرفیت‌های مدل پیشنهادی پرداخته شده است.

۳۵ نگارنده این مقاله، واژه‌های فارسی "راهبری نوری مبتنی بر برداشت موجی" و "پیک-تو-لایت موجی" را با معادل انگلیسی "Wave Pick-to-Light" و مخفف "WpTL"، برای واژه‌گزینی در حوزه ادبیات لجستیک، پیشنهاد می‌دهد.

استراتژی Wave Picking یکی از مناسب‌ترین استراتژی‌های پردازش در تعامل با تکنیک‌های مدلسازی و زمانبندی است که قابلیت تولید برنامه برای موج‌های متوالی و ایجاد تنوع در تعیین اندازه پلکان (تعداد sku) و در نتیجه بهینه‌سازی ظرفیت پردازش (بیشینه‌سازی) و بهینه‌سازی زمان پردازش سفارشات (کمینه‌سازی) را دارا می‌باشد و براین‌مبنا در ادامه به مدلسازی ریاضی تکنولوژی WpTL و تحلیل نتایج آن می‌پردازیم. لازم به ذکر است در راهکار پیشنهادی، نیازی به نقاله برای انتقال اقلام پردازش شده و در نتیجه محدودیت‌های کالای در جریان (به‌واسطه محدودیت ظرفیت و سرعت نقاله) نیست و تجمیع اقلام و انتقال به بیرون از سالن پردازش، توسط چرخ‌دستی^{۳۶} ساده یا چرخ‌دستی دارای کشنده برقی، خواهد بود، همچنین به‌علت قابلیت پردازش نسبتاً حجیم در این تکنولوژی، جایگزینی قفسه‌های خودجریان پالتی بجای قفسه‌های خودجریان کارتنی محتمل است.

۳-۱- مدلسازی ریاضی تکنولوژی WpTL

مدل WpTL، به‌واسطه قابلیت‌هایی که برای آن متصویم، دارای ویژگی‌ها و الزاماتی خواهد بود که به اختصار در قالب مسئله عددی ذیل بیان شده. لازم بذکر است با هدف ایجاد امکان مقایسه نتایج مدل WpTL با نتایج مدل کلاسیک، ساختار عددی مدل قبلی در مدل جدید نیز حفظ شده است:

۱. قصد داریم تعداد ۹ سفارش را که هریک دارای ۹ سطر سفارش (sku) می‌باشند، توسط تکنولوژی WpTL پردازش کنیم. در این مسئله هر یک از Pick-to-Lightها الزاماً به یک sku (کالا) تخصیص یافته‌اند که باتوجه به لحاظ نمودن ۹ sku در مسئله، تعداد ۹ Pick-to-Light اختصاصی خواهیم داشت.
۲. تعداد برداشت از هر sku معادل ۴ آیتم است و جمع زمان پردازش چهار آیتم بصورت پیش‌فرض، ۲ دقیقه می‌باشد.
۳. پردازشگرها به‌عنوان منبع محدود و با ظرفیت عملیاتی مشابه و یکسان، در نظر گرفته می‌شوند.
۴. در این مسئله، ۳ موج پردازش داریم که به توالی صعودی از موج ۱ تا موج ۳ انجام خواهند شد و سفارشات متعلق به هر موج نیز از پیش مشخص و معادل ۳ در نظر گرفته شده است.
۵. دسترسی و تخصیص هر پردازشگر به حداکثر به ۵ sku مجاز است.
۶. Pick-to-Lightها به‌صورت خطی شماره‌گذاری شده‌اند و رعایت توالی و همجواری skuها در عملیات تخصیص و پردازش، ضروری است، همچنین توالی پردازش کالاهای هر سفارش باید به ترتیب از کالای ۰۱ تا کالای ۰۹ باشد.
۷. در این مسئله عملیات پردازش باید براساس منطق ترتیبی دارای پلکان متغیر و موج‌های موازی (بجای پلکان ثابت در مدل کلاسیک) انجام شود با این توضیح که اندازه پلکان تخصیصی به پردازشگرها، ثابت و از قبل تعیین شده نخواهد بود، به عنوان مثال اگر پردازشگر اول، پردازش کالای ۰۱ از سفارش ۱ در پیود زمانی اول را انجام دهد، در پیود زمانی دوم می‌تواند به پردازش کالای ۰۲ از سفارش ۱ بپردازد و یا نسبت به پردازش کالای ۰۱ از سفارش ۲ اقدام نماید ولی در هر صورت، پردازشگر دوم تا اتمام عملیات پردازشگر اول در پیود زمانی قبلی، در صف انتظار خواهد ماند.
۸. هدف از مدلسازی WpTL، کمینه شدن زمان کل پردازش و بیشینه سازی بکارگیری منابع مدل است.
۹. در این مسئله، متغیرهای تصمیم تعیین می‌کنند که هر پردازشگر چه کالاهایی را در چه موجی پردازش می‌کند و زمان شروع هر پردازش چه موقع است.
۱۰. در مدل WpTL، هدف کمینه‌سازی زمان کل پردازش و بیشینه‌سازی استفاده از پردازشگرها می‌باشد.
۱۱. محدودیت‌های مسئله شامل تخصیص یکتای هر sku به یک Pick-to-Light معین، رعایت همجواری تخصیص Pick-to-Lightها به پردازشگرها، محدودیت تعداد Pick-to-Light، ترتیب صعودی پردازش کالاها و زمان‌بندی طبق موج‌ها است.

تذکر: جهت ایجاد سهولت در انجام محاسبات و تحلیل نتایج، تعداد skuها، تعداد اقلام مندرج در سطر سفارش، زمان پردازش و تعداد موج‌های پردازش، کوچک و ثابت لحاظ شده‌اند که به مسائل بزرگتر نیز قابل تعمیم خواهد بود.

پارامترها و اندیس‌های مدل :

نماد	شرح نماد
P	مجموعه پردازشگرها $P \in \{1, 2, \dots, P\}$
K	مجموعه کالاها $K \in \{1, 2, \dots, K\}$
W	مجموعه موج‌ها $W \in \{1, 2, \dots, W\}$
O	مجموعه سفارشات $O \in \{1, 2, \dots, O\}$

متغیرهای تصمیم :

متغیر تصمیم تعیین می‌کند، هر پردازشگر چه کالاهایی را در چه موجی پردازش کند و زمان شروع هر پردازش چه موقع است.

- $x_{p,k,w}$: اگر پردازشگر p کالای k را در موج w پردازش کند، برابر یک است و درغیراینصورت صفر.
- $s_{p,k,w}$: زمان شروع پردازش کالای k توسط پردازشگر p در موج w.
- C_{max} : زمان کل پردازش (Makespan).

توابع هدف (OBJ) :

تابع هدف اول : کمینه‌سازی زمان کل پردازش

$$\text{Min } C_{max}$$

تابع هدف دوم : بیشینه‌سازی بکارگیری پردازشگرها

$$\text{Max } \sum_{p,k,w} x_{p,k,w}$$

یادآوری: در صورت نیاز به تعیین ضریب وزنی^{۳۷} توابع هدف، از طریق تکنیک‌هایی از جمله بردار ویژه^{۳۸} قابل انجام خواهد بود.

محدودیت‌ها (Subject-to) :

محدودیت اول: هر کالا در هر سفارش فقط توسط یک پردازشگر، پردازش شود.

$$\sum_p x_{p,k,w} = 1 \quad \forall k, w$$

محدودیت دوم : پردازشگرها فقط می‌توانند Pick-to-Light های مجاور را پردازش کنند.

$$x_{p,k,w} \leq x_{p,k-1,w} \quad \forall p, k > 1, w$$

محدودیت سوم : هر پردازشگر، حداکثر به پنج Pick-to-Light دسترسی دارد.

$$\sum_k x_{p,k,w} \leq 5 \quad \forall p, w$$

محدودیت چهارم : زمان شروع پردازش هر کالا الزاماً پس از اتمام پردازش کالای قبلی در همان سفارش است.

$$s_{p,K,W} \geq s_{p,K-1,W} + 2 \quad \forall p, K > 1, w$$

محدودیت پنجم : محدودیت زمان کل پردازش سفارش.

$$C_{max} \geq s_{p,k,w} + 2 \quad \forall p, k, w$$

محدودیت ششم : پردازشگرها پس از اتمام موج قبلی می‌توانند برای پردازش موج بعدی اقدام کنند.

$$s_{p,K,W+1} \geq s_{p,K',W} + 2 \quad \forall p, K, W < 3, K'$$

37 Weighting

38 Eigenvector

۳-۲- تکنیک حل مدل WPTL

در شرایط واقعی، مدل ریاضی WPTL از پیچیدگی ناشی از تعدد و تضاد محدودیت‌ها و همچنین ویژگی چند هدفه^{۳۹} بودن برخوردار است، لذا به منظور تسهیل فرایند حل مدل ریاضی و مقابله با بروز تبهگنی^{۴۰}، از تکنیک Genetic Algorithms به عنوان یکی از پرکاربردترین تکنیک‌های Metaheuristic، استفاده نموده‌ایم. ذیلاً نمونه‌ای از رایج‌ترین تکنیک‌های Metaheuristic لیست شده است.

نام الگوریتم	نوع الهام‌گیری	مکانیسم اصلی	نمونه‌های کاربردی
الگوریتم ژنتیک (GA)	تکامل طبیعی	انتخاب، جهش، ترکیب، جمعیت محور	فروشنده دوره‌گرد (TSP) یا LRP، مدل‌های ریاضی گسسته و پیوسته
بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)	رفتار جمعی پرندگان	به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات، تعقیب بهترین موقعیت فردی و جهانی	آموزش شبکه‌های عصبی، کنترل ربات
جستجوی ممنوعه (TS)	حافظه انسانی	لیست ممنوعه برای جلوگیری از تکرار، جستجوی محلی هوشمند	برنامه ریزی تولید، مسیریابی وانت‌ها
تبرید شبیه‌سازی شده (SA)	فرآیند تبرید فلزات	پذیرش جواب‌های بد با احتمال کاهش دمای سیستم	طراحی مدار الکترونیکی، بهینه‌سازی توابع پیچیده و غیرخطی
الگوریتم کلونی مورچگان (ACO)	رفتار مورچگان در یافتن مسیر	احتمال انتخاب مسیر بر اساس غلظت فرومون	مسئله TSP، مسئله مسیریابی شبکه
الگوریتم رقابت استعماری (ICA)	رقابت استعمارگران و مستعمرات	امپریالیست‌ها در جذب مستعمرات	بهینه‌سازی سیستم‌های اقتصادی، بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری
الگوریتم اکسترم (EO)	بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده	شناسایی و به‌روزرسانی بدترین اجزای جواب	بهینه‌سازی توزیع بار، دسته‌بندی داده‌ها و خوشه بندی

جدول ۳ - معرفی نمونه‌ای از الگوریتم‌های Metaheuristic

الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی Genetic Algorithms، با استفاده از اصول ژنتیک و تکامل طبیعی، در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی ریاضی به کار می‌رود و از مفاهیمی از جمله انتخاب طبیعی، جهش و وراثت در جستجوی جواب‌های بهینه بهره می‌برد. تکنیک مذکور در جستجوی پاسخ مسائل ریاضی، بجای کار روی یک جواب، روی مجموعه‌ای از جواب‌ها (جمعیت اولیه^{۴۱}) تمرکز می‌کند و این ویژگی سبب می‌گردد که الگوریتم به نقاط متعددی از فضای سه بعدی پاسخ‌های ممکن دسترسی داشته باشد و در نتیجه از دام بهینه‌های محلی^{۴۲} عبور کند. Genetic Algorithms برخلاف تکنیک‌های سنتی ریاضی، به محاسبه مشتق توابع هدف، در حل معادلات ریاضی نیاز ندارد و همچنین برای مسائل گسسته یا پیوسته و همینطور برای مسائل غیرخطی^{۴۳} و مدل‌های با ساختار چندهدفه^{۴۴}، قابل استفاده است. در این تکنیک، جواب مسئله^{۴۵} در قالب یک کروموزوم نمایش داده می‌شود و روش‌های متداول برای کدگذاری کروموزوم‌ها شامل روش دودویی^{۴۶} برای مسائل گسسته، روش حقیقی^{۴۷} برای مسائل پیوسته

39 Multi Objective

۴۰ تبهگن یا Degenerate، به شرایط خاصی گفته می‌شود که ساختار مدل ریاضی دچار فروپاشی یا ساده‌سازی نامتعارف شود و می‌تواند در غالب گرفتار شدن در حلقه بی‌نهایت یا کند شدن الگوریتم و یا ابهام در انتخاب متغیرها تجلی یابد.

41 Population-Based

42 Local Optima

43 Non-liner

44 Multi-Objective

45 Encoding

46 Binary : [1-0-1-1]

47 Real-Valued : [3.2-5.1-0.7]

و روش پرموتاسیون^{۴۸} برای مسائل ترتیبی است. یادآور می‌شود در مسئله WptL، کروموزوم معادل یک ماتریس سه بعدی است که نشان می‌دهد، هر پردازشگر، چه کالاهایی را در چه موجی پردازش می‌کند. در تکنیک مذکور، ایجاد جمعیت اولیه با تخصیص تصادفی پردازشگرها به Pick-to-Light های مجاور، مقدار دهی می‌شود، همچنین تابع برازش، در قالب ترکیبی از $Cmax$ و استفاده از پردازشگرها با وزن دهی مناسب تشکیل می‌گردد. اصولاً Genetic Algorithms، به واسطه چهار عملگر ذیل، از قابلیت بالایی در کاوش و جستجوی کارای فضای جواب بهره‌مند است:

- عملگر انتخاب^{۴۹}، شامل روش چرخ رولت^{۵۰} برای انتخاب با احتمال متناسب با برازش، روش تورنمنت^{۵۱} برای رقابت بین چند جواب تصادفی و روش رتبه‌ای^{۵۲} برای انتخاب براساس رتبه و نه مقدار دقیق برازش، در گزینش بهترین نسل بعد.
 - عملگر تقاطع^{۵۳} برای ترکیب ژن‌های والدین در ایجاد نسل بعد، شامل روش تقاطع تک نقطه‌ای^{۵۴} برای تقسیم کروموزوم از یک نقطه، تقاطع دو نقطه‌ای^{۵۵} برای ترکیب با دو نقطه شکست و تقاطع یکنواخت^{۵۶} برای انتخاب تصادفی ژن‌ها از والدین.
 - عملگر جهش^{۵۷} در ایجاد تغییرات تصادفی، به منظور حفظ تنوع ژنتیکی در نسل‌های بعد که شامل روش‌های معکوس کردن برای تغییر 0 به 1 و بالعکس^{۵۸} و روش جابجایی^{۵۹} برای تعویض جای دو ژن و روش اضافه/حذف^{۶۰} یک ژن است.
- توقف اجرای الگوریتم نیز پس از همگرایی نتایج، خواهد بود. شرط توقف^{۶۱} الگوریتم می‌تواند جستجوی جواب به شکل تعداد معینی از نسل‌ها (طی شدن تعداد نسل معین) یا دستیابی به جواب قابل قبول، براساس معیارهای پیش‌فرض (بروز همگرایی نتایج) و یا مشاهده عدم بهبود در چند نسل متوالی باشد.

۳-۳- تحلیل نتایج حل مدل WptL و مقایسه با نتایج مدل Pick-to-Light کلاسیک

مدل ریاضی WptL، پس از تزریق اعداد و حل به کمک Genetic Algorithms، منجر به نتایج کمی گردیده که در ادامه با هدف تعیین کارایی مدل، مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۰۴ شامل خلاصه نتایج حل مدل ریاضی می‌باشد و نشان دهنده زمان کل پردازش معادل ۵۰ دقیقه است که نسبت به ۶۶ دقیقه زمان کل پردازش در تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک، کاهشی بیش از ۲۴٪ را نشان می‌دهد و نسبت تجمعی زمان در دسترس (مجموع زمان عملیات و زمان انتظار) به تجمعی زمان کارکرد مفید در طی پردازش کل سفارشات نیز به ۵۲٪ می‌رسد.

شاخص	مقدار	توضیحات
زمان کل پردازش (Makespan)	۵۰ دقیقه	از شروع موج ۱ تا پایان پردازش موج ۳
کل تعداد پردازش	۸۱	۹ سفارش $\times$ نوع sku
میانگین زمان پردازش هر سفارش	۵/۵ دقیقه	۹ سفارش / ۵۰ دقیقه
توزیع بار پردازش	P1:44.4% - P2:33.3% - P3:22.2%	سهام هر پردازشگر از کل پردازش

جدول ۰۴ - خلاصه نتایج مدل ریاضی WptL

مثلاً [2-1-4-3]: 48 Permutation

49 Selection

50 Roulette Wheel

51 Tournament

52 Rank-Based

53 Crossover

54 Single-Point

55 Two-Point

56 Uniform

57 Mutation

58 Bit Flip

59 Swap

60 Insert/Delete

61 Termination

در بررسی وضعیت موج‌ها (جدول ۰۵) به عنوان یک عامل اثرگذار در کارائی مدل، در تمامی موج‌ها، تعداد ۲۷ سفارش مربوط به هر موج پردازش شده و برای موج شماره یک ۲۶ دقیقه، موج شماره دو، ۲۲ دقیقه و موج شماره سه، ۲۶ دقیقه زمان صرف شده. لذا بکارگیری منطق موجی سبب تحقق کارائی بالاتر از طریق همپوشانی بهینه و کاهش منابع آزاد گردیده است.

شماره موج	بازه زمانی	شماره سفارشات پردازش شده	تعداد سفارش پردازش شده	درصد استفاده پردازشگرها
۱	۲۶ دقیقه	۳-۱	۲۷ کالا	P1:48.1% - P2:33.3% - P3:18.5%
۲	۲۲ دقیقه	۶-۴	۲۷ کالا	P1:44.4% - P2:33.3% - P3:22.2%
۳	۲۶ دقیقه	۹-۷	۲۷ کالا	P1:44.4% - P2:33.3% - P3:22.2%

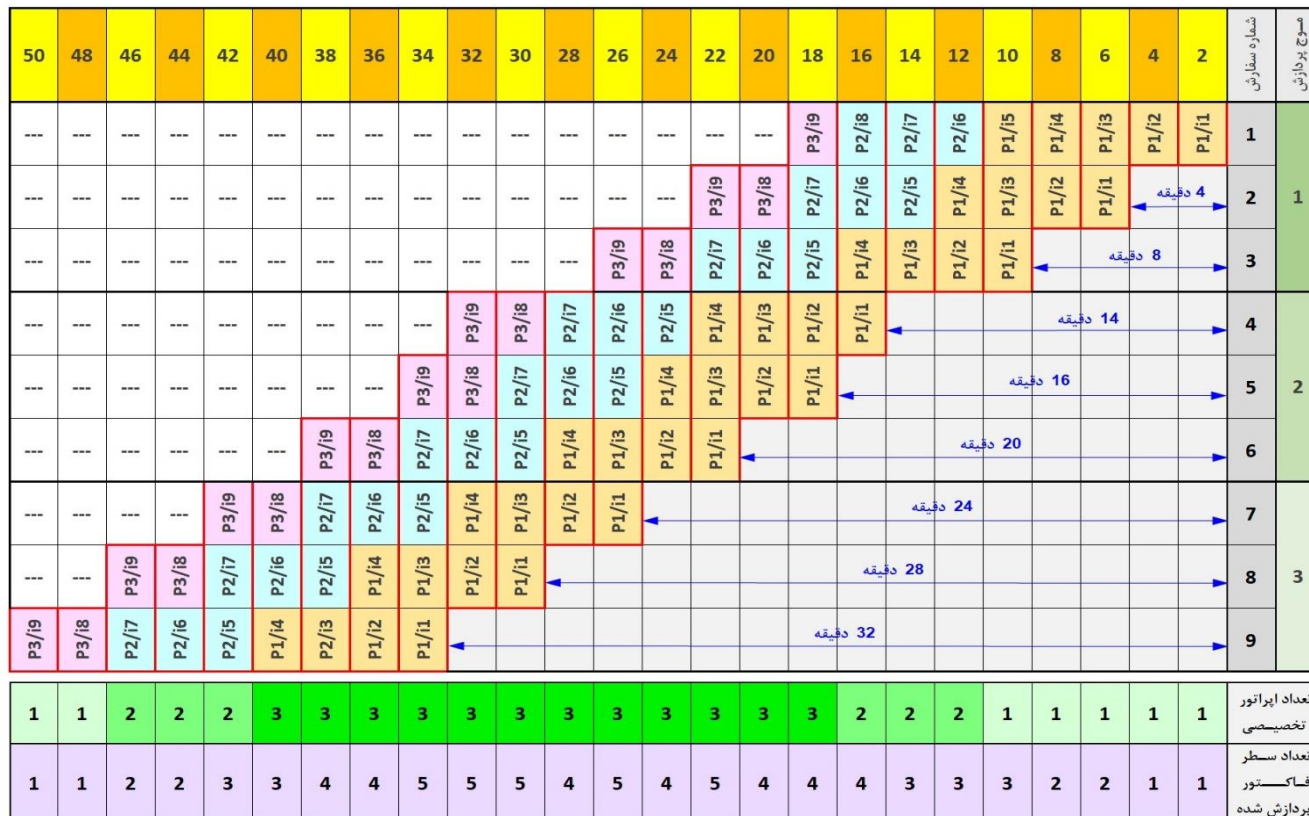
جدول ۰۵- تحلیل موج‌ها

مطابق مندرجات جدول ۰۶، به واسطه بهبود بهره‌گیری از کار موازی پردازشگرها در موج‌های متوالی، زمان در دسترس برای عملیات پردازش، از پردازشگر اول به سمت پردازشگر سوم تا حدود ۵۴٪ کاهش یافته است که نشان‌دهنده تخصیص بهینه کار به پردازشگرها و آزادسازی بخشی از زمان قابل تخصیص به پردازشگر دوم و سپس پردازشگر سوم می‌باشد.

پردازشگر	کل زمان کارکرد مفید (دقیقه)	کل زمان بیکاری (دقیقه)	کل زمان در دسترس (دقیقه)
P1	۷۴ دقیقه ↓	۰ دقیقه	۷۴ ↓
P2	۵۴ دقیقه ↓	۱۰ دقیقه	۵۴ ↓
P3	۳۴ دقیقه ↓	۱۶ دقیقه	۵۰ ↓

جدول ۰۶- نحوه توزیع زمان در دسترس بین پردازشگرها

یکی از مهم‌ترین نتایج مدل ریاضی WptL، در قالب گانت زمانبندی عملیات پردازش سفارشات در موج‌های سه‌گانه (نمودار ۰۳) است که مبنای ابلاغ دستورکار پردازشگرها از طریق اطلاع‌رسانی نرم‌افزاری و رادیویی خواهد بود.



نمودار ۰۳ - گانت زمانبندی عملیات پردازش سفارشات

همانگونه که در گانت زمانبندی عملیات پردازش مشاهده می‌شود، در روش WpTL، امکان آغاز پردازش همزمان بیش از یک سفارش (برخلاف روش Pick-to-Light کلاسیک)، حتی در دو موج مجاور نیز وجود دارد، لذا پرسنل پردازشگر با هر بار مراجعه، مجاز به جمع‌آوری skuهای تخصیص یافته به خود، براساس دستورکار مربوطه خواهند بود که این رویه سبب کمینه‌سازی کل زمان پردازش سفارشات (Makespan) در انتهای عملیات موج‌های پردازش می‌شود. ساختار زمانبندی مذکور به گونه‌ای است که ضمن پردازش کلیه سفارشات هر موج که در این مقاله معادل ۲۷ در نظر گرفته شده، حداکثر بکارگیری پردازشگران را به نحوی فراهم می‌سازد که پردازشگر اول، ۴۵٫۷٪ از زمان در دسترس را به خود اختصاص داده و پردازشگران بعدی، با روند نزولی و با هدف آزاد کردن منبع پردازشگر برای تخصیص به موج‌های جدیدتر (موج‌های جدید بعد از موج سوم) برنامه‌ریزی شده‌اند. (جدول ۰۷)

پردازشگر	تعداد سطر فاکتور پردازش شده	زمان فعال (دقیقه)	درصد زمان فعالیت از کل زمان کارکرد مفید (دقیقه)
P1	۳۷	۷۴	۴۵٫۷ درصد ↓
P2	۲۷	۵۴	۳۳٫۴ درصد ↓
P3	۱۷	۳۴	۲۰٫۹ درصد ↓

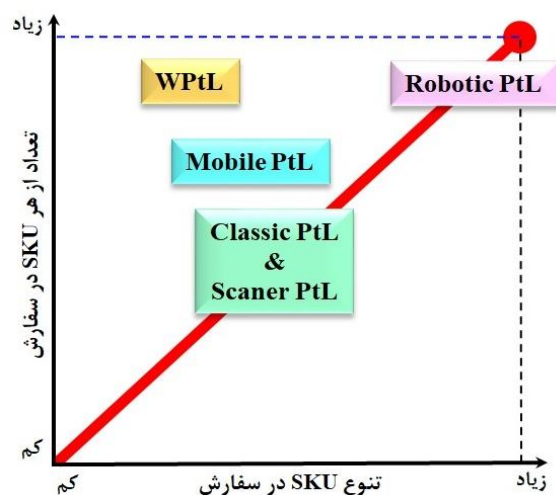
جدول ۰۷ - زمانبندی پردازشگرها

در جدول ۰۸، به مقایسه روش‌های پردازش WpTL با روش Pick-to-Light کلاسیک، از منظر شاخص‌های کمی و عملکردی هر کدام پرداخته شده است که در اغلب موارد بیانگر برتری روش WpTL در جمع‌آوری سفارشات است که دارای ویژگی تعداد sku متوسط و تعداد برداشت زیاد از هر sku است.

معیار مقایسه	Pick-to-Light کلاسیک	WpTL	مزیت یا ضعف
زمان کل پردازش سفارشات	۶۶ دقیقه	۵۰ دقیقه	کاهش ۲۴٪ در WpTL
میانگین زمان پردازش هر سطر سفارش	۲ دقیقه	۱،۰۹ دقیقه	کاهش حدود ۵۰٪ در WpTL
مدیریت منابع	ثابت (خطی)	پویا (موجی)	انعطاف‌پذیری بالاتر در WpTL
کل زمان انتظار پردازشگرها	۲۱۶ دقیقه	۱۴۶ دقیقه	۳۲٪ کاهش زمان انتظار در WpTL
الگوی پردازش	پلکان ثابت	ترتیبی با پلکان متغیر و موج‌های موازی	کاهش زمان انتظار پردازشگرها در WpTL
پیچیدگی اجرا	ساده	متوسط	نیاز به برنامه‌ریزی دقیق‌تر در WpTL
تعداد پردازش کالاها	۱۰۰٪	۱۰۰٪	یکسان
سازگاری با نوسانات	ضعیف	قوی	-
نیاز به مدلسازی ریاضی	ندارد	زیاد	-

جدول ۰۸ - مقایسه تکنولوژی‌های Pick-to-Light سنتی و WpTL

به استناد نتایج فوق می‌توان استنباط نمود که روش پردازش WpTL، با تکیه بر تامین انعطاف در برنامه‌ریزی عملیات و نتیجتاً کاهش زمان‌های پردازش که به واسطه بهبود عملکرد در موج‌ها حاصل گردیده و همچنین انعطاف‌پذیری در تطبیق با تغییرات ناشی از بهره‌گیری بهینه از منابع (پردازشگر)، از کارایی قابل توجهی نسبت به روش کلاسیک و مبتنی بر منطق پلکان ثابت، برخوردار است. اصولاً یکی از شروط موفقیت در طراحی و ایجاد فرایندهای پردازش، انتخاب و استقرار تکنولوژی و استراتژی‌های صحیح و متناسب با نیازمندی‌های فرایند موردنظر می‌باشد و براین مبنا، باتوجه به وجود پنج‌گونه از تکنولوژی‌های خانواده Pick-to-Light، به نظر نگارنده، براساس دو شاخص تصمیم‌ساز اصلی، یعنی شاخص تنوع sku در سفارش و شاخص تعداد از هر sku در سفارش، جایگاه مناسب بکارگیری انواع Pick-to-Light (PTL) مطابق نمودار ۰۴ و جدول ۰۹ می‌باشد.



نمودار ۰۴ - محدوده کاربری انواع Pick-to-Light

انواع Pick-to-Light	تنوع SKU در سفارش	تعداد از هر sku در سفارش
Classic Pick-to-Light	متوسط	متوسط
Pick-to-Ligh & Scanner	متوسط	متوسط
Mobile Pick-to-Light	متوسط به بالا	متوسط به بالا
Robotic Pick-to-Light	زیاد	زیاد
Wave Pick-to-Light (WPtL)	کم تا متوسط	زیاد

جدول ۰۹ - محدوده کاربری انواع Pick-to-Ligh

۴- پیشنهاد بهبود برای مطالعات آتی پیرامون مدل ریاضی WPtL

اصولاً در پروژه‌های مدل‌سازی ریاضی، ایجاد مدل پایه که بر مبنای شناخت کمی سیستم مورد مطالعه تدوین می‌گردد به‌عنوان فتح‌بایی برای پژوهش‌های تکمیلی و با هدف حصول کارآئی فراتر بکار گرفته می‌شود، بر همین مینا، سایر رویکردهائی که علاوه بر منطق موجی در ارتقائ تکنولوژی Pick-to-Ligh، به‌عنوان پیشنهاد مطالعات آتی قابل پیاده‌سازی است، به‌شرح زیر می‌باشند:

۱. بهینه‌یابی تعداد موج‌ها.
۲. بهینه‌یابی تعداد سفارشات تخصیص یافته به هر موج (چه تعداد سفارش در یک موج قرار بگیرد).
۳. بهینه‌یابی تعداد sku قابل تخصیص به هر پردازشگر.
۴. متعادل‌سازی بار توزیعی بین پردازشگرها.
۵. استفاده از روش‌های یادگیری ماشین^{۶۲} برای پیش‌بینی بار کاری.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش گردید، ضمن معرفی اجمالی استراتژی‌های پردازش مبتنی بر پیمایش پردازشگر و همچنین تشریح تکنولوژی Pick-to-Ligh، به مزایای حاصل از بکارگیری توأمان منطق موجی منتج از استراتژی Wave Picking با تکنولوژی-Pick-to-Ligh از طریق مدل‌سازی ریاضی چندهدفه پرداخته شود و باعنایت به مقایسه خروجی‌های کمی مدل ریاضی WPtL و مقایسه آن با ظرفیت‌های روش کلاسیک، مشخص شد که لحاظ نمودن موج‌های متوالی، موجب کمینه‌سازی زمان کل پردازش و بهبود شاخص‌های عملیاتی تکنولوژی Pick-to-Ligh، در شرائط "تنوع sku کم تا متوسط" و "تعداد برداشت زیاد از هر sku"، می‌شود.

۶- فهرست منابع

- ۱۱- در تدوین این مقاله از بخش‌هایی از مقاله "مطالعه تطبیقی استراتژی‌های پردازش سفارش در صنعت پخش با تکنولوژی‌های نوآورانه لجستیکی"، تألیف محسن قانون مراجعه شود - مقاله برگزیده ششمین کنفرانس بین‌المللی صنعت پخش - اردیبهشت ۱۴۰۳ - جزیره کیش، بهره گرفته شده است.
- ۲- در تدوین این مقاله از بخش‌هایی از کتاب "کاربرد تکنولوژی‌های نوین در لجستیک انبار با تأکید بر انبارهای اتوماتیک"، تألیف محسن قانون و مهدی خسروانی، انتشارات بانک ملی ایران، بهره گرفته شده است.
- 3- Order Picking Strategy – Kardex Factory.
- 4- A Review of Order Picking Improvement Methods - Johan Oscar Ong, Don Thomas Joseph
- 5-Human Factors in Order Picking System Design: A Content Analysis - Eric H. Grosse, Christoph H. Glock, Grosse, Christoph H. - Giersch Endowed Chair - Ryerson University, Toronto. Canada.
- 6- An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations - Wenrong Lua , Duncan McFarlanea , Vaggelis Giannikasa , Quan Zhangb - aInstitute for Manufacturing, University of Cambridge.
- 7- Improving the Order Picking Efficiency by Optimising the Orders' Sequence - International Journal of Simulation Modelling - March 2019.
- 8- A Review of Order Picking Improvement Methods – Johan Oscar Ong , Don Thomas Joseph – 2014.
- 9- Multi-Objective Routing and Scheduling of Order Pickers in a Warehouse – Balazs Molnar and Gyorgy Lipovszki - Budapest University of Technology and Economics.

۷- پیوست شماره یک

[illegible]

نمودار ۵- مقایسه‌ای زمانبندی پردازش سفارشات در تکنولوژی Pick-to-Light کلاسیک و WpTL