

PackUp

سامانه‌ی پردازش و لجستیک تجارت الکترونیک

بهینه‌سازی تخصیص سفارش با برنامه‌ریزی خطی، مسیریابی ناوگان با الگوریتم ژنتیک، چیدمان سه‌بعدی بار و دستیار تحلیلی مبتنی بر هوش مصنوعی.

پروژه‌ی پایانی | درس برنامه‌نویسی پیشرفته (Advanced Programming)

دانشگاه صنعتی شریف – دانشکده‌ی مهندسی صنایع

دانشگاه

موضوع 2 – سیستم پردازش و لجستیک تجارت الکترونیک (سبک دیجی‌کالا / تیپاکس)

موضوع پروژه

برنامه‌ریزی خطی (LP/MILP) • الگوریتم ژنتیک (GA/VRPTW) • رابط کاربری تعاملی • چت‌بات تحلیلی

ماژول‌های نمره‌دار

Python • FastAPI • PuLP/CBC • NumPy • React • Three.js • Leaflet

پشته‌ی فناوری

معصومه یحویان • شماره‌ی دانشجویی: 401155565

نگارنده

مرداد 1405

تاریخ تدوین

فهرست مطالب

فهرست مطالب

1	مقدمه و صورت مسئله	2
2	معماری سامانه	3
3	ماژول برنامه‌ریزی خطی (LP/MILP) – تخصیص سفارش	4
4	ماژول الگوریتم ژنتیک (GA) – مسیریابی VRPTW	7
5	یکپارچگی مسیر و چیدمان سه‌بعدی بار	9
6	چت‌بات تحلیلی هوشمند	10
7	رابط کاربری و تجربه کاربر	11
	نمایی از برنامه (تصاویر)	12
	کاتالوگ ناوگان سه‌بعدی	13
8	راستی‌آزمایی، آزمون و کیفیت	15
9	جمع‌بندی و کارهای آینده	16
10	مراجع	17

چکیده

PackUp یک سوئیت تصمیم‌گیری لجستیک برای تجارت الکترونیک است که سه مسئله‌ی هسته‌ای زنجیره‌ی تأمین را در یک معماری ماژولار حل می‌کند: (1) **تخصیص بهینه‌ی سفارش** از انبارهای مرکزی به مراکز توزیع با یک مدل **برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط** (حل‌شده با PuLP/CBC) که علاوه بر جواب بهینه، **ارزش‌های سایه‌ای** و تحلیل حساسیت را نیز محاسبه می‌کند؛ (2) **مسیریابی ناوگان با پنجره‌ی زمانی** (VRPTW) با یک **الگوریتم ژنتیک خودنوشته**؛ و (3) **چیدمان سه‌بعدی بار** با قید تخلیه‌ی چندمقصدی. یک **چت‌بات تحلیلی** نتایج را به زبان طبیعی تفسیر می‌کند و سناریوهای «چه‌می‌شد-اگر» را زنده اجرا می‌کند.

1 مقدمه و صورت مسئله

در تجارت الکترونیک، هزینه و کیفیت خدمت تا حد زیادی در «لجستیک» تعیین می‌شود: کالا باید از انبارهای مرکزی به مراکز توزیع برسد، سپس با ناوگانی محدود و در بازه‌های زمانی توافق‌شده به در منزل مشتری تحویل شود و در هر وانت به‌گونه‌ای چیده شود که در هر توقف بدون جابه‌جایی بقیه قابل تخلیه باشد. این پروژه سه لایه‌ی تصمیم را به‌صورت یکپارچه مدل و حل می‌کند.

تعریف رسمی موضوع (موضوع 2)

مسئله‌ی خطی (LP/MILP)

تخصیص سفارشات از انبارهای مرکزی به مراکز توزیع منطقه‌ای جهت حداقل‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل.

مسئله‌ی NP-Hard (GA)

مسیریابی ناوگان تحویل کالا در منزل با پنجره‌ی زمانی (VRPTW) و ظرفیت محدود وانت‌بارها.

چرا دو پارادایم حل متفاوت؟

مسئله‌ی تخصیص یک برنامه‌ی خطی عدد صحیح مختلط است که با متغیرهای پیوسته‌ی جریان و متغیرهای دودویی فعال‌سازی مسیر مدل می‌شود؛ برای این دسته، حل‌گرهای دقیق (شاخه‌وکران) جواب بهینه‌ی سراسری و اطلاعات دوگان می‌دهند. در مقابل، مسیریابی VRPTW از خانواده‌ی مسائل NP-Hard است؛ فضای جواب فاکتوریل رشد می‌کند و حل دقیق برای 50 مشتری عملی نیست، پس از یک فراابتکار تکاملی استفاده می‌کنیم.

سناریوی نمونه بر پایه‌ی جغرافیای واقعی ایران ساخته شده است: 3 انبار مرکزی (تهران، کرج، قم) و 8 مرکز توزیع برای LP، و 50 مشتری تهران با پنجره‌های زمانی متفاوت برای GA. فاصله‌ها با فرمول Haversine و هزینه‌ها با نرخ‌نامه‌ی مستند محاسبه می‌شوند.

اهداف نمره‌دار و پوشش آن‌ها

بخش ارزیابی	بارم	تحقق آن در PackUp
مدل‌سازی مهندسی صنایع	3	فرمول‌بندی کامل LP و GA در همین گزارش (بخش‌های 3 و 4)
کدنویسی ماژول LP	4	backend/app/lp – مدل FCTP، دوگان، حساسیت، تورنادو
کدنویسی ماژول GA	4	backend/app/ga – تور-غول‌آسا، Split، OX/PMX
رابط کاربری (APP)	3	برنامه‌ی React با نمودار، نقشه و صحنه‌ی سه‌بعدی
چت‌بات هوشمند	6	backend/app/chat – 5 ابزار زنده روی نتایج

2 معماری سامانه

سامانه بر پایه‌ی **برنامه‌نویسی ماژولار** و جداسازی صریح «منطقِ نمره‌دار» از «رابط» طراحی شده است. کلِ ماژول‌های نمره‌دار (LP، GA، چت‌بات) در **پایتون** و در بک‌اند پیاده شده‌اند؛ رابط کاربری یک برنامه‌ی **React** است که تنها از طریق یک API قراردادی با بک‌اند سخن می‌گوید.

رابط کاربری – React
• تخصیص (LP): نقشه، دوگان، تورنادو • مسیریابی (GA): همگرایی، شبیه‌سازی • بارگیری سه‌بعدی (Three.js) • چت‌بات (استریم SSE) • داشبورد، راهنما، i18n دوزبانه • لایه‌ی حافظه‌ی جلسه: خروجی هر ماژول • ورودی ماژول بعد و زمینه‌ی چت می‌شود.
بک‌اند – Python / FastAPI
• ماژول LP – PuLP/CBC: • حل MILP، دوگان، حساسیت • ماژول GA – NumPy (خودنوشته): Split، • OX/PMX، 2-opt، کار پس‌زمینه SSE + • ماژول چت‌بات – google-genai: • فراخوانی خودکار 5 ابزار + تزریق زمینه • اسکیمای Pydantic + • هسته‌ی قطعی (بذر ثابت 1404)

شکل 1 – معماری کلان سامانه: جداسازی منطقِ نمره‌دارِ پایتونی از رابطِ React.

اصول طراحی

- **قطعیت (Determinism):** هیچ تصادفی بدونِ بذر وجود ندارد؛ بذرِ ثابت 1404 هر اجرا و هر آزمونِ رگرسیون را تکرارپذیر می‌کند – پیش‌نیازِ ارزیابی علمی.
- **قراردادِ نوع‌دار:** هر نقطه‌ی پایانیِ API یک اسکیمای Pydantic دارد و هر ماژول با ruff + mypy(strict) + pytest پاک نگه داشته می‌شود.
- **دوزبانگی و RTL از پایه:** کلِ رابطِ راست‌چین/چپ‌چینِ خودکار، واکنش‌گرا و دارک‌مود است و هیچ رشته‌ی سخت‌کدی ندارد.

جریان داده و تصمیم – سه ماژول، یک زنجیره

ارزش سامانه در «اتصال» ماژول‌هاست نه در تک‌تک آن‌ها. شکل زیر نشان می‌دهد داده‌ی سفارش از کجا وارد می‌شود، هر ماژول چه خروجی مشخصی به ماژول بعدی می‌دهد و در انتها چه شاخص تصمیم‌مدیریتی تولید می‌شود. پیکان چین‌دار، حلقه‌ی بازخورد «چه‌می‌شداگر» است.



شکل 2 – جریان داده و تصمیم: از ورودی سفارشات تا شاخص‌های مدیریتی.

خروجی نهایی: شاخص‌های تصمیم‌مدیریتی

زنجیره‌ی بالا در انتها به چهار عددی می‌رسد که مبنای تصمیم‌مدیر عملیات است. این اعداد مشتق مستقیم خروجی حل‌گرایند و داشبورد برنامه نیز دقیقاً همین‌ها را نشان می‌دهد.



شکل 3 – شاخص‌های مدیریتی و ترکیب هزینه برای سناریوی نمونه.

3 ماژول برنامه‌ریزی خطی (LP/MILP) – تخصیص سفارش

این ماژول تعیین می‌کند هر مرکز توزیع، تقاضای خود را از کدام انبار و به چه میزان تأمین کند تا کل هزینه‌ی شبکه کمینه شود. مدل از نوع مسئله‌ی حمل‌ونقل با هزینه‌ی ثابت (Fixed-Charge Transportation Problem) است.

مجموعه‌ها و پارامترها

نماد	تعریف	نماد	تعریف
$i \in I$	انبارهای مرکزی	c_{ij}	هزینه‌ی حمل هر واحد در مسیر (i, j)
$j \in J$	مراکز توزیع	f_{ij}	هزینه‌ی ثابت فعال‌سازی مسیر
S_i	ظرفیت عرضه‌ی انبار i	u_{ij}	سقف حمل مسیر (اختیاری)
D_j	تقاضای مرکز j	π	جریمه‌ی هر واحد کمبود

متغیرهای تصمیم

$$x_{ij} \geq 0 \quad y_{ij} \in \{0, 1\} \quad z_j \geq 0$$

متغیر کمکی کمبود z_j تضمین می‌کند مدل همیشه شدنی بماند؛ اگر عرضه کفاف تقاضا را ندهد، کمبود با جریمه‌ی π در تابع هدف ظاهر می‌شود.

تابع هدف

$$\min Z = \sum_{(i,j)} c_{ij} x_{ij} + \sum_{(i,j)} f_{ij} y_{ij} + \pi \sum_j z_j$$

رابطه‌ی (1) – کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ی متغیر حمل، هزینه‌ی ثابت فعال‌سازی مسیر و جریمه‌ی کمبود.

قید

$$\sum_j x_{ij} \leq S_i \quad \forall i \in I \quad (2 - \text{ظرفیت عرضه})$$

$$\sum_i x_{ij} + z_j \geq D_j \quad \forall j \in J \quad (3 - \text{پوشش تقاضا})$$

$$x_{ij} \leq M_{ij} y_{ij}, \quad M_{ij} = \min(S_i, D_j, u_{ij}) \quad (4 - \text{پیوند فعال‌سازی})$$

قید (4) یک **Big-M** سفت است: به‌جای یک مقدار بزرگ دلخواه، از کوچک‌ترین کران ممکن ($\min$ ظرفیت، تقاضا و سقف مسیر) استفاده می‌شود تا شکاف آزادسازی خطی کم و حل سریع‌تر شود.

مشتق‌سازی پارامترها از جغرافیا

$$d_{ij} = 1.3 \times \text{Haversine}(i, j) \quad c_{ij} = d_{ij} \cdot r \quad f_{ij} = F_0 + F_{100} \cdot \frac{d_{ij}}{100}$$

ضریب 3.1 برای پیچ‌وخم جاده؛ نرخ $r=45$ تومان بر واحد-کیلومتر، $F_0=500,000$ و $F_{100}=30,000$ تومان (فرض نرخ حمل خرد 1404؛ در برنامه قابل ویرایش).

روش حل و ارزش سایه‌ای

مدل با کتابخانه‌ی PuLP ساخته و با حل‌گر CBC حل می‌شود. برای استخراج ارزش سایه‌ای، پس از یافتن جواب صحیح بهینه، متغیرهای دودویی y_{ij} تثبیت شده و مدل یک‌بار دیگر به صورت یک برنامه‌ی خطی محض حل می‌شود؛ آنگاه ضریب دوگان هر قید، ارزش سایه‌ای آن است.

در بازحل دوگان، جمله‌ی Big-M از قید تقاضا حذف می‌شود؛ در غیر این صورت ضریب دوگان تقاضا به جای هزینه‌ی نهایی واقعی، برابر جریمه‌ی کمبود π می‌شد.

تفسیر اقتصادی طبق قضیه‌ی مکملی: قید فعال (لختی صفر) ارزش سایه‌ای ناصفر دارد و گلوگاه است؛ قید غیرفعال ارزش سایه‌ای صفر دارد.

نتایج عددی – سناریوی ایران

~80 ms

زمان حل

قم

گلوگاه شبکه

9

مسیر فعال (از 24)

154.76M

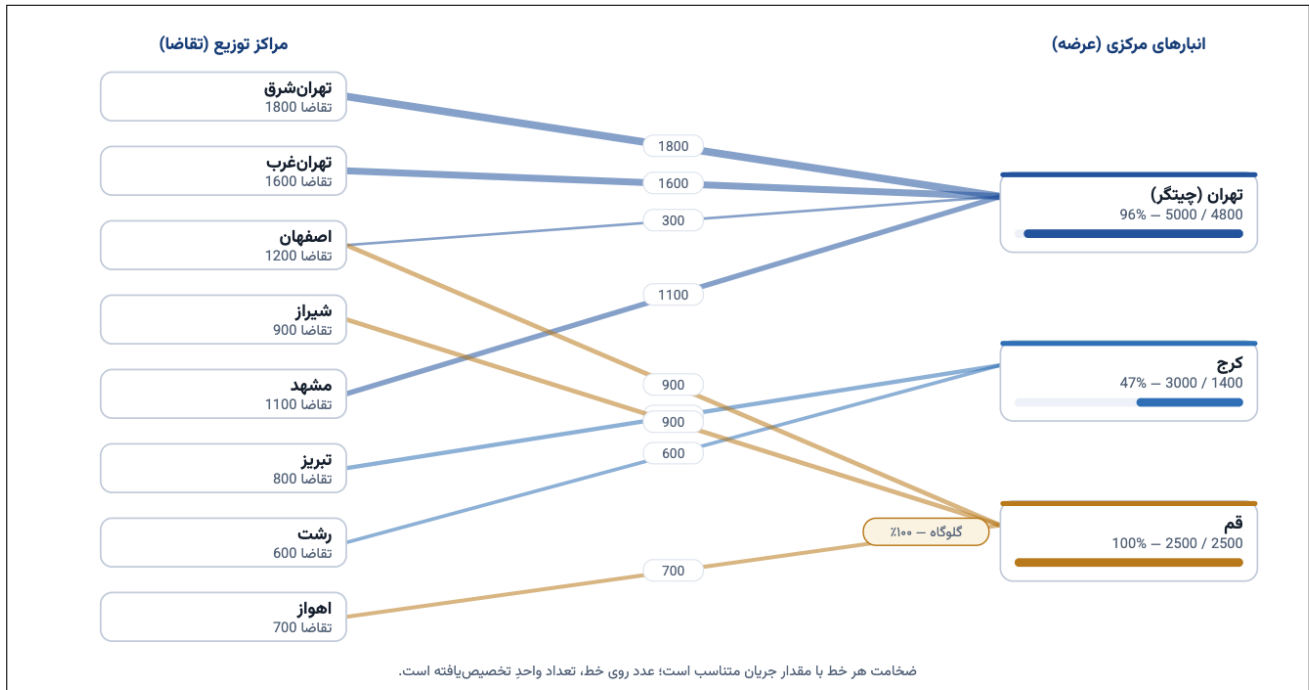
هزینه‌ی کل (تومان)

یافته	مقدار	تفسیر
ارزش سایه‌ای ظرفیت قم	6,527 تومان/واحد	گلوگاه؛ بیشترین صرفه‌جویی به‌ازای ظرفیت اضافه
ظرفیت آزاد کرج	53% بلااستفاده	کم‌بهره‌ورترین انبار – ظرفیت رزرو
پرتأثیرترین اهرم تورنادو	تقاضای مشهد ($\pm 19.9M$)	حساس‌ترین پارامتر هزینه در شبکه
چه می‌شد-اگر: قم +20% ظرفیت	صرفه‌جویی 2,592,299 تومان	هزینه از 154.76M به 152.17M می‌رسد

مدل نه تنها جواب بهینه بلکه دلیل اقتصادی آن را می‌دهد: کدام انبار گلوگاه است، سرمایه‌گذاری کجا بیشترین بازده را دارد و کدام پارامتر حساس‌ترین است. این ماژول با 47 آزمون پایتون پوشش داده شده است.

شبکه‌ی حل‌شده – تصویرِ جوابِ بهینه

شکلی زیر همان مدل ریاضی را در قالبِ جوابِ واقعی نشان می‌دهد: کدام انبار کدام مرکز را و با چه مقداری تغذیه می‌کند. ضخامتِ هر خط با مقدارِ جریانِ متناسب است و نوارِ زیرِ هر انبار درصدِ بهره‌برداری را نشان می‌دهد؛ انبارِ قم با 100% بهره‌برداری گلوگاهِ شبکه است.



شکل 4 – شبکه‌ی تخصیص حل‌شده: 9 مسیر فعال از 3 انبار به 8 مرکز توزیع.

4 ماژول الگوریتم ژنتیک (GA) – مسیریابی VRPTW

این ماژول مسیرِ ناوگانِ تحویلِ در منزل را بهینه می‌کند به‌گونه‌ای که هر مشتری دقیقاً یک‌بار در پنجره‌ی زمانی خود سرویس شود و بارِ هر وانت از ظرفیتِ وزنی و حجمی فراتر نرود. چون این مسئله NP-Hard است، از یک الگوریتم ژنتیکِ خودنویسه (بدون کتابخانه‌ی آماده) استفاده می‌شود.

فرمول‌بندی VRPTW

$$\min \left(K, \sum_{k=1}^K \sum_{(a,b) \in r_k} d_{ab} \right)$$

رابطه‌ی (5) – کمینه‌سازیِ لغوی: اول تعدادِ وانتِ K ، سپس مسافتِ کل.

قید اصلی – هر مشتری یک‌بار سرویس شود؛ بارِ هر مسیر از ظرفیت فراتر نرود؛ و زمانِ شروعِ سرویس در پنجره بماند:

$$\sum_{c \in r_k} w_c \leq Q_w, \quad \sum_{c \in r_k} v_c \leq Q_v, \quad e_i \leq t_i \leq l_i \quad \forall i$$

رابطه‌ی (6) – ظرفیتِ وزنی/حجمی و پنجره‌ی زمانی. رسیدنِ زودتر از e_i به انتظار (مجاز) و دیرتر از l_i به نقض قید می‌انجامد.

کمینه‌سازیِ لغوی با یک جریمه‌ی وانت در تابعِ برازش پیاده می‌شود: (جریمه‌ها) $\text{fitness} = \lambda_{\text{veh}} \cdot K + \sum d$

طراحی کروموزوم: تور-غول‌آسا + رمزگشای Split

هر کروموزوم یک جایگشت ساده از مشتری‌ها است (یک «تور غول‌آسا» بدون مرز و انت). این جایگشت با رمزگشای Split (پرینس، 2004) به مسیرها تقسیم می‌شود – با برنامه‌ریزی پویا روی یک گراف کمکی، کوتاه‌ترین مسیر از گره 0 تا n یافته می‌شود:

$$P(0) = 0, \quad P(j) = \min_{0 \leq i < j} [P(i) + \text{cost}(\sigma_{i+1..j})]$$

رابطه‌ی (7) – هزینه‌ی هر یال $(i \rightarrow j)$ برابر جریمه‌ی وانت + مسافت + جریمه‌ی نقض TW/ظرفیت (نسخه‌ی relaxed تا برازش همیشه تعریف شده بماند).

این جداسازی «رمزگذاری از رمزگشایی» مزیت بزرگی دارد: اپراتورهای ژنتیک روی یک جایگشت ساده کار می‌کنند و ساختار پیچیده‌ی مسیرها به صورت بهینه از خود جایگشت استخراج می‌شود.

اپراتورهای تکاملی

اپراتور	نقش
OX	تقاطع ترتیب‌محور؛ برشی از والد اول را حفظ و بقیه را به ترتیب والد دوم پر می‌کند.
PMX	تقاطع نگاشت جزئی؛ ساختار موقعیتی را با یک نگاشت دوسویه حفظ می‌کند.
جهش (سه‌گانه)	جابه‌جایی، درج و وارونه‌سازی زیربخش – تنوع جمعیت را حفظ می‌کند.
2-opt	الگوریتم ممتیک: بازآرایی یال‌ها با انتقال بین‌مسیری برای بهبود محلی.

(1) جست‌وجوی محلی باید جریمه‌های تطبیقی جاری را ببیند نه ثابت؛ (2) تطبیق جریمه بر مبنای «شدنی بودن بهترین جواب» باشد نه نسبت جمعیت؛ (3) یک آرشیو جداگانه از بهترین جواب‌شدنی با معیار (وانت، مسافت) نگهداری شود تا نوسان جریمه نتیجه را نپراند.

همگرایی و اعتبارسنجی جهانی

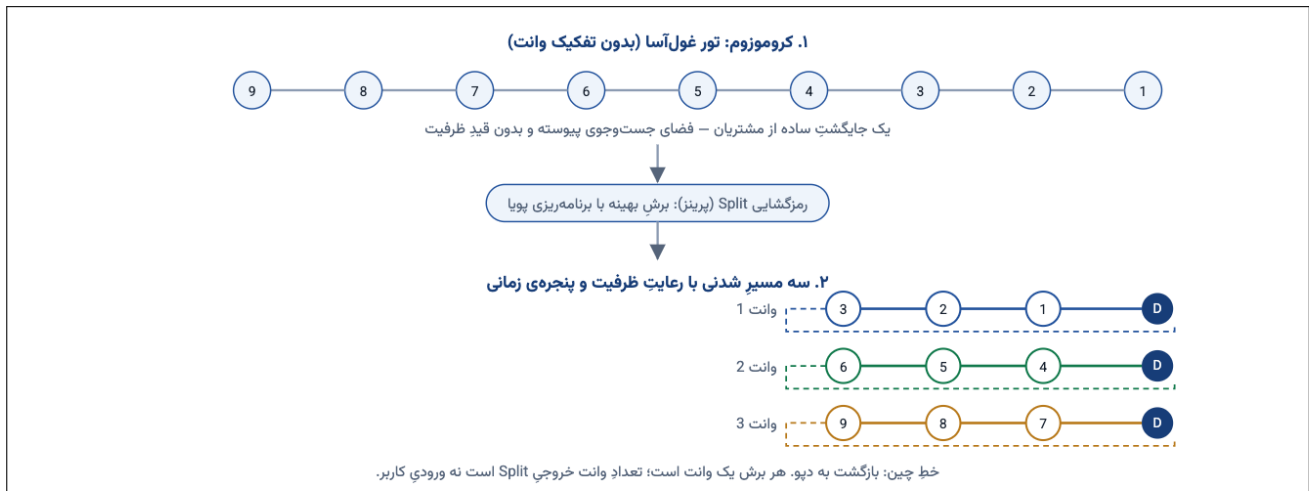
الگوریتم روی نمونه‌های استاندارد Solomon اجرا و فاصله تا بهترین جواب شناخته‌شده (BKS) اندازه‌گیری شد:

نمونه	فاصله تا BKS	تعداد وانت
Solomon C101-25	+0.3%	برابر BKS
Solomon R101-25	+0.2%	BKS = 8

نتایج عددی – سناریوی تهران

86%	297.6	7	50
میانگین پرشدگی حجمی	مسافت کل (km)	وانت	مشتری

جواب کاملاً شدنی برای 50 مشتری در کمتر از یک دقیقه، با پوشش همه‌ی پنجره‌های زمانی و قیود ظرفیت؛ نتیجه با بذر ثابت تکرارپذیر و روی محک جهانی Solomon معتبر است.



شکل 5 – از کروموزوم تا مسیرهای شدنی: جایگشت ساده با رمزگشایی Split به مسیرهای سازگار با ظرفیت و پنجره‌ی زمانی تبدیل می‌شود.

5 یکپارچگی مسیر و چیدمان سه‌بعدی بار

فراتر از حداقل خواسته‌ی موضوع، خروجی مسیریابی به یک **موتور چیدمان سه‌بعدی بار** متصل می‌شود: توقف k -ام مسیر به بسته‌های همان مشتری نگاشت می‌شود و بسته‌ها با قید **دسترس‌پذیری چندمقصودی** چیده می‌شوند تا در هر توقف بدون جابه‌جایی بقیه قابل تخلیه باشند (تخلیه‌ی LIFO).

وزن حجمی و صورت‌حساب

$$W_v = \frac{L \times W \times H}{5000} \quad W_{\text{bill}} = \sum_p \max(W_p, W_{v,p}) \quad \eta = \frac{V_{\text{used}}}{V_{\text{total}}}$$

رابطه‌ی (8) – وزن حجمی (ابعاد به سانتی‌متر)، وزن صورت‌حساب (بیشینه‌ی وزن واقعی و حجمی هر بسته)، و نرخ پرشدگی حجمی. این فرمول‌ها مستقیماً منطق «پرداخت بر اساس فضا»ی سرویس‌های حمل‌اشرافی (مانند باکس‌لاین تیپاکس) را مدل می‌کنند. کاربر می‌تواند از **کاتالوگ 12 کارتن استاندارد تیپاکس** یا جعبه‌ی سفارشی بسته اضافه کند و اثرش را بر پرشدگی و وزن صورت‌حساب زنده ببیند.

بسته‌های توقف‌های آخر، عقب‌تر یا پایین‌تر بار می‌شوند تا هنگام رسیدن به توقف زودتر، بدون برداشتن سایر بسته‌ها قابل تخلیه باشند. موتور این قید را تضمین و پایداری جانبی و شکنندگی هر بسته را نیز بررسی می‌کند.

6 چت‌بات تحلیلی هوشمند

چت‌بات یک تحلیل‌گر فارسی نتایج است که به خروجی همان جلسه متصل می‌شود. برخلاف یک دستیار عمومی، این بات ابزارهای واقعی اجرا می‌کند: برای پرسش‌های «چه می‌شد-اگر» مدل را دوباره حل می‌کند و پاسخ را با اعداد واقعی قبل/بعد می‌دهد.

معماری

- **مدل زبانی:** اتصال به Gemini از طریق SDK رسمی google-genai با «فراخوانی خودکار تابع».
- **تزریق زمینه:** نتایج LP، GA و چیدمان به یک JSON کم‌حجم فارسی فشرده و به‌عنوان «داده‌ی جلسه» به مدل داده می‌شود – بات فقط بر پایه‌ی این داده پاسخ می‌دهد و عددی از خود نمی‌سازد.
- **استریم:** پاسخ به‌صورت SSE روی POST استریم می‌شود.
- **ضد تزریق:** محتوای داده‌ی جلسه «داده» است نه «دستور»؛ هر دستورالعمل درون آن نادیده گرفته می‌شود.

ابزارهای زنده (اجرای مجدد مدل‌ها)

ابزار	کارکرد
run_lp_whatif	تغییر ظرفیت/تقاضا و بازحلی MILP؛ پاسخ با هزینه‌ی قبل/بعد
rank_cost_drivers	تحلیل تورنادو – رتبه‌بندی پرتأثیرترین اهرم‌های هزینه
explain_shadow_price	تفسیر ارزش سایه‌ای یک قید با داده‌ی دقیق
get_route_detail	جزئیات توقف‌های یک وانت + نمایش نقشه‌ی درون‌گفتگو
run_ga_quick	اجرای سریع مسیریابی با بذر متفاوت برای سنجش حساسیت

پرسش: «اگر ظرفیت انبار قم 20% بیشتر شود چه می‌شود؟» – بات ابزار run_lp_whatif را صدا زد، مدل را واقعاً بازحل کرد و پاسخ داد: هزینه‌ی کل از 154.76M به 152.17M تومان کاهش می‌یابد (صرفه‌جویی 2,592,299 تومان) و جدول قبل/بعد را نمایش داد. این عدد دقیقاً با محاسبه‌ی مستقل پنل «مقایسه‌ی سناریو» هم‌خوان است.

7 رابط کاربری و تجربه کاربری

رابط یک برنامه‌ی تک‌صفحه‌ای React با شش صفحه است: داشبورد، تخصیص سفارش، مسیریابی، بارگیری سه‌بعدی، چت‌بات و راهنما. تجربه‌ی کاربر بر «سادگی ورود اطلاعات» و «رسم نمودارهای تحلیلی خروجی» متمرکز است – دو شاخص صریح ارزیابی.

ورود ساده‌ی داده

- ویرایش درجای ظرفیت، تقاضا، تعرفه‌ی مسیرها و ناوگان هر شهر؛ افزودن/حذف انبار و مرکز با انتخاب شهر (مسیرهای جدید خودکار با نرخ‌نامه ساخته می‌شوند).
- تبدیل خودکار ارقام فارسی به لاتین در همه‌ی ورودی‌ها؛ کلمپ مقادیر به بازه‌های معتبر اسکیمای بک‌اند.

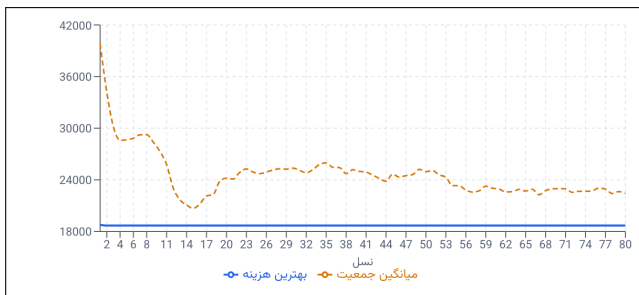
نمودارها و مصورسازی تحلیلی

- نمودار همگرایی زنده (GA)، حساسیت و تورنادو (LP)، سرشکن هزینه و میله‌های بهره‌برداری (داشبورد).
- نقشه‌ی تعاملی Leaflet برای جریان تخصیص و مسیرها، به همراه پیش‌نمایش متحرک حرکت ناوگان روی خط زمان واقعی جواب.
- صحنه‌ی سه‌بعدی Three.js برای چیدمان بار با پخش گام‌به‌گام و ناوگان 22 وسیله‌ای.

کل رابط دوزبانه (fa/en)، راست‌چین/چپ‌چین خودکار، واکنش‌گرا (از 320 پیکسل) و دارای دارک‌مود سه‌حالتی است. آیکن‌ها برداری و بدون هیچ ایموجی هستند؛ اعداد در متن راست‌چین با ایزوله‌سازی جهت نمایش داده می‌شوند.

نمایی از برنامه

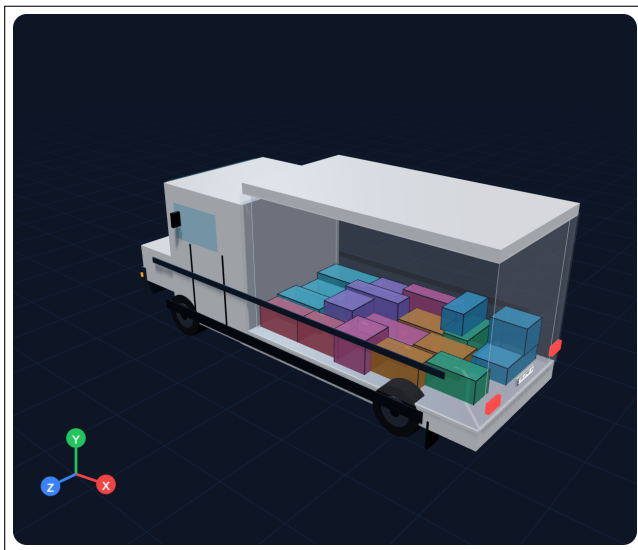
تصاویر زیر از اجرای زنده برنامه روی سناریوی نمونه گرفته شده‌اند: نقشه‌ی تعاملی، نمودار تحلیلی، مسیرهای بهینه و صحنه‌ی سه‌بعدی چیدمان بار.



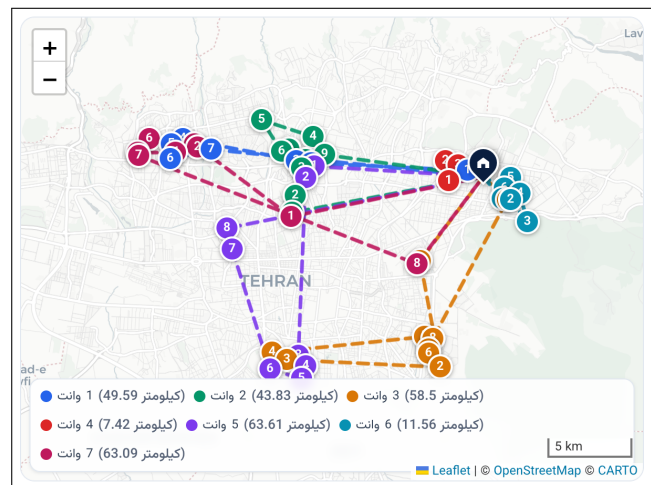
شکل 7 – نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک.



شکل 6 – نقشه‌ی جریان تخصیص (LP).



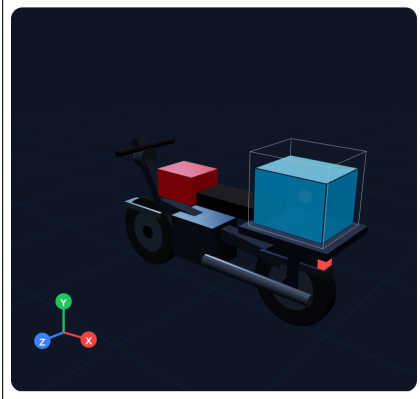
شکل 9 – صحنه‌ی سه‌بعدی چیدمان بار با محورهای XYZ.



شکل 8 – مسیرهای بهینه‌ی 7 وانت روی نقشه‌ی تهران.

کاتالوگِ ناوگانِ سه‌بعدی

سامانه کاتالوگی از 22 وسیله نقلیه واقعی ایرانی دارد – از موتور پیک تا کشنده‌ی تریلی. هر وسیله با ابعاد واقعی اتاق بار، ظرفیت وزنی و مدل سه‌بعدی اختصاصی (پلاک ایرانی، چراغ‌ها، چرخ‌های لایه‌ای) در موتور چیدمان بارچین رندر می‌شود؛ چیدمان بار قید تخلیه‌ی LIFO را رعایت می‌کند.



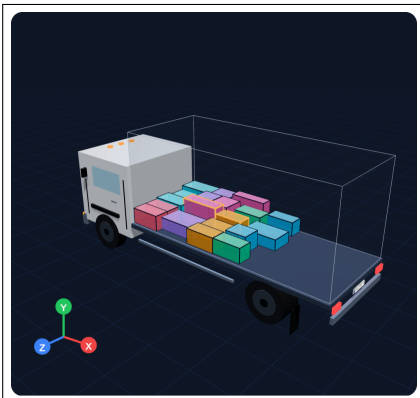
موتور هوندا CG125
60 kg, 0.13 m³



مزد کارا دوکابین
1000 kg, 1.2 m³



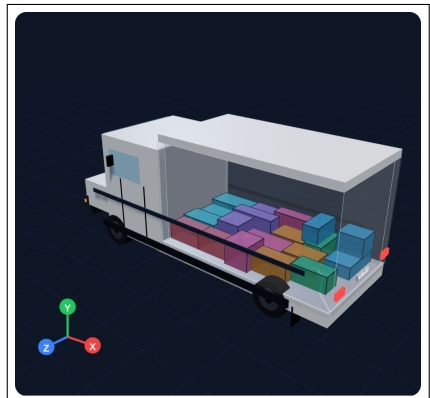
نیسان زامیاد آبی
2000 kg, 6.5 m³



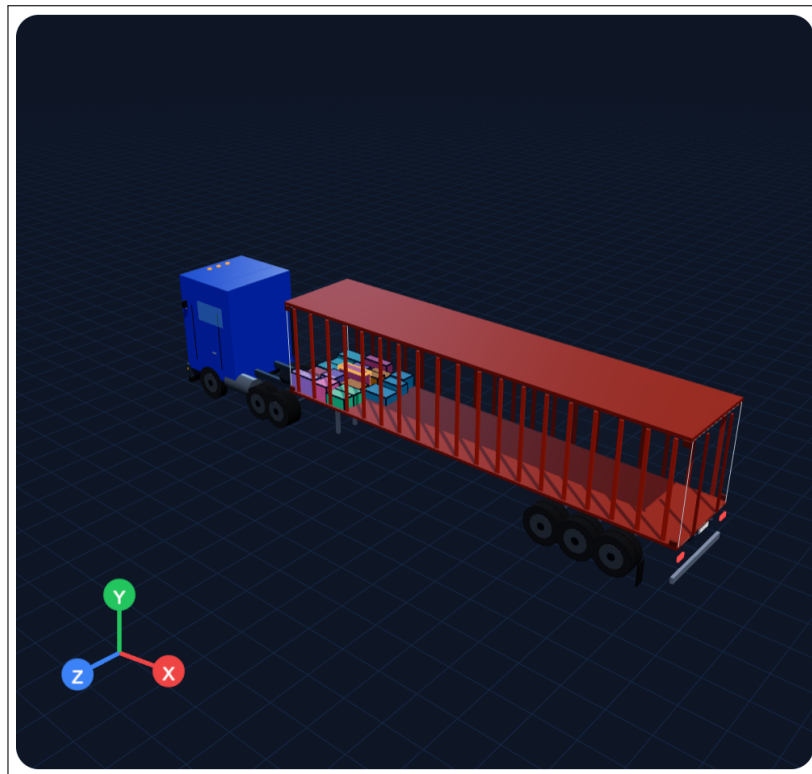
کامیون یخچالی ایسوزو
5000 kg, 22.8 m³



خاور 608
4500 kg, 20.6 m³



هیوندای H350
1400 kg, 13.1 m³



کشنده + کانتینر 40 فوت – 26000 kg , 73.5 m^3

شکل 10 تا 16 – نمونه‌هایی از 22 وسیله‌ی ناوگان با مدل‌های سه‌بعدی اختصاصی.

8 راستی‌آزمایی، آزمون و کیفیت

کیفیت با آزمون‌های خودکار و گیت‌های ساختاری تضمین می‌شود. منطقِ نمره‌دار به‌صورتِ توابعِ خالص از رابط جدا شده

✓ build • no-emoji • i18n	✓ ruff • mypy(strict)	104 آزمونِ فرانت (vitest)	50 آزمونِ بک‌اند (pytest)
------------------------------	--------------------------	------------------------------	------------------------------

آزموده شود.

حوزه	پوششِ آزمون
LP	بهینه‌ی دستی 2×2، تعادلِ قیود، مکملی، کمبود، رگرسیونِ حساسیت و تورنادو
GA	صحتِ اپراتورها، رمزگشای Split، قطعیتِ بذر، شدنی‌بودنِ تهران، فاصله تا BKS
چت‌بات	ابزارها بدونِ تماسِ واقعی با مدل، اعتبارسنجی، استریمِ endpoint
منطقِ فرانت	تخصیصِ ناوگان، تورنادو، شبیه‌سازی، پارسِ بسته، ویرایشِ سناریو – همه توابعِ خالص

مرورِ متخاصمِ چندعاملی

علاوه بر آزمون‌ها، تغییراتِ کلیدی با یک فرایندِ مرورِ متخاصمِ چندعاملی بازبینی شدند: عامل‌های مستقل به‌دنبالِ باگ می‌گشتند و یافته‌ها با عامل‌های راستی‌آزمای دیگر تأیید یا رد می‌شدند. این فرایند چند باگِ واقعی را پیش از تحویل شناسایی و اصلاح کرد.

9 جمع‌بندی و کارهای آینده

PackUp نشان می‌دهد که سه پارادایم متفاوت بهینه‌سازی – برنامه‌ریزی خطی دقیق، فراابتکار تکاملی و چیدمان هندسی – چگونه می‌توانند در یک معماری ماژولار و یک تجربه‌ی کاربری یکپارچه کنار هم بنشینند و یک **دستیار تصمیم واقعی** بسازند، نه صرفاً یک ماشین حساب.

کارهای آینده

- سرویس بازگشتی (Reverse Logistics): مدل‌سازی مرجوعی‌ها در VRPTW.
- ناوگان ناهمگن درون هسته‌ی GA: به‌جای لایه‌ی تخصیص پس از حل.
- استقرار ابری و تعرفه‌ی وزن حجمی در برآورد هزینه‌ی هر مسیر.

ماژول‌های LP، GA و رابط کاربری کامل و آزموده هستند (154 آزمون سبز در مجموع). گزارش حاضر فرمول‌بندی ریاضی کامل را پوشش می‌دهد. کد چت‌بات کامل است و برای اجرای زنده تنها به یک کلید معتبر مدل زبانی نیاز دارد. کل سامانه با docker compose به‌صورت محلی اجرا می‌شود و آماده‌ی استقرار است.

10 مراجع

1. Prins, C. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 31(12).
2. Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the VRP and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35(2).
3. Mitchell, S., et al. PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python. COIN-OR.
4. مستند رسمی پروژه – درس برنامه‌نویسی پیشرفته، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف (موضوع 2).
5. تعرفه‌ی رسمی بسته‌بندی تیپاکس – tipaxco.com/value-added-services/packingexpress.
6. سرویس ارسال بین‌شهری تیپاکس – tipaxco.com/services/intercity (عوامل تعرفه).

این گزارش بخشی از تحویل پروژه‌ی PackUp است. فرمول‌ها با محیط ریاضی XeLaTeX، متن با فونت وزیرمتن و ارقام به صورت لاتین نمایش داده شده‌اند.