

מערכות תורים עם שרתים הטרונגניים: ניתוב הוגן של מאושפזים בחדרי מיון

חיבור על מחקר

לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת התואר
מגיסטר למדעים בחקר ביצועים וניתוח מערכות

יוליה צייטלין

הוגש לסנט הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
ניסן תשס"ט חיפה אפריל 2009

תודות

המחקר נעשה בהנחיית פרופסור אבישי מנדלבאום בפקולטה להנדסת תעשייה וניהול. אני מודה לו מקרב לב על השעות הרבות שהשקיע בתהליך ההנחיה האיכותית, על העזרה והתמיכה לאורך כל הדרך. זכיתי ללמוד ולעבוד בהנחיית מדען בעל הישגים, מורה מסור ואדם מתחשב.

החלק המעשי של מחקרי בוצע בבית חולים רמב"ם. אני מודה לקוסטה אלקין ונגה רוזנברג שמהפריקט שלהם בבית החולים החלה היכרותי עם העולם של מחקרי ברצוני להודות לאנשים רבים ברמב"ם, ובראש ובראשונה לגברת מירה שילוח – מנהלת הסיעוד במלר"ד ובמחלקות הפנימיות, על עזרתה הרבה ועל סיועה ביצירת הקשר עם אנשי המפתח בבית החולים. אני מודה להנהלת בית החולים, ובמיוחד לד"ר ירון בראל – מנהל תפעול רפואה, על עזרתו בעניינים מנהלתיים. תודה לצוות המלר"ד והמחלקות הפנימיות, וביניהם לד"ר זאהר עזאם – סגן מנהל האגף הפנימי ומנהל פנימית ב', על נכונותם לשתף ידע ועל כך כי הפכו את ביקוריי בבית החולים למרתקים. תודה מיוחדת למר יוסי לוי על עזרתו הרבה באיסוף הנתונים. כמו כן ברצוני להודות לאנשי הקשר בחמישה בתי חולים נוספים: לפרופסור שטרן – בהדסה הר הצופים, לדוקטור הלפרן – באיכילוב, לדוקטור הארון – בנהרייה, לגברת לבבי – בכרמל, ולדוקטור אשקר – בהלל יפה, על שיתוף הפעולה והעזרה.

אני מודה מקרב לב לפרופסור חיה כספי על עזרתה בניתוח התיאורטי. כמו כן, תודות מגיעות לפרופסור מור ערמוני ולפרופסור פטר מומצי'לוביץ' על הדיונים הרבים שעזרו במחקרי. במהלך התואר זכיתי להיות שותפה בשני פרויקטי מחקר; אני מודה לשותפיי לפרויקטים האלו: גלית יום-טוב, יריב מרמור ואסף צבירן. תודות נוספות מגיעות לפולינה חודיאקוב ושמרית ממן. כמו כן אני מודה לפרופסור מיכל פן על הנחייתה בפרויקט בקורס "תכנון וניתוח מערכות".

לבסוף, אני מודה לטכניון על התמיכה הכספית הנדיבה בהשתלמותי. אני מודה מקרב לב ל-British Technion Society Graduate Fellowship, ל-Forchheimer Foundation Fellowship ול-Jarndyce Foundation Fellowship. תודות נוספות מגיעות לפרויקט משותף של יב"מ – רמב"ם – טכניון, OCR, על עזרתו הכלכלית הנדיבה ומתן סביבה תומכת לביצוע המחקר. ברצוני להודות למכון הלאומי לחקר שירותי הבריאות ומדיניות הבריאות על תמיכתו הכלכלית הנדיבה.

תקציר

מבוא :

מתודולוגיות של חקר ביצועים, וניתוח התורים בפרט, הוכיחו את עצמן כיעילות במתן תובנות חשובות לאסטרטגיות תפעוליות ומנהליות, ובפיתוח פתרונות לבעיות רבות בתחום שרותי הבריאות. במחקרנו אנו בוחנים את תהליכי זרימת המאושפזים בבתי חולים, תוך התמקדות בתהליך ניתוב חולים מהמחלקה לרפואה דחופה (מלר"ד, או חדר מיון) לארבע מחלקות אשפוז פנימיות, בבית חולים אנונימי. תיתכנה לפחות שתי בעיות עיקריות בתהליך: זמני ההמתנה במלר"ד, של חולים שהוחלט על אשפוזם, עד להעברתם למחלקות יכולים להיות ארוכים מדי, והקצאת החולים למחלקות אינה בהכרח הוגנת.

בעיות בתהליך ניתוב החולים מהמלר"ד למחלקות הפנימיות :

מנתונים אמפיריים שנתקבלו ממערכת המידע של בית החולים, אנו למדים כי ממוצע הזמן שעובר בין הקצאת החולה למחלקה פנימית כלשהי לבין הטיפול הראשון של החולה במחלקה זו הנו כ- 3.1 שעות (הנתונים נותחו על התקופה: 1/05/2006-30/10/2008). המתנות ארוכות אלו גורמות לעומס במלר"ד וכתוצאה מכך לעיכובים בטיפול בחולים חדשים. הן גורמות גם לאי-נוחות רבה לחולים הממתינים, שמקבלים לכן במלר"ד טיפול פחות מקצועי וממוקד מאשר היו מקבלים במחלקות האשפוז – וכך פוגעות באיכות הטיפול הרפואי ובשביעות רצון החולים, ועלולות אף להביא להידרדרות במצבם הקליני.

ארבעת המחלקות הפנימיות (המסומנות א'-ד') מספקות שירותים רפואיים דומים, אך נבדלות במספר המיטות, גודל הצוות וזמני שהיית המאושפזים בהן. כך מחלקה ב', שמספר המיטות בה מהווה כשני שליש שליש ממספר המיטות במחלקות האחרות, מאופיינת בזמני אשפוז קצרים יותר מאשר במחלקות האחרות (ממוצע של 4.5 ימים מול 5.4-6.4 ימים במחלקות א', ג', ד'). מנתונים אמפיריים (על אותה תקופה 1/05/2006-30/10/2008), אנו למדים כי מחלקה ב' חשופה לעומס גבוה יותר ביחס למחלקות האחרות; עומס זה מתבטא הן ברמת תפוסה גבוהה והן במספר מאושפזים פר מיטה שהוא משמעותית גדול יותר. איכות הטיפול במחלקה ב' (המוערכת בעזרת שיעור חולים חוזרים לאשפוז ושביעות רצון המטופלים) אינה נמוכה מבמחלקות האחרות. ניתן להסיק כי המחלקה היעילה ביותר "נענשת" בכך שהעומסים על צוותה הרפואי והסיעודי גבוהים יותר. חלוקת עומס הוגנת בין מחלקות האשפוז תעלה את שביעות רצונם של צוותי המחלקות ותעודד אותם לשיתוף פעולה והתייעלות.

מלבד המחקר המעמיק של תהליך ניתוב החולים מהמלר"ד למחלקות הפנימיות, שביצענו בבית החולים האנונימי, למדנו את התהליך הנ"ל בחמישה בתי חולים נוספים בארץ. הלמידה נעשתה בעזרת שאלונים שהופנו למנהלי המלר"ד ומהם הוסקו הן מידע כללי על תהליך הניתוב והן נתונים תפעוליים כמותיים. בתי החולים שנחקרו נבדלו בגודלם, במיקומם הגיאוגרפי, בעומס על המחלקות הרלוונטיות וביעילות המחלקות, אך בכולם (מלבד בית חולים אחד) אובחנו בעיות דומות לבית החולים שלנו: זמני המתנה ארוכים ומדיניות ניתוב לא הוגנת.

המתואר לעיל הניע אותנו למדל את תהליך ניתוב החולים מהמלר"ד למחלקות הפנימיות כמערכת תורים עם קבוצות הטרוגניות של שרתים הומוגניים (דהיינו משכי השירות בעלי התפלגות שונה בין קבוצות, וזהה לשרתים בקבוצה); כל קבוצת שרתים מייצגת מחלקה פנימית, השרתים בה המיטות במחלקה, וזמני שירות הלקוחות הם משכי אשפוז החולים. אנו מנתחים את המערכת תחת ארכיטקטורות תורים ומדיניות ניתוב שונות, בחיפוש אחר מדיניות ניתוב הוגנת שמביאה לביצועים תפעוליים טובים (זמני המתנה קצרים).

מערכת- Λ :

מערכת התורים המתוארת לעיל, עם תור מרכזי יחיד, מהווה **מערכת V הפוכה (מערכת- Λ)**, שטופלה רבות בספרות תחת אסטרטגיות ניתוב שונות. מדיניות (FSF) Fastest Servers First, המנתבת לקוח לשרת המהיר ביותר מבין השרתים הפנויים, ממזערת אסימפטוטית את זמן ההמתנה הממוצע בתור, בתחום התפעולי מש"י – מכוון שירות ויעילות (שמתואר בהמשך), אך אינה הוגנת כלפי שרתים מהירים [3]. מדיניות הוגנת יותר, Longest Idle-Server First, מנתבת לקוח לשרת שעבורו הזמן שעבר מרגע סיום השירות האחרון הוא הארוך ביותר, מבין כל השרתים הפנויים [5],[7]. אסטרטגיות אלו אינן מתאימות בהכרח לתהליך ניתוב מאושפזים.

אנו מציעים מדיניות **RMI Randomized Most-Idle** (RMI) המנתבת לקוח לאחת מקבוצות השרתים הפנויות בהסתברות ששווה לפרופורציית מספר השרתים הפנויים בקבוצה מתוך סך השרתים הפנויים במערכת, או לתור המתנה מרכזי - במקרה שכל השרתים עסוקים. היות והשרתים בכל קבוצה סימטריים, מדיניות זו שקולה לבחירה אקראית של השרת מתוך כל השרתים הפנויים. מערכת- Λ תחת RMI מהווה תהליך קפיצה מרקובי **הפיך**, שניתן לניתוח אנליטי במצב יציב, בצורה סגורה. הניתוח במצב יציב מוביל לתובנה תפעולית מעניינת: שרתים מהירים עובדים פחות משרתים איטיים (נצילותם נמוכה יותר), אך משרתים יותר לקוחות מהשרתים האיטיים (מספר הלקוחות המקבלים שירות ליחידת זמן, **השטף**, גדול יותר). אנו בוחנים גם נושאים מעניינים נוספים, כגון השפעת הוספת שרת איטי על אורך התור וזמני המתנה; ומחשבים ביטויים סגורים למדדים תפעוליים (כגון, ההסתברות להמתנה, התפלגות זמן ההמתנה ואורך התור) במצב יציב.

מהניתוח במצב יציב אנו עוברים לניתוח אסימפטוטי של מערכת V הפוכה תחת מדיניות RMI, בתחום התפעולי (QED) Quality and Efficiency Driven - מכוון שירות ויעילות (מש"י), בו היעילות מאוזנת עם איכות השירות. הניתוח האסימפטוטי מוביל לפישוט הנוסחאות של המדדים התפעוליים, כגון ההסתברות להמתנה במערכת. בנוסף, בעזרת הניתוח האסימפטוטי מופקת תובנה חשובה לגבי היחס בין מספר השרתים הפנויים בקבוצות השונות [39], אשר מצביעה על הוגנות בניתוב RMI.

חסרונה של מדיניות RMI הוא בהיותה מבוססת-אקראיות, שהיא תכונה לא טבעית בסביבת בתי חולים. על כן אנו בוחנים מדיניות אלטרנטיבית **(WMI) Weighted Most-Idle**. מדיניות זו מנתבת לקוח לקבוצת שרתים שבה מספר השרתים הפנויים, המוכפל במשקל הקבוצה, הוא

מכסימלי. אנו משווים בין RMI ל- WMI בתחום האסימפטוטי מש"י, לפי מדדי הוגנות וטיב תפעולי שונים; הניתוח מאומת על-ידי סימולציות.

תורים מבוזרים סופיים (תמ"ס):

ארכיטקטורת תורים נוספת שנחקרה על-ידנו היא **תורים מבוזרים סופיים (תמ"ס)**. כאן לכל קבוצת שרתים יש תור משלה (להבדיל מהתור המרכזי היחיד של מערכת- Λ), וקיבולתו סופית. במערכת זו אנו מציעים מדיניות ניתוב אנלוגית ל- RMI, שמנתבת לקוח לקבוצת שרתים בהסתברות השווה לפרופורציית מספר המקומות הפנויים (שרתים פנויים + מספר מקומות פנויים בתור) בקבוצה זו מתוך סך המקומות הפנויים במערכת. מערכת תמ"ס תחת RMI גם היא מהווה תהליך קפיצה מרקובי הפיך שאנו מנתחים במצב יציב. מערכת תמ"ס מדמה בצורה מדויקת יותר את תהליך העברת החולים מהמלר"ד למחלקות הפנימיות מאשר מערכת- Λ , אך היא קשה יותר לניתוח אנליטי.

ניתוח בעזרת סימולציות:

המודלים התיאורטיים שנבחנו מובילים לתובנות יישומיות חשובות, אך אינם יכולים למדל את המציאות המורכבת בצורה מדויקת. במטרה לשקף תכונות נוספות הקשות לפתרון אנליטי, כגון הגעות למערכת לפי תהליך פואסון לא הומוגני בזמן, או מדיניות ניתוב מורכבות, אנו ממדלים את תהליך ניתוב המאושפזים מהמלר"ד למחלקות הפנימיות בבית חולים אנונימי באמצעות סימולציה ממוחשבת (בתוכנת Matlab), בפרויקט משותף עם אסף צבירן [52].

בעזרת הסימולציה אנו משווים בין אסטרטגיות ניתוב שונות לפי קריטריוני הוגנות וביצועים תפעוליים שונים, תוך התחשבות בזמינות המידע במערכת. אנו מציעים אלגוריתם המאזן בין שתי דרישות מנוגדות: איזון רמת התפוסה בין המחלקות ואיזון מספר המאושפזים פר מיטה (שטף) בין המחלקות; שתי הדרישות משקפות את איזון העומס בין המחלקות. האלגוריתם יוצר הקצאת מאושפזים הוגנת כלפי המחלקות ומוביל לביצועים תפעוליים טובים (כגון זמני המתנה קצרים). מידול אלגוריתם זה במערכת עם מידע חלקי, בה תפוסת המחלקות אינה ידועה בעת הניתוב למקבל ההחלטות, אלא מעודכנת פעם אחת ביום ומוערכת בהתאם, לא גורע מאיכות תוצאותיו. (רמה זו של זמינות מידע אכן תקפה במלר"ד, המקבל עדכון אחד ביום על מצב התפוסה של המחלקות הפנימיות).

תורת המשחקים:

לבסוף, אנו בוחנים את תהליך ניתוב המאושפזים מהיבט תורת המשחקים. אנו מתייחסים למחלקות הפנימיות כאל **שחקנים** שיכולים להתאחד ל**קואליציות** ובכך ליצור מערכת יעילה יותר. **פונקציית העלות** של כל קואליציה היא אורך התור הממוצע במערכת התורים שקואליציה זו יוצרת. אנו מחלקים את עלות הקואליציה, בה כל השחקנים (מחלקות) שותפים, בין השחקנים, בעזרת שיטת **ערך Shapley**, וזאת על מנת ללמוד את מידת האחריות היחסית על העומס במערכת שכל מחלקה נושאת בה. שיטה זו יכולה לסייע ליצור מערכת תמריצים למחלקות, אשר תעודד את יעילותן וקיצור משכי האשפוז בהן.