

به نام خدا



**Market Code**

**استفاده از مسأله معکوس در استخراج پارامترهای مدل اجزاء محدود یک تیر  
غیریکنواخت به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به منظور استفاده در  
به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود سازه ماهواره‌بر**

	سید احسان حاجی آقا محمد زرباف: کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک	توسعه دهندگان:
	تقی شجاعی: دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک	
سید احسان حاجی آقا محمد زرباف		تهیه کننده مستند:
94 / 04 / 31		تاریخ تنظیم سند:

## فهرست مطالب

### فصل ۱: مروری بر روش مسأله معکوس و کاربرد آن در دینامیک سازه

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- مفهوم مسأله معکوس ..... ۳
- ۱-۲- روش استاندارد حداقل مربعات ..... ۶
- ۱-۲-۲- روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک ..... ۷
- ۳-۱- کاربرد مسائل معکوس در دینامیک سازه ..... ۷
- ۱-۳-۱- داده‌های تجربی در دسترس از هواپیما ..... ۹
- ۲-۳-۱- مدل‌سازی بال‌های هواپیما ..... ۹
- ۳-۳-۱- تعیین توابع هدف و پارامترهای مدل ..... ۱۰
- ۴-۱- هدف از اجرای طرح ..... ۱۰

### فصل ۲: بررسی تحلیلی و اجزاء محدود تیر با خواص جرمی و سختی متغیر در طول

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۶
- ۲-۲- مدل تحلیلی تیر با خواص جرمی و سختی متغیر ..... ۱۶
- ۱-۲-۲- مثال عددی ..... ۲۳
- ۳-۲- مدل اجزاء محدود تیر ناهمگن ..... ۲۵

### فصل ۳: مقدمه‌ای بر روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

- ۱-۳- مقدمه ..... ۲۸
- ۲-۳- ساختار الگوریتم ژنتیک ..... ۲۸
- ۱-۲-۳- کروموزوم ..... ۲۸
- ۲-۲-۳- ژن ..... ۲۹
- ۳-۲-۳- جمعیت ..... ۲۹
- ۴-۲-۳- تابع هدف ..... ۳۰
- ۵-۲-۳- عملگرهای الگوریتم ژنتیک ..... ۳۰
- ۱-۵-۲-۳- عملگر انتخاب ..... ۳۱
- ۱-۱-۵-۲-۳- انتخاب نخه‌گرا ..... ۳۱

۳۲ ..... ۲-۳-۵-۱-۲- انتخاب به روش چرخ رولت

۳۴ ..... ۲-۳-۵-۲- عملگر تلفیق

۳۴ ..... ۲-۳-۵-۲-۱- تلفیق تک نقطه‌ای

۳۵ ..... ۲-۳-۵-۲-۲- تلفیق چند نقطه‌ای

۳۵ ..... ۳-۲-۵-۲-۳- تلفیق یکنواخت

۳۶ ..... ۳-۳-۵-۲- عملگر جهش

۳۷ ..... ۳-۳- روند کلی الگوریتم ژنتیک

۳۸ ..... ۴-۳- حل یک مسأله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک

**فصل ۴: شناسایی پارامترهای مدل اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت به کمک روش مسأله معکوس و روش**

**بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک**

۴۳ ..... ۱-۴- مقدمه

۴۴ ..... ۲-۴- مدل اجزاء محدود تیر با سطح مقطع یکنواخت

۴۸ ..... ۳-۴- **MAC (Modal Assurance Criterion)**

۵۱ ..... ۴-۴- مدل اجزاء محدود تیر با دو سطح مقطع

۵۶ ..... ۵-۴- مدل اجزاء محدود تیر با سه سطح مقطع

۶۰ ..... ۶-۴- مدل اجزاء محدود تیر با چهار سطح مقطع

**فصل ۵: جمع‌بندی**

۶۷ ..... ۱-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۷۱ ..... مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱ دیاگرام مفهومی یک مسأله معکوس ..... ۳
- شکل ۲ دیاگرام مفهومی یک مسأله معمولی ..... ۳
- شکل ۳ نمای شماتیک هواپیمای آموزشی مورد بررسی در مراجع [۱] و [۲] ..... ۸
- شکل ۴ مدل اجزاء محدود بال هواپیما ..... ۹
- شکل ۵ مدل‌سازی سازه‌ی ماهواره بر به کمک تیر غیریکنواخت و توزیع سختی و جرمی در طول مدل ..... ۱۱
- شکل ۶ شناسایی پارامترهای مدل اجزاء محدود یک سازه‌ی واقعی به کمک نتایج حاصل از انجام تست‌های تجربی ..... ۱۳
- شکل ۷ روال استفاده‌شده در این گزارش در استخراج پارامترهای مدل اجزاء محدود یک سازه تحلیلی از نتایج بدست آمده از شبه‌آزمایش ..... ۱۴
- شکل ۸ نمای شماتیک تیر ناهمگن مورد بررسی و نحوه تغییر خواص جرمی و سختی در طول آن ..... ۲۴
- شکل ۹ شکل مودهای مربوط به مودهای  $r=1,2,3$  تیر شکل ۸ ..... ۲۴
- شکل ۱۰ مدل اجزاء محدود یک تیر با شرایط مرزی ساده در دو انتها ..... ۲۵
- شکل ۱۱ یک کروموزوم حاوی مجموعه جواب‌های احتمالی یک تابع هدف با  $n$  متغیر مستقل ..... ۲۹
- شکل ۱۲ نمایش مقادیر ژن‌ها در دستگاه اعداد دودویی در یک کروموزوم ..... ۲۹
- شکل ۱۳ یک جمعیت متشکل از ۵ کروموزوم ..... ۳۰
- شکل ۱۴ چرخ رولت مربوط به فرایند انتخاب جمعیت کروموزوم‌های جدول ۳ به عنوان والد ..... ۳۳
- شکل ۱۵ تلفیق دو کروموزوم به روش تک‌نقطه‌ای ..... ۳۵
- شکل ۱۶ تلفیق دو کروموزوم به روش چندنقطه‌ای ..... ۳۵
- شکل ۱۷ تلفیق دو کروموزوم به روش یکنواخت ..... ۳۶
- شکل ۱۸ اعمال عملگر جهش و ایجاد کروموزوم جدید ..... ۳۶
- شکل ۱۹ فلوجارت الگوریتم ژنتیک ..... ۳۸
- شکل ۲۰ نمای شماتیک از محفظه تحت فشار و متغیرهای طراحی آن ..... ۳۹
- شکل ۲۱ بهترین مقدار تابع هزینه بر حسب نسل، مربوط به ردیف ۲ جدول ۴ ..... ۴۰
- شکل ۲۲ روال استخراج پارامترهای مدل اجزاء محدود یک سازه از نتایج بدست آمده از یک شبه‌آزمایش ..... ۴۳
- شکل ۲۳ مدل اجزاء محدود تیر یکنواخت با پارامتر سختی  $EI$  و پارامتر جرمی  $m$  ..... ۴۴
- شکل ۲۴ بهترین مقدار تابع هزینه بر حسب نسل، مربوط به ردیف ۴ جدول ۷ ..... ۴۶
- شکل ۲۵ مقایسه شکل مود اول تیر ناهمگن مورد بررسی، بدست آمده از مدل اجزاء محدود و مدل تحلیلی ..... ۴۷
- شکل ۲۶ مقایسه شکل مود دوم تیر ناهمگن مورد بررسی، بدست آمده از مدل اجزاء محدود و مدل تحلیلی ..... ۴۷

- شکل ۲۷ مقایسه شکل مود سوم تیر ناهمگن مورد بررسی، بدست آمده از مدل اجزاء محدود و مدل تحلیلی..... ۴۷
- شکل ۲۸ سیستم فنر-جرمی با ۵ درجه آزادی..... ۵۰
- شکل ۲۹ ماتریس معیار MAC سیستم ۵ درجه آزادی شکل ۲۵..... ۵۰
- شکل ۳۰ ماتریس معیار MAC برای ۳ مود اول تیر غیر یکنواخت و تیر اجزاء محدود با یک سطح مقطع..... ۵۱
- شکل ۳۱ مدل اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت با دو سطح مقطع..... ۵۲
- شکل ۳۲ تیر با توزیع جرمی غیر یکنواخت..... ۵۲
- شکل ۳۳ نمودار بهترین مقدار تابع هدف [ بر حسب نسل برای مدل اجزاء محدود تیر با دو سطح مقطع..... ۵۴
- شکل ۳۴ ماتریس معیار MAC برای ۳ مود اول تیر اجزاء محدود با دو سطح مقطع و تیر تحلیلی غیر یکنواخت..... ۵۵
- شکل ۳۵ مقایسه شکل مود اول تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با دو سطح مقطع..... ۵۵
- شکل ۳۶ مقایسه شکل مود دوم تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با دو سطح مقطع..... ۵۵
- شکل ۳۷ مقایسه شکل سوم تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با دو سطح مقطع..... ۵۶
- شکل ۳۸ مدل اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت با سه سطح مقطع..... ۵۷
- شکل ۳۹ نمودار بهترین مقدار تابع هدف [ بر حسب نسل برای مدل اجزاء محدود تیر با سه سطح مقطع..... ۵۸
- شکل ۴۰ ماتریس معیار MAC برای ۳ مود اول تیر اجزاء محدود با سه سطح مقطع و تیر تحلیلی غیر یکنواخت..... ۵۸
- شکل ۴۱ مقایسه شکل مود اول تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با سه سطح مقطع..... ۵۹
- شکل ۴۲ مقایسه شکل مود دوم تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با سه سطح مقطع..... ۵۹
- شکل ۴۳ مقایسه شکل مود سوم تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با سه سطح مقطع..... ۶۰
- شکل ۴۴ مدل اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت با سه سطح مقطع..... ۶۰
- شکل ۴۵ نمودار بهترین مقدار تابع هدف [ بر حسب نسل برای مدل اجزاء محدود تیر با چهار سطح مقطع..... ۶۱
- شکل ۴۶ ماتریس معیار MAC برای ۳ مود اول تیر اجزاء محدود با چهار سطح مقطع و تیر تحلیلی غیر یکنواخت..... ۶۲
- شکل ۴۷ مقایسه شکل مود اول تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با چهار سطح مقطع..... ۶۲
- شکل ۴۸ مقایسه شکل مود دوم تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با چهار سطح مقطع..... ۶۲
- شکل ۴۹ مقایسه شکل مود سوم تیر غیر یکنواخت تحلیلی با مدل اجزاء محدود تیر با چهار سطح مقطع..... ۶۳
- شکل ۵۰ شکل مود سوم تحلیلی و اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت با تعداد سطح مقطع‌های  $N=1,2,3,4$ ..... ۶۳
- شکل ۵۱ شکل مود دوم تحلیلی و اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت با تعداد سطح مقطع‌های  $N=1,2,3,4$ ..... ۶۴
- شکل ۵۲ شکل مود اول تحلیلی و اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت با تعداد سطح مقطع‌های  $N=1,2,3,4$ ..... ۶۴
- شکل ۵۳ الگوریتم استفاده شده در این گزارش جهت شناسایی پارامترهای جرمی و سختی مدل اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک..... ۶۸
- شکل ۵۴ مقدار معیار MAC بر حسب تعداد سطوح مقطع مدل اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت شکل ۸..... ۷۰

## فهرست جدول‌ها

جدول ۱	مشخصات هندسی و مکانیکی تیر مورد بررسی	۲۴
جدول ۲	فرکانس طبیعی سه مود اول خمشی تیر ناهمگن شکل ۵	۲۵
جدول ۳	مقادیر برازندگی و درصد برازندگی ۵ کروموزوم دلخواه تحت یک تابع هدف فرضی	۳۲
جدول ۴	مقادیر $X_1, X_2, X_3$ و $X_4$ و مقادیر تابع هزینه متناظر بدست آمده به روش الگوریتم ژنتیک	۴۰
جدول ۵	مقادیر $X_1, X_2, X_3$ و $X_4$ و مقادیر تابع هزینه متناظر بدست آمده توسط روش‌های بهینه‌سازی مختلف	۴۰
جدول ۶	سه فرکانس طبیعی اول تیر نشان داده شده در شکل ۵، بدست آمده بصورت تحلیلی	۴۵
جدول ۷	مشخصات جرمی و سختی بدست آمده برای تیر اجزاء محدود طی ۵ بار اعمال روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک	۴۵
جدول ۸	مقادیر سه فرکانس طبیعی اول تیر، بدست آمده به روش اجزاء محدود و تحلیلی	۴۶
جدول ۹	مشخصات جرمی و سختی سیستم شکل ۲۵	۵۰
جدول ۱۰	مقدار MAC برای ۳ مود اول تیر غیر یکنواخت و تیر اجزاء محدود با یک سطح مقطع	۵۱
جدول ۱۱	مقادیر مشخصات سختی و جرمی شناسایی شده برای مدل اجزاء محدود تیر با دو سطح مقطع	۵۴
جدول ۱۲	سه فرکانس طبیعی اول تیر تحلیلی و تیر اجزاء محدود با دو سطح مقطع	۵۴
جدول ۱۳	مقادیر مشخصات سختی و جرمی شناسایی شده برای مدل اجزاء محدود تیر با سه سطح مقطع	۵۷
جدول ۱۴	سه فرکانس طبیعی اول تیر تحلیلی و تیر اجزاء محدود با سه سطح مقطع	۵۸
جدول ۱۵	مقادیر مشخصات سختی و جرمی شناسایی شده برای مدل اجزاء محدود تیر با سه سطح مقطع	۶۱
جدول ۱۶	سه فرکانس طبیعی اول تیر تحلیلی و تیر اجزاء محدود با چهار سطح مقطع	۶۱
جدول ۱۷	مقادیر سختی، جرمی و بهترین مقدار تابع هدف، بدست آمده از مدل اجزاء محدود تیر با تعداد سطوح مقطع مختلف	۶۵
جدول ۱۸	قیود استفاده شده در شناسایی پارامترهای مدل اجزاء محدود تیر شکل ۸ با تعداد سطوح مقطع $N=1,2,3,4$	۶۸
جدول ۱۹	نتایج ۵ بار اجرای الگوریتم شکل ۵۳ برای مدل‌های اجزاء محدود تیر با تعداد سطوح مقطع $N=1,2,3,4$	۶۹
جدول ۲۰	فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از مدل اجزاء محدود تیر غیر یکنواخت با تعداد سطوح مقطع $N=1,2,3,4$	۶۹

فصل ۱: مروری بر روش مسأله معکوس و کاربرد آن در دینامیک سازه

MarketCode.ir

یک مسأله معکوس<sup>۱</sup>، مسأله‌ای است که در آن، هدف تبدیل اطلاعات مشاهده‌شده و اندازه‌گیری‌شده از یک سیستم به یک مدل از آن سیستم است به نحوی که مدل مذکور، توانایی بازتولید اطلاعاتی را که بر مبنای آن ایجاد شده‌است را داشته باشد و در عین حال، رفتار سیستم در شرایط خارج از شرایط بررسی‌شده حین ایجاد مدل را پیشگویی کند. به عنوان مثالی از یک مسأله معکوس، می‌توان از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده مربوط به توزیع شتاب جاذبه زمین در یک ناحیه معین از زمین به عنوان اطلاعات مشاهده‌شده از یک پدیده فیزیکی یاد کرد. پدیده فیزیکی در این مسأله توزیع چگالی زمین در ناحیه مذکور است. در این مسأله، از توزیع شتاب جاذبه زمین استفاده می‌شود تا یک مدل فیزیکی از توزیع چگالی زمین در آن ناحیه استخراج شود. به بیان دیگر، در مسائل معکوس، هدف تعیین یک مدل فیزیکی از یک سیستم است به نحوی که توانایی پیشگویی رفتار سیستم مورد بررسی را داشته باشد. در این راستا، از اطلاعاتی که از سیستم مورد بررسی قابل اندازه‌گیری و قابل مشاهده هستند استفاده می‌شود تا پارامترهای مدل ایجاد شده به نحوی انتخاب شوند که اختلاف بین پیشگویی‌های مدل مذکور و اطلاعاتی که از سیستم مذکور در اختیار است کمینه شود. در مثالی که قبلاً به آن اشاره شد، هدف تعیین یک مدل از توزیع چگالی زمین در یک ناحیه خاص می‌باشد. اطلاعاتی که از این سیستم، قابل اندازه‌گیری و قابل مشاهده هستند توزیع شدت میدان گرانش زمین در ناحیه مذکور است. در نتیجه با استفاده از توزیع شدت میدان گرانش زمین در ناحیه مذکور، پارامترهای مدل به نحوی تعیین و تنظیم می‌شوند تا اختلاف پیشگویی مدل ایجاد شده از شدت میدان گرانش زمین با مقادیر واقعی آن (اندازه‌گیری‌شده) در نقاطی از ناحیه مذکور که شدت میدان گرانش زمین بصورت تجربی اندازه‌گیری شده و در اختیار است، کمینه شود. به این ترتیب و با استفاده از اطلاعاتی که به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری می‌باشند (توزیع شدت میدان گرانشی زمین)، به اطلاعاتی خواهیم رسید که به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند (توزیع چگالی زمین در ناحیه مذکور). به علاوه، به مدلی دست پیدا کرده‌ایم که توانایی پیشگویی رفتار سیستم در شرایطی به غیر از شرایطی که مدل سیستم تحت آن تعیین شده است را دارد. در مثال ذکر شده، با در اختیار داشتن شدت میدان گرانش زمین تنها در چند نقطه محدود از ناحیه مدنظر، به مدلی دست پیدا کرده‌ایم که توانایی پیشگویی شدت

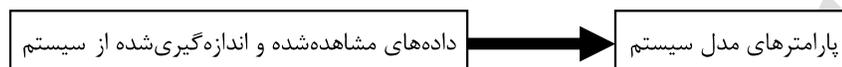
---

<sup>1</sup> Inverse Problem

میدان گرانس زمین در تمامی ناحیه مذکور را دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسائل معکوس جایگاه ویژه‌ای در مباحث کاربردی دارند و از جمله زمینه‌های کاربرد آن‌ها می‌توان به علوم کامپیوتر، آمار، عکس‌برداری آکوستیک از کف اقیانوس، تست‌های غیرمخرب، اخترشناسی و ... اشاره کرد.

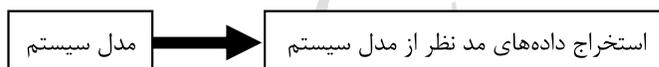
## ۲-۱- مفهوم مسأله معکوس

مفهوم یک مسأله معکوس را می‌توان بصورت شکل ۱ نشان داد.



شکل ۱ دیاگرام مفهومی یک مسأله معکوس

به بیان دیگر، یک مسأله معکوس به عنوان معکوس یک مسأله معمولی<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود که در آن مدل یک پدیده فیزیکی کاملاً مشخص بوده و از مدل مذکور استفاده شده و اطلاعات مدنظر استخراج می‌شود. مفهوم یک مسأله معمولی را می‌توان بصورت شکل ۲ نشان داد.



شکل ۲ دیاگرام مفهومی یک مسأله معمولی

به بیان ریاضی، هدف یک مسأله معکوس، یافتن بهترین پارامترهای مدل،  $m$ ، می‌باشد به نحوی که :

$$d=G(m) \quad (1)$$

که در آن  $G$  یک عملگر است که رابطه بین پارامترهای مدل،  $m$ ، و اطلاعات مشاهده‌شده و اندازه‌گیری‌شده  $d$  از سیستم مورد بررسی را مشخص می‌کند. در بسیاری از متون و مراجع، از  $G$  با نام عملگر مستقیم<sup>۲</sup>، عملگر مشاهده<sup>۳</sup> و تابع مشاهده<sup>۴</sup> یاد می‌شود. لازم به ذکر است که در این گزارش، از این عملگر با نام تابع مشاهده نام برده خواهد شد. با توجه به رابطه (۱)، می‌توان استنباط کرد که تابع مشاهده در واقع معادله حاکم<sup>۵</sup> بر سیستم مورد بررسی است که پارامترهای موجود در مدل سیستم مورد بررسی را به خروجی‌های مدنظر مدل سیستم مربوط می‌کند. در حالیکه با یک مسأله معکوس

<sup>1</sup> Forward Problem

<sup>2</sup> Forward Operator

<sup>3</sup> Observation Operator

<sup>4</sup> Observation Function

<sup>5</sup> Governing Equation

گسسته<sup>۱</sup> مربوط به یک سیستم خطی روبه‌رو هستیم،  $d$  اطلاعات اندازه‌گیری شده از سیستم) و  $m$  (پارامترهای مدل سیستم) هر دو بردار هستند و مسأله معکوس را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$d = Gm \quad (۲)$$

که در آن  $G$ ، یک ماتریس است و ماتریس مشاهده<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. در ادامه و به منظور روشن شدن بحث، مسأله معکوس مربوط به تعیین توزیع چگالی زمین با استفاده از در اختیار داشتن توزیع شدت میدان گرانشی زمین در یک ناحیه معین خواهیم پرداخت. همان‌طور که می‌دانیم، سیستم مورد بررسی در این مثال یک سیستم خطی است و شدت میدان گرانشی زمین در یک نقطه خاص از سطح زمین عبارتست از:

$$d = a = \frac{KM}{r^2} \quad (۳)$$

که در آن،  $a$  شدت میدان گرانشی زمین،  $K$  ثابت جهانی گرانش و  $M$  جرم موضعی<sup>۳</sup> است. به علاوه،  $r$  فاصله نقطه اندازه‌گیری تا جرم موضعی است. به کمک گسسته کردن رابطه (۳)، قادر خواهیم بود که اطلاعات اندازه‌گیری شده مربوط به شدت میدان گرانش زمین در نقاط گسسته ناحیه مورد نظر را به پارامترهای گسسته مدل مورد نظر مربوط کنیم. به عنوان مثال، فرض می‌شود که شدت میدان مغناطیسی مربوط به ۵ نقطه از ناحیه مورد نظر را به کمک اندازه‌گیری تجربی در این نقاط، در اختیار داشته باشیم. در این حالت، بردار داده‌های مسأله،  $d$ ، برداری ستونی با ابعاد  $۵ \times ۱$  می‌باشد. در مقابل، ۵ جرم محلی نامعلوم وجود دارد که هدف تعیین آن‌ها است. در نتیجه می‌توان با ایجاد ارتباط بین ۵ داده معلوم گسسته به ۵ مجهول مسأله، مجهولات مسأله را بصورت زیر تعیین کرد:

$$d = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{Bmatrix}, m = \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_5 \end{Bmatrix} \quad (۴)$$

<sup>1</sup> Discrete

<sup>2</sup> Observation Matrix

<sup>3</sup> Local Mass