

لَا إِلَهَ إِلَّا اللَّهُ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

## تحلیل و کنترل لغزش در جابجایی اجسام در تماس با سطوح هموار توسط انگشتان نرم

رساله دکتری مهندسی مکانیک

امین فخاری

استادهای راهنما

دکتر مهدی کشمیری و دکتر راهنمای دوم



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری رشته مهندسی مکانیک آقای امین فخاری  
تحت عنوان

تحلیل و کنترل لغزش در جابجایی اجسام در تماس با سطوح هموار  
توسط انگشتان نرم

در تاریخ ۱۳۹۴/۱۰/۶ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

- |                        |                  |
|------------------------|------------------|
| ۱- استاد راهنمای رساله | دکتر مهدی کشمیری |
| ۲- استاد راهنمای رساله | دکتر راهنمای دوم |
| ۳- استاد مشاور رساله   | دکتر مشاور اول   |
| ۴- استاد مشاور رساله   | دکتر مشاور دوم   |
| ۵- استاد داور          | دکتر داور اول    |
| ۶- استاد داور          | دکتر داور دوم    |
| ۷- استاد داور          | دکتر داور سوم    |
| ۸- استاد داور          | دکتر داور چهارم  |
| ۹- استاد داور          | دکتر داور پنجم   |

دکتر تحصیلات تکمیلی دانشکده

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

## تشکر و قدردانی

خدایا تو را شاکرم به خاطر امروزم که به من عطا فرمودی...

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه  
(رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقديم به

همسرم به مهربانی فرشته

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
فهرست اشکال	نه
فهرست جداول	ده
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
۱-۱ پیش گفتار	۲
۲-۱ بخش اول	۳
۱-۲-۱ زیربخش اول	۴
فصل دوم: مطالب اصلی	۷
۱-۲ پیش گفتار	۷
۲-۲ بخش اول	۸
۱-۲-۲ زیربخش اول	۹
فصل سوم: نتیجه گیری و پیشنهادها	۱۲
۱-۳ نتیجه گیری	۱۲
۲-۳ پیشنهادها	۱۳
پیوست‌ها	۱۴
پ-۱ جزئیات معادله‌ها	۱۴
پ-۲ اثبات روابط ریاضی	۱۶
مراجع	۱۷

## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: شکل نمونه.....	۳
شکل ۲-۱: قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر، الف) شکل نمونه اول، ب) شکل نمونه دوم .....	۴
شکل ۱-۲: شکل نمونه.....	۸
شکل ۲-۲: قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر، الف) شکل نمونه اول، ب) شکل نمونه دوم .....	۹
شکل پ-۱: تصویر مفهومی .....	۱۶



## فهرست جداول

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
جدول ۱-۱: پارامترهای شبیه‌سازی .....	۵
جدول ۲-۱: مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی .....	۵
جدول ۱-۲: پارامترهای شبیه‌سازی .....	۱۰
جدول ۲-۲: مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی .....	۱۰

## چکیدہ

[illegible]

## کلمات کلیدی

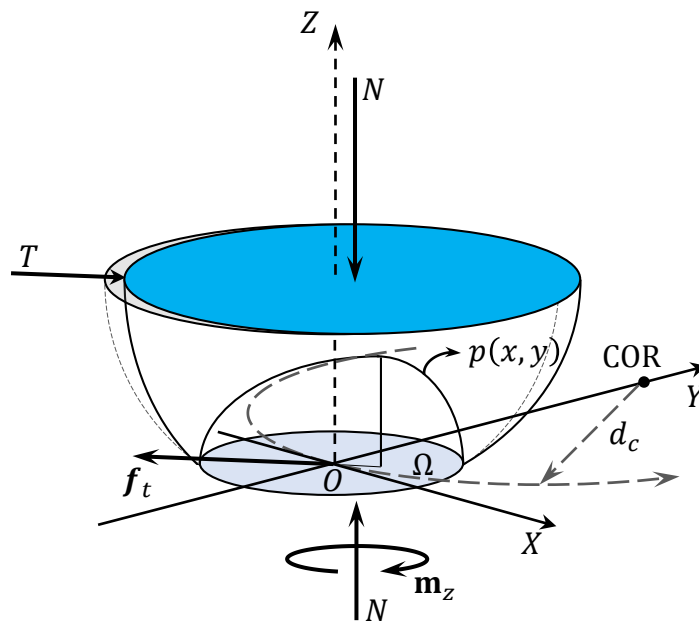
۱- کلمه‌ی کلیدی اوّل، ۲- کلمه‌ی کلیدی دوم، ۳- کلمه‌ی کلیدی سوم، ۴- کلمه‌ی کلیدی چهارم، ۵- کلمه‌ی کلیدی پنجم

## فصل اول

## ۱-۱ پیش گفتار

## ۲-۱ بخش اول

نمونه‌ای از یک عبارت انگلیسی در متن به صورت English Sentence است. نمونه‌ای از یک عبارت ریاضی در متن نیز به صورت  $x^2 + y^2$  است. ارجاع به مراجع انگلیسی [۱، ۲]. ارجاع به مراجع فارسی [۳، ۴]. این نمونه‌ای از یک زیرنویس انگلیسی<sup>۱</sup> است. این نمونه‌ای از یک زیرنویس فارسی<sup>۲</sup> است. در شکل ۱-۱، نمونه‌ای از یک شکل آورده شده است.



شکل ۱-۱ - شکل نمونه

نمونه‌ای از قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر در شکل ۲-۱ آورده شده است.

آیتم‌های مختلف به صورت زیر آورده می‌شود:

- مورد اول

- مورد دوم

- مورد سوم

نمونه‌ای از آیتم‌های شماره‌دار نیز در ادامه آورده شده است. به طور کلی معماری برداشت انرژی به دو دسته‌ی کلی

تقسیم می‌شود:

(۱) برداشت-استفاده:

در این حالت سیستم بلافاصله انرژی برداشت شده را مصرف می‌کند. واضح است اگر انرژی کافی در محیط

وجود نداشته باشد دستگاه از کار می‌افتد. این نوع سیستم‌ها بیشتر در فشار دادن کلیدها، پدال‌ها و دستگاه‌های

<sup>۱</sup>English Footnote

<sup>۲</sup>زیرنویس فارسی

شکل ۱-۲- قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر، الف) شکل نمونه اول، ب) شکل نمونه دوم

(۲) برداشت-ذخیره-استفاده:

### ۱-۲-۱ زیربخش اول

نمونه‌ای از یک رابطه به صورت

$$p(r) = C_k \frac{N}{\pi a^2} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^k \right]^{\frac{1}{k}}, \quad (11)$$

جدول ۱-۱ - پارامترهای شبیه سازی

ضریب اصطکاک		انتهای نرم		اینرسی (Kg <sup>m</sup> <sup>2</sup> )		جرم (Kg)		طول (m)	
$\mu_{01}$	0.10	$c$	6.74e-3	$m_1 l_1^2 / 12$	$I_{c1}$	0.2	$m_1$	0.20	$l_1$
$\mu_{02}$	0.14	$\gamma$	0.0495	$m_2 l_2^2 / 12$	$I_{c2}$	0.2	$m_2$	0.20	$l_2$
		$C_{eq}$	300 (Ns/m)			0.1	$m_o$	0.10	$l_{c1}$
		$\alpha$	0.20					0.10	$l_{c2}$
		$\tau_0$	0.024					0.02	$R$
								0.02	$w$

جدول ۲-۱ - مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی

روش	چگالی انرژی	ابعاد	عیب اصلی
پیزوالکتریک	۳۵/۴ mJ/cm <sup>3</sup>	بزرگ	ولتاژ خروجی کم
الکترومغناطیس	۲۴/۸ mJ/cm <sup>3</sup>	بزرگ	ولتاژ خروجی بسیار کم
الکترواستاتیک	۴ mJ/cm <sup>3</sup>	فشرده در تراشه‌ها	نیاز به منبع شارژ اولیه

است. در رابطه ۱-۱،  $N$  نیروی عمودی است. نمونه‌ای از استفاده از روابط متوالی به صورت

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_s(i) - T \sum_{i=1}^k P_s(i) \leq B_s^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (2-1)$$

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_r(i) - T \sum_{i=1}^k P_r(i) \leq B_r^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (3-1)$$

است. نمونه‌ای از یک قضیه و تبصره نیز در ادامه آورده شده است.

**قضیه ۱-۱.** اگر ظرفیت باتری‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد، جواب بهینه‌ی  $P_s^*(i)$  و  $P_r^*(i)$  وجود دارد به نحوی که

تابع هدف را بیشینه می‌کند و در رابطه‌ی زیر صدق می‌کند:

$$C\left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i)\right) \geq C\left(|h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i)\right) + C\left(|h_{rd}(i+1)|^2 P_r^*(i)\right). \quad (4-1)$$

*اثبات.* بار دیگر فرم تابع هدف را در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است اینجا تابع هدف یک تابع دومتغیره است.

$$R(\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_r) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \min \left\{ C\left(|h_{sr}(i)|^2 P_s(i)\right), C\left(|h_{sd}(i)|^2 P_s(i)\right) \right\}. \quad (5-1)$$

حال بلوک  $i$  ام را در نظر می گیریم. اگر رابطه ی ۴-۱ برای  $i$  برقرار نباشد، به عبارت دیگر اگر داشته باشیم،

$$C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) < C \left( |h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left( |h_{rd}(i+1)|^2 P_r^*(i+1) \right), \quad (6-1)$$

بنابراین

$$C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left( |h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) = C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right). \quad (7-1)$$

پس در تابع هدف مسئله، مقدار بهینه ی مسئله برابر عبارت سمت چپ رابطه ی ۶-۱ شده است و آرگومان دوم و هم چنین مقدار  $P_r^*(i)$  هیچ نقشی در مقدار بهینه ندارد. بنابراین می توانیم  $P_r^*(i)$  را آنقدر کاهش دهیم تا در رابطه ی ۶-۱ تساوی برقرار شود بدون آنکه مقدار بهینه ی مسئله تغییر کند. ■

**تبصره ۱-۱.** از قضیه ی ۱-۱ نتیجه می گیریم که جواب بهینه ی مسئله ی  $P$  در حالت کلی یکتا نیست. به طور مثال وقتی مقدار انرژی برداشت شده در رله خیلی بیشتر از این انرژی در منبع باشد مسئله می تواند جواب های زیادی داشته باشد. بنابراین همواره می توان برای صرفه جویی در مصرف انرژی، بدون کاهش مقدار نرخ گذردهی سیستم، کمترین مقدار توان را برای رله انتخاب کرد. بنابراین با توجه به رابطه

$$C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) \geq C \left( |h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left( |h_{rd}(i)|^2 P_r^*(i) \right), \quad (8-1)$$

و با استفاده از رابطه ۸-۱ خواهیم داشت،

$$R_r(i) = \min \left\{ C \left( |h_{rd}(i)|^2 P_r(i) \right), C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s(i) \right) \right\}. \quad (9-1)$$

بنابراین می توان با انتخاب کمترین توان و نرخ برای رله از مصرف بی رویه ی انرژی جلوگیری کرد. فرض بزرگ بودن ظرفیت باتری به این دلیل است که اگر ظرفیت باتری محدود باشد برای کاهش  $P_r^*(i)$  با محدودیت مواجه هستیم. چون در صورت کاهش بی از حد توان رله ممکن است از ناحیه ی شدنی مسئله خارج شویم. به هر حال برای هر دو حالت ظرفیت نامحدود و محدود باتری جواب مسئله یکتا نیست و همواره می توان با کاهش توان رله مصرف انرژی را کاهش داد.

## فصل دوم

### مطالب اصلی

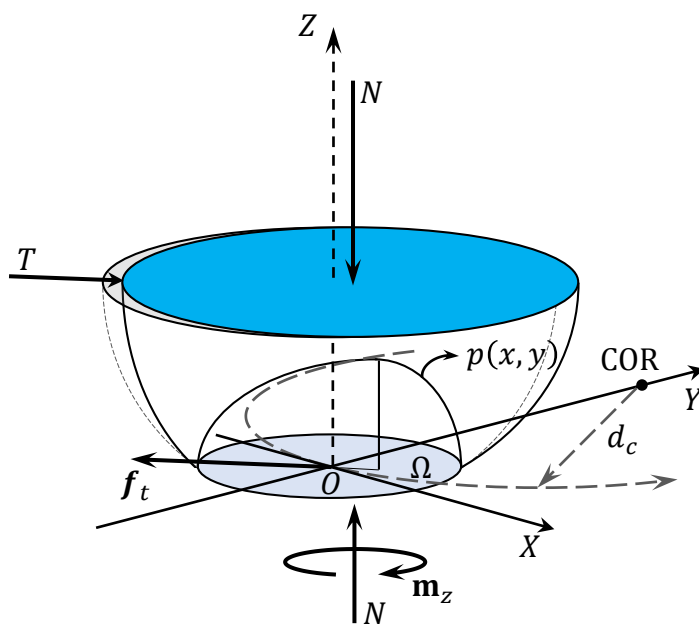
## ۱-۲ پیش گفتار

[illegible]



## ۲-۲ بخش اول

نمونه‌ای از یک عبارت انگلیسی در متن به صورت English Sentence است. نمونه‌ای از یک عبارت ریاضی در متن نیز به صورت  $x^2 + y^2$  است. ارجاع به مراجع انگلیسی [۱، ۲]. ارجاع به مراجع فارسی [۳، ۴]. این نمونه‌ای از یک زیرنویس انگلیسی<sup>۱</sup> است. این نمونه‌ای از یک زیرنویس فارسی<sup>۲</sup> است. در شکل ۱-۲، نمونه‌ای از یک شکل آورده شده است.



شکل ۱-۲ - شکل نمونه

نمونه‌ای از قرار دادن دو شکل در کنار یکدیگر در شکل ۲-۲ آورده شده است.

آیتم‌های مختلف به صورت زیر آورده می‌شود:

- مورد اول

- مورد دوم

- مورد سوم

نمونه‌ای از آیتم‌های شماره‌دار نیز در ادامه آورده شده است. به طور کلی معماری برداشت انرژی به دو دسته‌ی کلی

تقسیم می‌شود:

(۱) برداشت-استفاده:

در این حالت سیستم بلافاصله انرژی برداشت شده را مصرف می‌کند. واضح است اگر انرژی کافی در محیط

وجود نداشته باشد دستگاه از کار می‌افتد. این نوع سیستم‌ها بیشتر در فشار دادن کلیدها، پدال‌ها و دستگاه‌های

<sup>۱</sup>English Footnote

<sup>۲</sup>زیرنویس فارسی



جدول ۱-۲ - پارامترهای شبیه سازی

ضریب اصطکاک		انتهای نرم		اینرسی (Kg <sup>m</sup> <sup>2</sup> )		جرم (Kg)		طول (m)	
$\mu_{01}$	0.10	$c$	$6.74e-3$	$m_1 l_1^2 / 12$	$I_{c1}$	$m_1$	0.2	$l_1$	0.20
$\mu_{02}$	0.14	$\gamma$	0.0495	$m_2 l_2^2 / 12$	$I_{c2}$	$m_2$	0.2	$l_2$	0.20
		$C_{eq}$	300 (Ns/m)			$m_o$	0.1	$l_{c1}$	0.10
		$\alpha$	0.20					$l_{c2}$	0.10
		$\tau_0$	0.024					$R$	0.02
								$w$	0.02

جدول ۲-۲ - مقایسه‌ی روش‌های برداشت انرژی مبتنی بر لرزش‌های مکانیکی

روش	چگالی انرژی	ابعاد	عیب اصلی
پیزوالکتریک	$35/4 \text{ mJ/cm}^3$	بزرگ	ولتاژ خروجی کم
الکترومغناطیس	$24/8 \text{ mJ/cm}^3$	بزرگ	ولتاژ خروجی بسیار کم
الکترواستاتیک	$4 \text{ mJ/cm}^3$	فشرده در تراشه‌ها	نیاز به منبع شارژ اولیه

است. در رابطه ۱-۲،  $N$  نیروی عمودی است. نمونه‌ای از استفاده از روابط متوالی به صورت

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_s(i) - T \sum_{i=1}^k P_s(i) \leq B_s^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (2-2)$$

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_r(i) - T \sum_{i=1}^k P_r(i) \leq B_r^{max}, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (3-2)$$

است. نمونه‌ای از یک قضیه و تبصره نیز در ادامه آورده شده است.

**قضیه ۱-۲.** اگر ظرفیت باتری‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد، جواب بهینه‌ی  $P_s^*(i)$  و  $P_r^*(i)$  وجود دارد به نحوی که

تابع هدف را بیشینه می‌کند و در رابطه‌ی زیر صدق می‌کند:

$$C\left(|h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i)\right) \geq C\left(|h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i)\right) + C\left(|h_{rd}(i+1)|^2 P_r^*(i)\right). \quad (4-2)$$

*اثبات.* بار دیگر فرم تابع هدف را در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است اینجا تابع هدف یک تابع دومتغیره است.

$$R(\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_r) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \min \left\{ C\left(|h_{sr}(i)|^2 P_s(i)\right), C\left(|h_{sd}(i)|^2 P_s(i)\right) \right\}. \quad (5-2)$$

حال بلوک  $i$  ام را در نظر می گیریم. اگر رابطه ی ۴-۲ برای  $i$  برقرار نباشد، به عبارت دیگر اگر داشته باشیم،

$$C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) < C \left( |h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left( |h_{rd}(i+1)|^2 P_r^*(i+1) \right), \quad (۶-۲)$$

بنابراین

$$C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left( |h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) = C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right). \quad (۷-۲)$$

پس در تابع هدف مسئله، مقدار بهینه ی مسئله برابر عبارت سمت چپ رابطه ی ۶-۲ شده است و آرگومان دوم و هم چنین مقدار  $P_r^*(i)$  هیچ نقشی در مقدار بهینه ندارد. بنابراین می توانیم  $P_r^*(i)$  را آنقدر کاهش دهیم تا در رابطه ی ۶-۲ تساوی برقرار شود بدون آنکه مقدار بهینه ی مسئله تغییر کند. ■

**تبصره ۱-۲.** از قضیه ی ۱-۲ نتیجه می گیریم که جواب بهینه ی مسئله ی  $P$  در حالت کلی یکتا نیست. به طور مثال وقتی مقدار انرژی برداشت شده در رله خیلی بیشتر از این انرژی در منبع باشد مسئله می تواند جواب های زیادی داشته باشد. بنابراین همواره می توان برای صرفه جویی در مصرف انرژی، بدون کاهش مقدار نرخ گذردهی سیستم، کمترین مقدار توان را برای رله انتخاب کرد. بنابراین با توجه به رابطه

$$C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s^*(i) \right) \geq C \left( |h_{sd}(i)|^2 P_s^*(i) \right) + C \left( |h_{rd}(i)|^2 P_r^*(i) \right), \quad (۸-۲)$$

و با استفاده از رابطه ۸-۲ خواهیم داشت،

$$R_r(i) = \min \left\{ C \left( |h_{rd}(i)|^2 P_r(i) \right), C \left( |h_{sr}(i)|^2 P_s(i) \right) \right\}. \quad (۹-۲)$$

بنابراین می توان با انتخاب کمترین توان و نرخ برای رله از مصرف بی رویه ی انرژی جلوگیری کرد. فرض بزرگ بودن ظرفیت باتری به این دلیل است که اگر ظرفیت باتری محدود باشد برای کاهش  $P_r^*(i)$  با محدودیت مواجه هستیم. چون در صورت کاهش بی از حد توان رله ممکن است از ناحیه ی شدنی مسئله خارج شویم. به هر حال برای هر دو حالت ظرفیت نامحدود و محدود باتری جواب مسئله یکتا نیست و همواره می توان با کاهش توان رله مصرف انرژی را کاهش داد.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

[illegible]

[illegible]

پیوست‌ها

**پ-۱ جزئیات معادلہا**

[illegible]







## مراجع

- [1] Fakhari, A., Keshmiri, M., and Kao, I., "Development of realistic pressure distribution and friction limit surface for soft-finger contact interface of robotic hands", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, pp. 1–12, 2015.
- [2] Lewis, F., Dawson, D., and Abdallah, C. *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. Automation and Control Engineering, CRC Press, 2003.
- [۳] فخاری، ا و کشمیری، م، "مدل سازی دینامیکی لغزش در گرفتن و جابجایی اجسام توسط انگشتان نرم"، *مهندسی مکانیک مدرس*، جلد ۱۵، شماره ۸، صص ۳۳۲–۳۴۰، ۱۳۹۴.
- [۴] هادیان جزی، ش. *دینامیک و کنترل فرآیند گرفتن و تعقیب مسیر یک جسم توسط بازوهای همکار صفحه ای در حضور نامعینی*. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، رساله دکتری، ۲۰۰۸.

# Slippage Analysis and Control in Manipulation of Objects in Contact with Even Surfaces Using Soft Fingers

Amin Fakhari

a.fakhari@me.iut.ac.ir

December 27, 2015

Department of Mechanical Engineering

Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

Degree: Doctor of Philosophy (PhD)

Language: Farsi

**Supervisors:** Mehdi Keshmiri, Prof., [user1@cc.iut.ac.ir](mailto:user1@cc.iut.ac.ir).

**Second Supervisor, Prof., user2@cc.iut.ac.ir.**

## Abstract

[illegible]

## Keywords

1- First Keyword, 2- Second Keyword, 3- Third Keyword, 4- Fourth Keyword, 5- Fifth Keyword



**Isfahan University of Technology**

Department of Mechanical Engineering

## **Slippage Analysis and Control in Manipulation of Objects in Contact with Even Surfaces Using Soft Fingers**

A Thesis

Submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy (PhD)

**By**

**Amin Fakhari**

Evaluated and Approved by the Thesis Committee, on December 27, 2015

- 1- Mehdi Keshmiri, Prof. (Supervisor)
- 2- Second Supervisor, Prof. (Supervisor)
- 3- First Advisor, Assoc. Prof. (Advisor)
- 4- Second Advisor, Assist. Prof. (Advisor)
- 5- First Examiner, Prof. (Examiner)
- 6- Second Examiner, Prof. (Examiner)
- 7- Third Examiner, Prof. (Examiner)
- 8- Fourth Examiner, Prof. (Examiner)
- 9- Fifth Examiner, Prof. (Examiner)

Department Graduate Coordinator: Dean, Prof.