اولین کنفرانس مدیریت،مهندسی صنایع و حسابداری
1st Conference on Management, Industrial Engineering and Accounting

# بهینه‌سازی مساله مکان‌یابی مراکز پرواز و مسیریابی حرکت پهبادهای هوشمند در ارائه خدمات شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد)

**مهدی ایزدی فریمان**

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی سجاد مشهد
mehdi.hgdhs@gmail.com
عماد برهانی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی سجاد مشهد
emadborhani@yahoo.com

**چکیده**

در دهه گذشته استفاده از پهبادهای هوشمند در خدمات شهری، نقش بسزایی در کاهش ترافیک و سرعت تحویل مرسوله‌های پستی داشته است. در این مطالعه، مکان‌یابی ایستگاه‌های پرواز و انتخاب نقاط تقاضا برای عملیات شارژ، به منظور به حداقل رساندن هزینه‌های سیستم، تعداد و مکان‌های بهینه ایستگاه‌های راه اندازی، انجام شد. هزینه‌های سیستم شامل هزینه بکارگیری هواپیماهای بدون سرنشین و مسافت پیموده شده توسط آن‌ها و هزینه شارژ توسط مشتری می‌باشد. مسیریابی بر اساس تقاضای مشتریان و با توجه به ظرفیت و میزان شارژ برای هر نوع پهباد، انجام شد. برای ایستگاه‌های شارژ مکان مجزایی در نظر گرفته نشده و پهبادها می‌توانند در نقاط تقاضا اقدام به شارژ خود نمایند. همچنین میزان کاهش شارژ در حین جابه-جایی را غیر قطعی در نظر گرفته و برای آن تابع رگرسیونی بر اساس این عوامل ارائه کردیم. این مساله در شهر مشهد پیاده-سازی شده است. ایستگاه‌های اصلی پرواز، ادارات پست و نقاط تقاضا دانشگاه‌ها، هستند. مساله با نرم‌افزار گمز کد نویسی شده و نتایج آن ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی پرواز پهباد، مکان‌یابی، عدم قطعیت، ظرفیت باتری

## ۱- مقدمه

وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAVs)، یا پهپادها، توجه زیادی را در بخش‌های نظامی، غیرنظامی و تجاری در سراسر جهان به عنوان وسیله‌ای برای نظارت بر شرایط، انجام خدمات و تحویل خواسته‌ها به خود جلب کرده است. هواپیماهای بدون سرنشین دارای پتانسیل بالایی برای کاهش قابل توجه هزینه و زمان مورد نیاز برای تحویل بسته‌های مشتریان هستند. (Dorling et al, 2016)

تشکیل شبکه و مکان‌یابی برای هواپیماهای بدون سرنشین به منظور به حداقل رساندن زمان پاسخ مشتریان، باید طوری باشد تا خدمات کافی را به یک منطقه بزرگ ارائه دهند. این شبکه باید بتواند اهداف لازمه مانند: تاخیرهای سفر، به حداقل رساندن هزینه، به حداکثر رساندن پوشش خدمات و ... را محقق کند. (Pulvera and Weib, 2018)

اشنایدر و همکاران (Schneider et al, 2014) مساله تحویل وسایل نقلیه با باتری را ایجاد کردند که پنجره‌های زمانی، محدودیت‌های ظرفیتی، و تقاضاهای مکان‌یابی را در نظر می‌گیرد. هیرمن و همکاران (Hiermann et al, 2016) با کار بر روی مقاله اشنایدر و همکاران مساله‌ای با ناوگان مختلط، ظرفیت‌های متفاوت و هزینه‌های ثابت ایجاد کردند. آن‌ها فرض می‌کنند که زیرساخت شارژ در محل موجود است، بنابراین وسایل نقلیه می‌توانند انرژی خود را بازیابی کنند تا فاصله مسافرتی خود را گسترش دهند. (Kim et al, 2018)

دمای هوا بر کارایی باتری هواپیمای بدون سرنشین تاثیر زیادی دارد. به طوری که هرچه هوا سردتر باشد کارایی باتری بهتر است. پس دما می‌تواند باعث کاهش زمان پهپاد شود. اگر پیش‌بینی شود که تغییرات قابل توجهی در دما در طی یک دوره عملیاتی پهپاد در منطقه وجود داشته باشد و عملکرد آن تحت تأثیر دما باشد، باید از زمان‌بندی پهپاد برای خرابی احتمالی و تحویل برنامه‌ریزی شده، ابراز نگرانی کرد. (Hsu, 2013)

تغییرات دما نامشخص است و عدم اطمینان در تغییر دما بیشتر به عنوان یک محدوده بیان می‌شود. طیف وسیعی از تغییرات دما را می‌توان با استفاده از داده‌های تاریخی بدست آورد. برای شناسایی برنامه‌های بهینه و عملی پهپاد برای انجام برنامه‌های کاربردی در دنیای واقعی، محققان باید عدم قطعیت در تغییرات دما را لحاظ کنند. در مقاله کیم و همکاران میزان افت شارژ باتری را بر اساس تغییرات دما در نظر گرفته‌اند و یک معادله رگرسیونی $U_t = \left\{t_k | t_k^0 + \sum_{s=1}^{\Omega} y_s t_{k,}^s \ \forall y_s \varepsilon Y\right\}$ ارائه دادند. این رابطه نشان دهنده این است که ظرفیت باتری می‌تواند در مجموعه مشخصی از عدم اطمینان مرتبط با تغییرات دما متفاوت باشد. (Kim et al, 2018)

ما تابع رگرسیونی ارائه شده توسط کیم و همکاران را گسترش دادیم و برای میزان مصرف انرژی باتری عواملی مانند دما، شدت وزش باد و مسافت را لحاظ کردیم و تابع جدیدی ارائه دادیم. هیچ کدام از مقالات این حوزه مصرف انرژی پهپاد را با این عوامل بررسی نکرده‌اند. ما نقاط پرواز را مکان‌یابی کردیم و آن‌ها را محدود به یک نقطه نکردیم. همچنین عملیات شارژ نیز می‌تواند توسط مشتری‌ها انجام شود. ما بین این نقاط مسیریابی را انجام دادیم و محدوده مسافرتی پهپاد را محدود نکردیم. پهپاد می‌تواند بعد از پرواز، چندین نقطه مختلف را خدمت‌رسانی کند.

## ۲- بیان مسئله

در این تحقیق مساله مکان‌یابی مراکز پرواز پهپادهای هوشمند و همچنین مسیریابی مسیرهای حرکت آن‌ها در ارائه خدمات شهری به عنوان یک مدل ریاضی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مساله سازمان‌های متولی ارائه خدمات شهری مانند شرکت پست قصد دارند به منظور توسعه زیرساخت‌های خود از آخرین تکنولوژی‌های حمل مرسوله‌های پستی استفاده کند که شامل بهره‌گیری از پهپادهای هوشمند است. اما جهت اجرای مناسب عملیات مربوطه، نیاز است که مکان‌هایی به عنوان مراکز اصلی پرواز و همچنین بارگیری پهپادها تعیین شود و سپس براساس تقاضای مشتریان و با توجه به ظرفیت و میزان شارژ برای هر نوع پهپاد، مسیریابی انجام شود. اما با توجه به اینکه پهپادها با استفاد از باتری اقدام به تامین انرژی خود می‌نمایند، ممکن است که مقدار شارژ آن‌ها براساس پارامترهای مختلفی مانند شدت وزش باد، درجه حرارت و همچنین مسافت پرواز به صورت

غیرخطی تحت تاثیر قرار گیرد. این مساله به عنوان یک ورودی مهم در طراحی مدل ریاضی شناخته می‌شود. بنابراین در این تحقیق براساس تابع ارائه شده در پژوهش یک تابع مصرف شارژ به صورت زیر توسعه داده شده است.

$$ChargeReduction_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Temp + \cdots + \beta_n Temp^n + \alpha_0 + \sqrt[3]{Dist_{ij}^2} + \gamma_0 + \gamma_1 Wind + \cdots + \gamma_n Wind^n \quad (1)$$

که در آن $\beta_0 + \beta_1 Temp + \cdots + \beta_n Temp^n$ یک ساختار رگرسیونی است که میزان دما و $\gamma_0 + \gamma_1 Wind + \cdots +$ $\gamma_n Wind^n$ ساختار رگرسیونی برای تابع شدت وزش باد است. واضح است که برای محاسبه این بخش از تابع باید از داده‌های تاریخی استفاده نمود. $\sqrt[3]{Dist^2}$ یک تابع غیرخطی صعودی غیرمطلق به منظور ایجاد وابستگی بین مسافت و میزان مصرف شارژ است. در واقع اگر یک پهباد مسیر ۱۰۰ کیلومتری را به صورت ممتد طی کند نسبت به حالتی که در ۵ بازه ۲۰ کیلومتری این عملیات را انجام دهد، به شارژ بیشتری نیاز خواهد داشت. مطابق با این تابع شارژ می‌توان میزان مصرف باتری بین دو نقطه $i$ و $j$ را محاسبه نمود. اما ساختار ریاضی مساله تحقیق به صورت زیر توسعه داده می‌شود.

### ۲. ۱- مجموعه‌ها

| | |
|---|---|
| $M$ | مجموعه تمام نقاط شبکه |
| $R \subseteq M$ | مجموعه مکان‌های بالقوه پرواز پهبادها |
| $C \subseteq M/\{R\}$ | مجموعه نقاط شبکه به جز مکان‌های بالقوه پرواز پهبادها |
| $O \subseteq C$ | مجموعه چکاپ پهبادها بعد از اجرای عملیات |
| $V$ | مجموعه پهبادهای مورد استفاده |

### ۲. ۲- پارامترهای ورودی

| | |
|---|---|
| $Cost_use_v$ | هزینه ثابت بکارگیری پهبادها |
| $Cost_cc_v$ | هزینه متغیر بکارگیری پهباد به ازای هر واحد مسافت |
| $Dist_cc_{cc'}$ | مسافت بین هر دو نقطه شبکه |
| $Demand_c$ | تقاضای مشتری $c$ |
| $Cap_v$ | ظرفیت حمل محصول برای پهباد $v$ |
| $Charge_v$ | میزان شارژ اولیه پهباد $v$ |
| $Charging_{cv}$ | میزان شارژ دریافتی پهباد $v$ در محل مشتری $c$ |
| $ChargingCost_{cv}$ | هزینه شارژ پهباد $v$ در محل مشتری $c$ |
| $LowerCharge$ | حداقل شارژ پهباد در کل مسیر |
| $ChargeReduction_{cc'}$ | تابع کاهش شارژ پهبادها در طی مسیر بین مشتریان $c$ و $c'$ |
| $Big$ | عددی مثبت و به اندازه کافی بزرگ |

### ۲. ۳- متغیرهای تصمیم

| | |
|---|---|
| $X_{mm'v}$ | برابر با ۱ است اگر پهباد $v$ از مشتری $c$ به مشتری $c'$ حرکت کند و در غیراینصورت برابر با صفر است |
| $Use_v$ | برابر با ۱ است اگر پهباد $v$ استفاده شود و در غیراینصورت برابر با صفر است |
| $F_{mc}$ | برار با ۱ است اگر مشتری $c$ برای دریافت خدمت به مرکز $m$ تخصیص یابد و در غیراینصورت برابر با صفر است |
| $A_{cv}$ | برابر با ۱ است اگر پهباد $v$ در مشتری $c$ اقدام به شارژ کند و در غیراینصورت برابر با صفر است |
| $S_{mv}$ | متغیر مثبت برای حذف زیرتورها |
| $Ch_{cv}$ | میزان شارژ پهباد $v$ بعد از ترک محل مشتری $c$ |

**۲. ۴- مدل ریاضی**

$$Min \sum_{v\in V} Cost_use_v \times Use_v + \sum_{m\in M}\sum_{m\prime\in M} Cost_cc_v \times Dist_cc_{mm\prime} \times X_{mm\prime v} + \sum_{c\in C}\sum_{m\in M} ChargingCost_{cv} \times A_{cv} \quad (۲)$$

$$\sum_{m'\in M} X_{mm'v} + \sum_{m'\in M/\{O\}} X_{m'cv} - F_{mc} \le 1 \quad \forall\, m \in \{R\}, v \in V \quad (۳)$$

$$\sum_{m\in M}\sum_{v\in V} X_{mcv} = 1 \quad \forall\, c \in C/\{O\} \quad (۴)$$

$$\sum_{m\in M} X_{mcv} \le 1 \quad \forall\, c \in C/\{O\}, v \in V \quad (۵)$$

$$\sum_{c\in C} F_{mc} \le Big \times \sum_{c\in C}\sum_{v\in V} X_{mcv} \quad \forall\, m \in \{R\} \quad (۶)$$

$$\sum_{m'\in M} X_{m'mv} - \sum_{m'\in M} X_{mm'v} = 0 \quad \forall\, m \in M, v \in V \quad (۷)$$

$$X_{mov} = 0 \quad \forall\, m \in \{R\}, v \in V \quad (۸)$$

$$\sum_{c\in C} F_{mc} \le \sum_{v\in V} X_{mov} \quad \forall\, m \in \{R\} \quad (۹)$$

$$\sum_{c\in C/\{0\}} X_{cov} = 0 \quad \forall\, v \in V \quad (۱۰)$$

$$ST_{mv} - ST_{c'v} + |M| \times X_{mcv} \le |M| - 1 \quad \forall\, m \in M, v \in V \quad (۱۱)$$

$$\sum_{m\in M}\sum_{c\in C} X_{mcv} \le Big \times Use_v \quad \forall v \in V \quad (۱۲)$$

$$Use_v \le \sum_{m\in M}\sum_{c\in C} X_{mcv} \quad \forall v \in V \quad (۱۳)$$

$$\sum_{m\in\{R\}} X_{cmv} = 0 \quad \forall v \in V, c \in C/\{O\} \quad (۱۴)$$

$$\sum_{c\in Cr}\sum_{c\prime\in Cr} Demand_c \times X_{cc\prime v} \le Cap_v \quad \forall v \in V \quad (۱۵)$$

$$Ch_{mv} \le Ch_{cv} + Charging_{cv} \times A_{cv} - ChargeReduction_{cc'} + Big \times (1 - X_{cmv}) \quad \forall m \in M, v \in V, c \in C/\{O\} \quad (۱۶)$$

$$Ch_{mv} \ge Ch_{cv} + Charging_{cv} \times A_{cv} - ChargeReduction_{cc'} - Big \times (1 - X_{cmv}) \quad \forall m \in M, v \in V, c \in C/\{O\} \quad (۱۷)$$

$$Ch_{cv} \le Charge_v + Big \times (1 - X_{mcv}) \quad \forall m \in \{R\}, c \in C/\{O\}, v \in V \quad (۱۸)$$

$$Ch_{cv} \ge Charge_v - Big \times (1 - X_{mcv}) \quad \forall m \in \{R\}, c \in C/\{O\}, v \in V \quad (۱۹)$$

$$Ch_{mv} \ge LowerCharge - Big \times (1 - X_{mm\prime v}) \quad \forall m, m' \in M, v \in V \quad (۲۰)$$

تابع هدف (۲) مدل به کمینه‌سازی هزینه استفاده از پهپادها، هزینه طی مسیر و هزینه شارژ پهپادها در نقاط مشتریان می‌پردازد. محدودیت (۳) ساختار مکان‌یابی را مبتنی بر مسیریابی ایجاد می‌کند. محدودیت‌های (۴) و (۵) تخصیص مشتریان به مراکز و همچنین خروجی مناسب پهپادها را از مراکز پرواز تضمین می‌کند. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که زمانی یک پهپاد می‌تواند از مرکزی خارج شود که آن مرکز احداث شده باشد. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که هر پهپاد حتما مشتریان را طی کرده و مسیر را ادامه دهند. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که تمام پهپادها به مراکز بازگردند. محدودیت‌های (۹) و

(۱۰) تضمین می‌کند که ساختار مکان‌یابی و مسیریابی به درستی صورت پذیرد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که زیرتور ایجاد نشود. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به محاسبه پهبادهای استفاده شده در ارائه خدمت می‌پردازد. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند که تمام پهبادها به نقطه چکاب رجوع کنند. محدودیت (۱۵) به محاسبه حد ظرفیت پهبادها برای حمل مرسوله‌ها می‌پردازد. محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) میزان شارژ هر پهباد را در هر نقطه مشتری محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) تضمین می‌کند که هر پهباد پس از خروج از مرکز دارای میزان شارژ اولیه است. محدودیت (۲۰) تضمین می‌کند که شارژ هر پهباد نباید از مقدار مشخصی کمتر شود.

## ۳- حل مساله برای منطقه مورد نظر

نقاط ابتدایی برای پرواز ۵ مرکز پستی شهر مشهد هستند. این نقاط اداره‌های پست منطقه چهار، منطقه نه، آب و برق، قاسم آباد و پست مرکزی می‌باشد. از بین دانشگاه‌های مشهد، ۲۰ دانشگاه به عنوان نقاط تقاضا لحاظ شد. فاصله بین دو نقطه متقارن می‌باشد. چون فواصل هوایی و مستقیم است. داده‌های تاریخی لحاظ شده برای محاسبه تابع رگرسیونی مربوط به روز دوشنبه، ۷ دی ۹۹ که اطلاعات آن در جدول ۱ آمده است، می‌باشد.

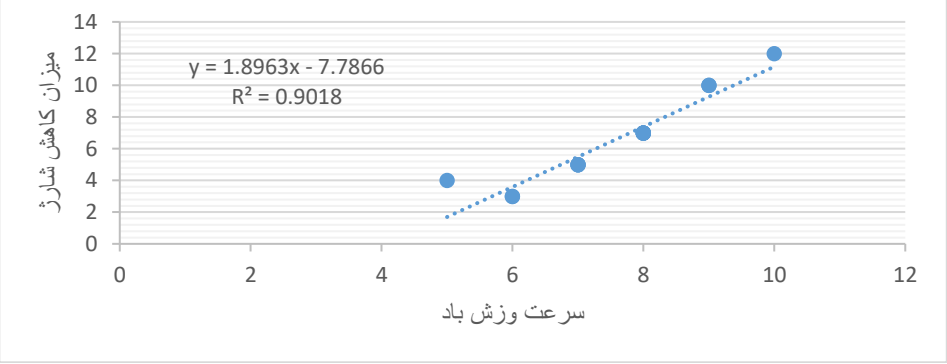
جدول۱. کاهش شارژ باتری متاثر از سرعت وزش باد و دما

| ساعت | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سرعت باد (km/h) | ۷ | ۷ | ۸ | ۸ | ۸ | ۶ | ۶ | ۵ | ۷ | ۸ | ۹ | ۹ | ۱۰ | ۸ |
| دما (°c) | ۲ | ۳ | ۵ | ۹ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۲ | ۱۰ | ۹ | ۸ | ۸ | ۵ | ۴ | ۴ |

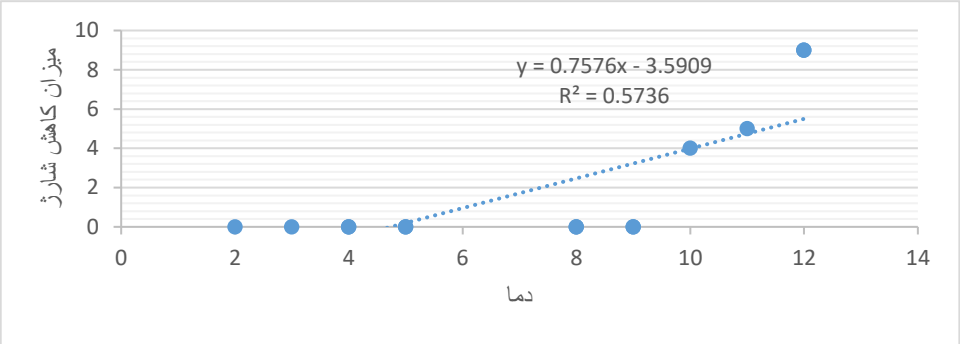
متناسب با فرمول محاسبه شده در بخش بیان مساله، می‌توان معادله رگرسیونی بین کاهش شارژ و وزش باد و همچنین معادله رگرسیونی بین کاهش شارژ و دما را محاسبه کرده و با داشتن فاصله بین نقاط مشتریان، مقدار کاهش شارژ را محاسبه نمود. شکل ۱ تاثیر سرعت وزش باد و شکل ۲ تاثیر دما بر کاهش شارژ باتری را نشان می‌دهند.

مقدار کاهش شارژ برای عامل باد برابر با ۱۱/۱۷۶۴ و عامل دما برابر با ۷/۷۷۳۱ بدست آمد که جمع آن‌ها را ۱۹ در نظر می‌گیریم.

شکل۱. تاثیر سرعت وزش باد بر میزان کاهش شارژ

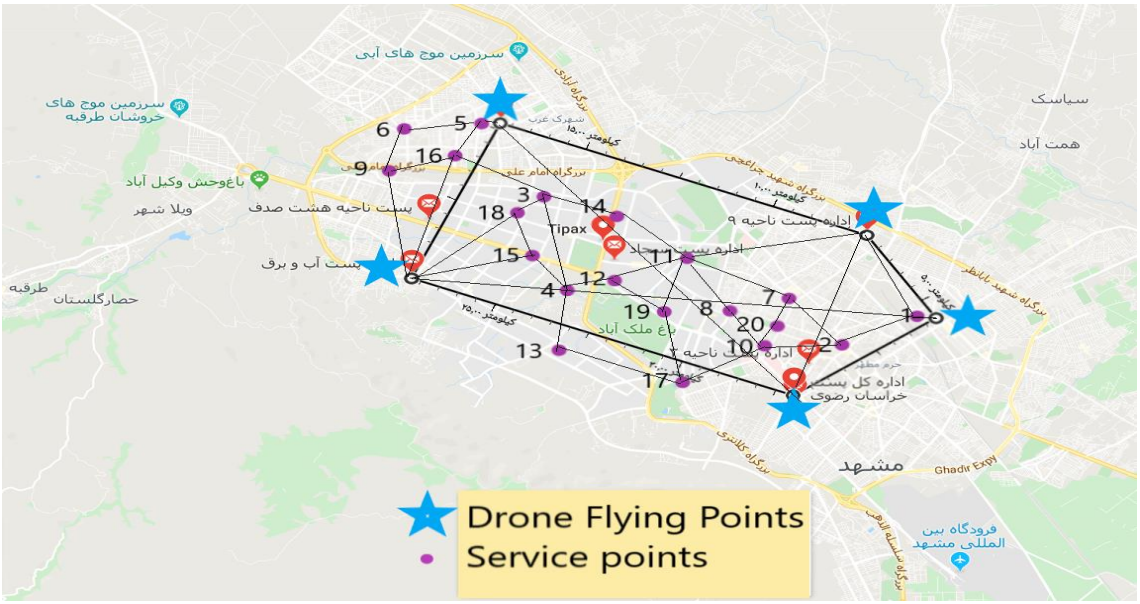


شکل۲. تاثیر دما بر میزان کاهش شارژ




ظرفیت شارژ پهبادها ۵۰۰، تقاضای هر نقطه U=[۳۰،۴۰]، هزینه استفاده از پهباد U=[۱۰۰،۱۵۰]، هزینه بکارگیری پهباد به ازای هر واحد مسافت U=[۱۰،۳۰]، ظرفیت حمل پرواز ۵۰۰، شارژ اولیه ۱۰۰۰۰، میزان شارژ توسط مشتری U=[۱۰۰،۲۰۰]، هزینه شارژ U=[۱۰۰،۲۰۰]، حداقل میزان شارژ ۱۰ و تعداد پهبادها ۸ در نظر گرفته شد. مقدار تابع هدف برای این مساله ۶۴۲ بدست آمد. در شکل ۳ نمایی از منطقه مورد بررسی نشان داده شده است.

شکل۳. نمایی از منطقه مورد نظر




## ۴- نتیجه و جمع‌بندی

در این مقاله ما با ارائه مدلی جدید به دنبال کاهش هزینه‌های سیستم هستیم. جهت اجرای صحیح عملیات حمل بسته توسط پهبادها، مکان‌یابی ایستگاه‌های پرواز انجام شد. شرایط متفاوت برای خدمت‌رسانی پهبادها در نظر گرفته‌شد. برای نزدیک‌تر کردن مدل به واقعیت ما تابع رگرسیونی برای افت شارژ بر اساس دما، سرعت وزش باد و مسافت لحاظ کردیم. در این مساله حرکت پهبادها آزادانه بوده و می‌توانند از یک نقطه به نقطه‌ای دیگر بروند. مساله حل شده در شهر مشهد بین ادارات پست (نقاط اولیه پرواز) و دانشگاه‌ها (تقاضا) می‌باشد و در آن شرایط دنیای واقعی برای این مساله در نظر گرفته شد.

## ۵- مراجع

Dorling Kevin, Heinrichs Jordan, Geoffrey G. Messier, and Magierowski Sebastian. (2016). Vehicle Routing for Drone Problems Delivery:,IEEE Transacttons on Systems and Cybernetics Systems.

Hiermann. G, Puchinger. J, Ropke. S, and Hartl. R. (2016). The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations. Eur. J. Oper. Res, vol. 252, no. 3, pp. 995–1018.

Hsu, J. (2013). Rise of the Drones Unmanned Aircraft Sneak Into the Arctic. http://www.livescience.com/39194-drones-monitor-arctic.html (Last accessed on 2016).

Kim Jin Seon, Gino J.Lim, Jaeyoung Cho. (2018). Drone flight scheduling under uncertainty on battery duration and air temperature. Computers & Industrial Engineering Volume 117, Pages 291-302.

Pulvera Aaron, Weib Ran.(2018). Optimizing the spatial location of medical drones. Applied Geography Volume 90 ,Pages 9-16.

Schneider. M, Stenger A, and Goeke. D.(2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. Transp. Sci., vol. 48, no. 4, pp. 500–520.