



בטיחות רשתות סמסטר א' תשפ"ד

הנחיות לעבודת גמר בקורס:

העבודה מורכבת משני שלבים:

- שלב א': כתיבת סימולטור לרשת תקשורת המבוסס על החומר הנלמד בהרצאות.**
בהמשך המסמך מצורפים הסברים להכנת הסימולטור בצירוף שאלות עליהן אתם מתבקשים לענות.
- שלב ב': בחירת נושא העבודה הכולל אלגוריתם שביצועו ייבחן על סימולטור הרשת שהכנתם בשלב א'.**
בהמשך המסמך מצורפים הסברים ומאמרים לבחירה לשם שלב ב'.

הנחיות לגבי חלוקה לקבוצות לביצוע פרויקט הגמר:

- מספר הסטודנטים בכל קבוצה בביצוע עבודת הגמר הוא ארבע. יש אפשרות לבנות קבוצות גדולות יותר כאשר החמישי הוא במילואים.
קבוצות קטנות יותר אשר כרגע משובצות להגשת המעבדות יכולות להגיש גם את עבודת הגמר. בכל מקרה מספר הקבוצות לא יעלה על 15.
- גלו מעורבות חברתית בחלוקה לקבוצות, כך שכל הסטודנטים משובצים לקבוצות, בפרט משרתי המילואים. מי שלא מצליח להשתבץ, ובפרט מי שבמילואים ולא מצליח, אנא שלחו אליי מייל בהקדם ואני אשבץ אתכם לקבוצות.
- משימות בעבודת הגמר יכולות להתבצע במשותף, או על ידי חלוקת משימות בתוך קבוצה. יש לכם חופש כיצד לנהל את אופן ביצוע העבודה. אם חילקתם אחריות על משימות ביניכם, פרטו את חלוקת העבודה וביצוע האינטגרציה ביניכם בדוח המוגש. אמנם, שימו לב כי כל אחד מחברי הקבוצה צריך להיות בקיא בכל חלקי העבודה שהתבצעה.

הנחיות לבחירת נושא העבודה בשלב השני:

- בהמשך המסמך מצורפת רשימת מאמרים לעבודת הגמר בקורס. כל קבוצת סטודנטים תקבל מאמר אחד עבורו תבצע את עבודת הגמר. הנכם מתבקשים לעיין במאמרים ולשלוח לי מייל עם דירוג לפי העדפתכם.
- חלוקת המאמרים תתבצע בהתאם לדירוג שתשלחו לפי כל הקודם זוכה. לכן כדאי לציין במייל שאתם שולחים דירוג לכמה מאמרים לפי העדפתכם.

מבנה העבודה:

העבודה תוגש בעברית במערכת מודל על ידי כל אחד מהסטודנטים, לא יאוחר משבוע לפני מועד בחינת הבקאות בעל פה, ותהיה מורכבת מראשי הפרקים הבאים:

פרק ראשון: מענה על שלב א' של העבודה:

פרק זה יכלול מענה על שלב א' של העבודה הכולל תאור סימולטור הרשת שבניתם, ותשובות לשאלות המצורפות.

פרק שני: מענה על שלב ב' של העבודה אשר יכתב בראשי הפרקים הבאים:

- תקציר – תקציר בן עמוד אחד המסכם את הנקודות המרכזיות בעבודה. התקציר דומה במבנהו לתקציר במאמר, אך לא העתק. הבליטו נקודות חשובות ותוצאות מרכזיות. נסחו בשפה נגישה לקורא והבהירו נקודות לא ברורות. פרטו על אופן העבודה בין חברי הקבוצה.
- הקדמה: ההקדמה תכלול את תת-פרקים הבאים:
 - א. תיאור כללי של הבעיה.
 - ב. תוצאות עיקריות – מהם התוצאות המרכזיות במאמר שבחנתם? מה המאמר חידש ביחס למה שהיה ידוע בתחום עד כה? (התייחסו לעבודות קודמות הקשורות ביותר

- לבעיה הנפתרת במאמר זה), מהם הקשיים שמאמר זה מתמודד איתם על מנת לפתור את הבעיה ביחס לעבודות קודמות?
3. מודל המערכת וניסוח הבעיה – מודל הרשת\מערכת שבמאמר הנבחר, הנחות שנעשות במאמר, וניסוח הבעיה בצורה מדויקת. באם יש הבדלים\הנחות מקלות\מקשות שראוי לציין ביחס לעבודות קודמות שנעשו (בפרט, ביחס לעבודות שסקרתם בפרק "תוצאות עיקריות") ציינו אותם. הערה – יתכנו הבדלים בין הסימולטור שבניתם לבין הנחות המודל במאמר. התייחסו אליהם אם קיימים.
 4. פתרונות לבעיה – חלק זה יכלול ראשי פרקים שינסחו כלשונכם, למשל אלגוריתמים מוצעים לפתרון הבעיה, ניתוח ביצועים, וכו'. עבור טענות מתמטיות, אתם נדרשים להציג אותן, אך אין צורך לפרט הוכחות.
 5. תוצאות סימולציה – מימוש ודיווח של תוצאות סימולציה עבור האלגוריתמים שהוצעו. צרפו גרפים ודיון על התוצאות בגוף העבודה. השוו בין התוצאות המדווחות במאמר לעומת התוצאות שקיבלתם בסימולטור שלכם. בנוסף, אתם מתבקשים להגיש בנפרד קבצים לקוד עבור הסימולציות שיצרתם. הקוד צריך להיות מתועד, נוח לקריאה, ונוח להרצה על ידי משתמש. צרפו הדרכה ברורה ומפורטת עבור הרצת הקוד.
 6. מסקנות וביקורת על המאמר – פרק זה יכלול את מסקנותיכם לגבי המאמר. בפרט, אתם מתבקשים לכתוב דיווח ביקורתי על המאמר. למשל, מהן הנקודות החזקות והחלשות במאמר? אילו כיווני מחקר עתידיים חשוב לחקור בנושא ונשארו פתוחים? כיצד לדעתכם ניתן לטפל בכיווני מחקר אלו?
 7. אופציונלי (ללא חובת הגשה): נספחים – הנספחים יכללו נושאים שאינם דרושים לשטף הקריאה של העבודה. בדר"כ פרק זה יכול לכלול חומר רקע, כלים מתמטיים, הוכחות מתמטיות, ועוד חומר נלווה, הנדרשים במאמר אך אינם דרושים לקבלת תובנות בשטף קריאת העבודה.
 8. סימוכין.

אופן ביצוע העבודה ומבנה הציון:

1. מומלץ לקבוצות הסטודנטים לתאם פגישות עם המרצה לשם הנחייה פרטנית בימי שלישי בשעות 9 עד 12 בבוקר עד תום הסמסטר. לאחר מכן הזמינות תהיה מוגבלת. בפרט, לאחר קבלת מאמר, מומלץ לתאם בהקדם פגישה ראשונה לשם הכוונה לביצוע העבודה.
2. מבנה הציון: עבודה בכתב - 70 אחוז (ציון קבוצתי). השתתפות פעילה במהלך הפגישות עם המרצה – 30 אחוז (ציון אישי). סטודנטים שירצו לשפר את מרכיב הציון בגין השתתפות פעילה במהלך הפגישות עם המרצה, יוכלו להיבחן בעל פה פרטנית בנושא העבודה והחומר הנלמד בהרצאות כשבוע לאחר הגשת העבודה.

הסברים ושאלות במסגרת ביצוע שלב א':

שאלה 1 (אנליטית):

נתונה רשת תקשורת בעלת L לינקים $i=1, 2, \dots, L$, קיבול לינק i נתון ע"י $c_i = 1, \forall i$. נתונים $L+1$ משתמשים $r=0, 1, 2, \dots, L$ כאשר משתמש 0 משדר בכל הלינקים $i=1, 2, \dots, L$ ואילו משתמש r משדר על לינק r בלבד.

בכיתה פתרנו בעיית NUM עבור רשת זו תחת קריטריון הגינות proportional fairness וקיבלנו כי משתמש 0 יקבל קצב $1/(L+1)$ ואילו משתמש i מקבל קצב $L/(L+1)$ לכל $i=1, 2, \dots, L$.

(א) חשבו מהי הקצאת הקצבים המתקבלת תחת קריטריון α -fairness כפונקציה של α .

(ב) רשמו מפורשות את הקצאת הקצבים המתקבלת עבור קריטריון proportional fairness בעזרת הצבת ערך α מתאים. וודאו כי תשובתכם מתיישבת עם הפתרון שהתקבל בכיתה.

(ג) רשמו מפורשות את הקצאת הקצבים המתקבלת עבור קריטריון מינימום השהייה וקריטריון מקס-מיני בעזרת הצבת ערך α מתאים.

(ד) האם הקצאת הקצבים תחת קריטריון מקס-מיני שקיבלתם בסעיף ג' מתיישבת עם הגדרתה? נמקו.

המשך שלב א': כתיבת הסימולטור:

כתבו סימולטור לרשת תקשורת עם הפרמטרים הבאים:

1. הרשת כוללת N צמתים (כלומר משתמשים) הפרושים אקראית בתוך אזור גאוגרפי מעגלי דו-מימדי עם רדיוס של M מטרים.
2. לינקים לתקשורת בין צמתים ברשת ייקבעו על ידי רדיוס של r מטרים בין משתמשים. כלומר לכל צומת ברשת קיימים לינקים בינם לבין כל הצמתים הנמצאים במרחק r מטרים ממנו.
3. כל צומת i ברשת משדר בהספק p_i . ההספק ייקבע על ידי פונקציה חיצונית המקבלת את פרמטרי הרשת ומוציאה הספקי שידור לכל משדר. למשל קביעות טיפוסיות הן: הספק קבוע לכל משדר, הספק משתנה בתלות בתנאי הערוץ.
4. כל משדר רשאי לשדר באחד מתוך K ערוצים אורתוגונליים (תדרי גל הנושא מופרדים ספקטראלית ומניחים שידור ברוחב פס צר מספיק כך שאין הפרעה בין שידורים בערוצים שונים).
5. כל צומת i ברשת משדר ברוחב פס B_i . רוחב הפס ייקבע על ידי פונקציה חיצונית המקבלת את פרמטרי הרשת ומוציאה רוחב פס לכל משדר. למשל קביעות טיפוסיות הן: רוחב פס קבוע לכל משדר, רוחב פס משתנה בתלות בטיפוס המשדר.
6. הגברי הערוצים $|h|_{i,j}$ עבור לינק (i,j) בין משדר i לבין מקלט j בכל לינק תקשורת, והגברי ערוצי ההפרעה $|h^I|_{i,j}$ בין משדר i לבין כל מקלט אחר ברשת ייקבעו על ידי פונקציה חיצונית המקבלת את פרמטרי הרשת ומוציאה את ההגברי הערוצים. הגברי ערוצי התקשורת ייקבעו לפי מודל path loss וגורם כפלי משתנה אקראי לפי מודל small-scale fading (למשל Rayleigh fading) (מוגדלים עבור כל חריץ זמן לשידור). עבור ערוצי ההפרעה ניתן להניח ניחות כפלי הנובע מכיוונויות האנטנה.
7. קיבול הערוץ בכל לינק ייקבע לפי נוסחת שאנון:

$$C_{i,j} = B_i \log_2(1 + SINR)$$
 כאשר SINR זהו יחס אות להפרעה + רעש, כאשר ההפרעה מסתכמת על פני הספקי כל המשדרים הפעילים מוכפלים בהספק ערוץ ההפרעה בן המשדר למקלט. שימו לב כי משתמשים שמשדרים בלינק משותף מתחלקים בקיבול הלינק.
8. הסימולטור מקבל רשימה אקראית של F זרמי מידע (flows) המוגדרים לפי צומת מקור (source), צומת יעד (destination) וכמות דאטא נדרשת לשידור.

עבור שאלות 2,3,4,5 נתון כי: $|h^I|_{i,j} = 0$, $K=1$, לכל i,j .

שאלה 2:

השתמשו בתשתית שכתבתם למימוש האלגוריתם הפרימלי בסימולציית רשת תקשורת (רשת כללית כלשהי, אל תגבילו עצמכם לרשת משאלה 1) בצורה מבוזרת כדי לפתור את בעיית NUM תחת קריטריון $\alpha - fairness$.

התוכנית תקלוט פרמטרים נתונים אודות לינקים, קיבולים, משתמשים, מסלולים, ותריץ את האלגוריתם הפרימלי בצורה שתדמה עדכון מבוזר של בקר צפיפות בשכבת התעבורה. הפרמטרים יישמרו קבועים לכל אורך הרצת הסימולציה. בכל איטרציה של האלגוריתם משתמש יחיד ייבחר בצורה אקראית לבצע עדכון. התוכנית תיתן כפלט את סט הקצבים שפותר את בעיית NUM, וכן גרפים המתארים את התכנסות הקצבים לפתרון כפונקציה של הזמן (כלומר מספר האיטרציות).

שאלה 3:

חזרו על שאלה 2 עבור האלגוריתם הדואלי.

שאלה 4:

עבור הרשת הנתונה בשאלה 1, הריצו את התוכניות שכתבתם בשאלות 2, 3, עבור $L=5$. צרפו גרפים של הקצבים כפונקציה של הזמן עבור הערכים $\alpha = 1, 2, \infty$. וודאו כי הקצבים ברשת אכן מתכנסים לפתרונות הסגורים שקיבלתם בשאלה 1.

שאלה 5:

חזרו על שאלות 2, 3, כך שהמסלולים יחושבו על ידי אלגוריתם דייקסטרה בשכבת הרשת. תכננו את האלגוריתם כך שיביא את הרשת לנקודת עבודה טובה. נמקו בצירוף תוצאות שקיבלתם.

שאלה 6:

עבור שאלה זו $K=1$, אך כעת ערוצי ההפרעה גדולים מאפס. הסימולטור מקבל את המסלולים על ידי אלגוריתם דייקסטרה בשכבת הרשת.

כעת נתון האלגוריתם הבא להקצאת הקצבים: קיבול כל לינק מחולק על ידי TDMA בין ה flows שעוברים דרכו לפי יחס הדאטא שצריך להעביר. הקצב עבור כל flow ייקבע לפי הלינק בעל קצב השירות המינימלי במסלול שלו. חשבו את הקצבים המתקבלים. בחישוב הקצבים, צרפו גרפים כתלות בפרמטרים שונים עבור מספר המשתמשים, גודל הדאטא, וכו' ופרטו.

שאלה 7:

עבור שאלה זו $K>1$, וגם ערוצי ההפרעה גדולים מאפס. הסימולטור מקבל את המסלולים על ידי אלגוריתם דייקסטרה בשכבת הרשת.

כעת נתון האלגוריתם הבא להקצאת הקצבים: קיבול כל לינק מחולק על ידי TDMA בין ה flows שעוברים דרכו לפי יחס הדאטא שצריך להעביר. הקצב עבור כל flow ייקבע לפי הלינק בעל קצב השירות המינימלי במסלול שלו.

ניתן לבחור ערוצים שונים לשידור לאורך המסלול. הציעו אלגוריתם לבחירת ערוצים. חשבו את הקצבים המתקבלים.

בחישוב הקצבים, צרפו גרפים כתלות בפרמטרים שונים עבור מספר המשתמשים, מספר ערוצים, גודל הדאטא, וכו' ופרטו.

שלב ב':

שלב זה יפתר לפי ההנחיות במבנה העבודה.

רשימת מאמרים לבחירה:

מאמרים בנושא בקרת צפיפות ובעיית NUM:

1. Li, Chih-ping, and Michael J. Neely. "Network utility maximization over partially observable Markovian channels." *Performance Evaluation* 70.7-8 (2013): 528-548.
2. Habachi, O., Shiang, H. P., van der Schaar, M., & Hayel, Y. (2013). "Online learning based congestion control for adaptive multimedia transmission". *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(6), 1460-1469.
3. Ghaderi, Javad, Tianxiong Ji, and Rayadurgam Srikant. "Flow-level stability of wireless networks: Separation of congestion control and scheduling." *IEEE Transactions on Automatic control* 59, no. 8 (2014): 2052-2067
4. Chen, Yi, Xuan Wang, and Lin Cai. "On achieving fair and throughput-optimal scheduling for TCP flows in wireless networks." *IEEE Transactions on wireless communications* 15.12 (2016): 7996-8008.

מאמרים בנושא ניתוב:

5. Deng, Han, Tao Zhao, and I-Hong Hou. "Online routing and scheduling with capacity redundancy for timely delivery guarantees in multihop networks." *IEEE/ACM Transactions on Networking* 27.3 (2019): 1258-1271.
6. 13. Han Deng, Tao Zhao, and I-Hong Hou, "Online Routing and Scheduling With Capacity Redundancy for Timely Delivery Guarantees in Multihop Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 27, no. 3, June 2019
7. Han, Ruiyan, et al. "Congestion and position aware dynamic routing for the internet of vehicles." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.12 (2020): 16082-16094.

8. Zhiming Huang, Yifan Xu, Jianping Pan, "TSOR: Thompson Sampling-Based Opportunistic Routing", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. Nov. 2021
9. Yang Xu, Jia Liu, Yulong Shen, Xiaohong Jiang, Yusheng Ji, Norio Shiratori, "QoS-Aware Secure Routing Design for Wireless Networks With Selfish Jammers", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 8, Aug. 2021
10. Raz Paul, Kobi Cohen, and Gil Kedar, Multi-flow transmission in wireless interference networks: A convergent graph learning approach, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023.

מאמרים בנושא גישה לערוץ בשכבת ה MAC:

11. Ali, Md Shipon, Hina Tabassum, and Ekram Hossain. "Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems." IEEE access 4 (2016): 6325-6343.
12. Kobi Cohen, Angelia Nedic, and R. Srikant, Distributed learning algorithms for spectrum sharing in spatial random access wireless networks, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 6, pp. 2854-2869, June 2017.
13. Sawant, S., Kumar, R., Hanawal, M. K., & Darak, S. J. (2019). Learning to coordinate in a decentralized cognitive radio network in presence of jammers. IEEE Transactions on Mobile Computing, 19(11), 2640-2655.
14. Youssef, M. J., Veeravalli, V. V., Farah, J., Nour, C. A., & Douillard, C. (2021). Resource allocation in NOMA-based self-organizing networks using stochastic multi-armed bandits. IEEE Transactions on Communications, 69(9), 6003-6017.
15. Tomer Gafni and Kobi Cohen, Distributed learning over Markovian fading channels for stable spectrum access, IEEE Access, vol. 10, pp. 46652-46669, May 2022.
16. Chen, K. W., Chao, C. M., Lin, C. Y., & Yeh, C. C. (2022). Anti-jamming channel hopping protocol design based on channel occupancy probability for Cognitive Radio Networks. Computer Networks, 214, 109125.