*חישוב ואופטימיזציה*
*של שאילתות*
*חלק 1*
*Query Evaluation*
*and Optimization*
*Part 1*

1

הקדמה:
הצגת הבעיה
והגורמים המשפיעים

2

## המטרה: חישוב שאילתות בצורה יעילה ככל האפשר

- הבעיה: כמות הנתונים גדולה מאוד
  - אי אפשר לקרוא את כל הנתונים בבת אחת לזיכרון הפנימי ואז להתחיל בחישוב
  - צריך לחלק את החישוב לשלבים – בכל שלב:
    - קוראים חלק מהנתונים לזיכרון הפנימי
    - מחשבים חלק מהתוצאה לפי הנתונים בזיכרון הפנימי
    - כותבים לדיסק את החלק של התוצאה שחושב
    - עוברים לשלב הבא

3

## הזמן הנדרש ל- I/O הנו הגורם העיקרי המשפיע על זמן החישוב של שאילתה

- החישוב המתבצע ע"י ה- CPU על הנתונים הנמצאים בזיכרון הפנימי אינו מסובך
- הקריאה מהדיסק והכתיבה לדיסק הנם איטיים (לפחות) פי אלף מהפעולות המתבצעות בזיכרון הפנימי
- לפיכך, הזמן הנדרש לקריאה מהדיסק ולכתיבה על הדיסק הנו הגורם העיקרי המשפיע על זמן החישוב של שאילתות

4

## הגורמים העיקריים המשפיעים על הזמן הנדרש ל- I/O

- ארגון הנתונים על הדיסק
- השיטה בה מבצעים כל אחת מהפעולות
  - קיימות מספר שיטות שונות לביצוע פעולת הצירוף (כנ"ל לגבי פעולת הבחירה)
    - הזמן הנדרש ל- I/O תלוי בשיטה
- התוכנית שנבחרה לחישוב השאילתה כולה, קרי
  - השיטה שנבחרה לביצוע כל אחת מהפעולות
  - הסדר שנבחר לביצוע הפעולות

5

## הנושאים העיקריים שנלמד

- כיצד מאורגנים נתונים על הדיסק וכיצד מבצעים פעולות קלט-פלט (I/O)
- שיטות לחישוב כל אחת מהפעולות האלגבריות
  - דגש מיוחד על שיטות לחישוב הצירוף, שהיא הפעולה היקרה ביותר והמורכבת ביותר
- אלגוריתם לאופטימיזציה של שאילתה, שמוצא את
  - השיטה האופטימלית לביצוע כל אחת מהפעולות, ואת
  - הסדר המהיר ביותר לביצוע הפעולות

6

## דוגמה

- $R(A,B) \bowtie S(B,C) \bowtie T(C,D)$
- צירוף הוא אסוציאטיבי, לכן יש שתי אפשרויות לחישוב הביטוי הנ"ל:
  - $R(A,B) \bowtie (S(B,C) \bowtie T(C,D))$
  - $(R(A,B) \bowtie S(B,C)) \bowtie T(C,D)$
- צירוף הוא גם קומוטטיבי, לכן יש אפשרות נוספת
  - $(R(A,B) \bowtie T(C,D)) \bowtie S(B,C)$
- מהי האפשרות המהירה ביותר?



## המשך הדוגמה

- כאמור יש 3 אפשרויות לסידור 2 פעולות צירוף
  - $R(A,B) \bowtie (S(B,C) \bowtie T(C,D))$
  - $(R(A,B) \bowtie S(B,C)) \bowtie T(C,D)$
  - $(R(A,B) \bowtie T(C,D)) \bowtie S(B,C)$
- חלק מהגורמים המשפיעים על הסדר האופטימלי
  - ארגון היחסים על הדיסק
  - גודל תוצאת הביניים
    - ← עדיף לבצע תחילה צירוף שהתוצאה שלו היא יחס קטן ככל האפשר



## שיטות עיקריות לחישוב הצירוף של שני יחסים

- צירוף היא הפעולה האלגברית היקרה ביותר וקיימות עבורה מספר שיטות חישוב שונות:
  - Block Nested-Loops Join
  - Index Nested-Loops Join
  - Sort-Merge Join
  - Hash Join
- בהמשך, נתאר כל אחת מהשיטות הללו
- כמו כן, נתאר שיטות לחישוב הפעולות האלגבריות האחרות



## דוגמה לבעיית האופטימיזציה

- עבור $R(A,B) \bowtie S(B,C) \bowtie T(B,D)$ צריך לבחור
  - שיטה מתאימה לכל אחת משתי פעולות הצירוף
    - ← אין צורך לבחור אותה שיטה לשתי הפעולות
  - סדר מתאים לביצוע הפעולות
- יש מספר רב של אפשרויות לבחור מתוכן
- הבחירה של השיטה לכל פעולה עשויה להיות תלויה בסדר הפעולות
  - השיטה האופטימלית לחישוב הצירוף בין R לבין S עשויה להיות תלויה בשאלה האם צירוף זה מתבצע ראשון או שני



## מדוע אופטימיזציה היא חשובה?

- בין התוכנית האופטימלית לחישוב שאילתה לבין תוכנית גרועה לחישוב אותה שאילתה יכול להיות הבדל עצום
  - שעות לעומת שניות ואולי אפילו הבדל גדול יותר
- לא כל כך חשוב לבחור את התוכנית המהירה ביותר – חשוב להימנע מבחירת תוכנית גרועה

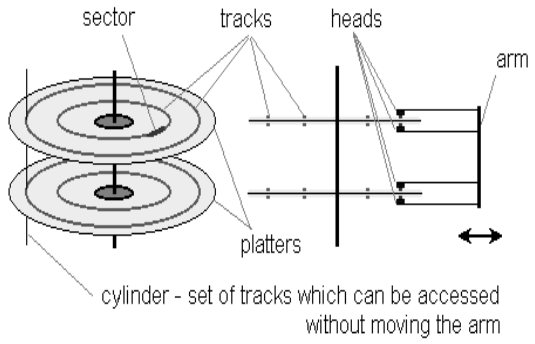


## ארגון הנתונים על הדיסק, מבנה הדיסק ואופן הביצוע של פעולות I/O

## אחסון יחסים

- יחסים מאוחסנים בקבצים על דיסקים
- דיסק מורכב מבלוקים (דפים) בעלי גודל אחיד
- בלוק חייב להיקרא או להיכתב בשלמותו
- הזמן לקריאת או כתיבת בלוק אינו אחיד ותלוי במיקום הבלוק על הדיסק ובמצב הדיסק
  - כלומר, היכן נמצאת הזרועה יחסית למיקום הבלוק
- הקריאה והכתיבה מדיסק הנם איטיים לפחות פי אלף מקריאה וכתיבה מהזיכרון הפנימי

13




14

## הנחות מפשטות

- מניחים זמן קבוע לקריאה או כתיבה של בלוק
  - בלוק טיפוסי מכיל בין 1K ל- 4K בתים (bytes)
- כאמור, המחיר של ביצוע שאילתה הנו הזמן הנדרש לקריאה וכתיבה מהדיסק, תוך התעלמות מהזמן שלוקחות פעולות ה- CPU
  - זאת הנחה סבירה, כי פעולות הדיסק לוקחות הרבה יותר זמן וניתנות לביצוע במקביל לפעולות ה- CPU

15

## אחסון יחס כקובץ

- כל יחס מאוחסן כקובץ נפרד
- קובץ בנוי מבלוקים (הנקראים גם דפים)
- בכל בלוק רשומות רבות
  - עשרות רשומות בבלוק בהחלט אפשרי
- פעולה על רשומה מתבצעת ע"י קריאת הבלוק המכיל את הרשומה לזיכרון הפנימי, ביצוע הפעולה, וכתיבת הבלוק בחזרה לדיסק

16

## אחסון רשומות בבלוק

- רשומות יכולות להיות באורך קבוע או באורך משתנה
- שיטת האחסון צריכה לתמוך בביצוע יעיל של
  - מציאת רשומה בתוך בלוק
  - ניצול מקום המתפנה ממחיקת רשומות

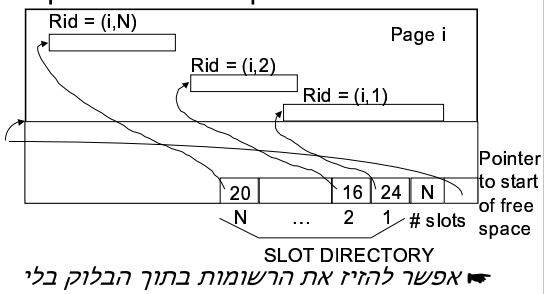
17

## הרעיון העיקרי של ארגון רשומות בבלוק

- רשומה מזוהה ע"י RID (Record ID), המורכב ממספר הבלוק וממספר הרשומה בתוך הבלוק
- בסוף הבלוק יש מערך האומר היכן מתחילה כל רשומה הנמצאת בבלוק
- *הערה*: ה- RID של רשומה יכול להופיע במקומות רבים במסד – בכל מקום שבו יש הפניה או התייחסות לרשומה
  - לכן, אי אפשר לשנות את ה- RID (אלא במחיר מאוד יקר)

18

## הדגמה של ארגון רשומות בבלוק




☛ *אפשר להזיז את הרשומות בתוך הבלוק בלי לשנות את ה- RID שלהן*

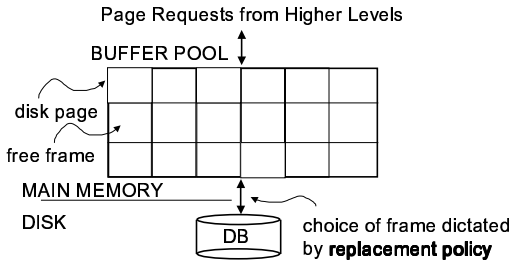


## חוצץ (Buffer)

- חלק מהזיכרון הפנימי מוקצה לחוצץ, שלתוכו נקראים בלוקים מהדיסק
- תוכניות האפליקציה פועלות על הבלוקים (דפים) הנמצאים בחוצץ
- כאשר מסתיים השימוש בבלוק הנמצא בחוצץ, ניתן לנצל את מקומו לטובת בלוק אחר
  - אם הבלוק השתנה בזמן שהיה בחוצץ, צריך לכתוב אותו לדיסק לפני שמפנים את מקומו לטובת בלוק אחר



## ניהול חוצץ




- *Data must be in RAM for DBMS to operate on it*
- *Table of <frame#, pageid> pairs is maintained*



## כיצד מחליטים איזה בלוק יפנה את מקומו? (מדיניות החלפה – Replacement Policy)

- LRU (Least Recently Used) – מחליפים את הבלוק שנעשה בו שימוש הכי רחוק בעבר
  - מדיניות מקובלת בניהול זיכרון וירטואלי ע"י ה- OS
- MRU (Most Recently Used)
  - לעיתים מדיניות זאת טובה יותר, למשל במעבר סדרתי על קובץ, כאשר
    - צריך לעבור על הקובץ באופן סדרתי מספר פעמים
    - מספר הבלוקים בחוצץ קטן ממספר הבלוקים בקובץ



## ניתן להשתמש במערכת ההפעלה לניהול החוצצים, אבל

- מערכות לניהול מסדי נתונים מעדיפות לנהל את החוצצים בעצמן, כי
  - כך קל יותר להשיג תאימות של ה- DBMS למספר מערכות הפעלה שונות
  - יש היבטים שלא קיימים במערכות הפעלה ומצריכים טיפול מיוחד
    - תוכניות שרצות במקביל ומשתמשות באותו בלוק
    - מדיניות החלפה שונה מזו שמתאימה לזיכרון וירטואלי
    - קריאה מקדימה של בלוקים לתוך החוצץ



## קריאה מקדימה של בלוקים לתוך החוצץ

- כאמור, ניתן לבצע פעולות I/O במקביל לחישובים המבוצעים ע"י ה- CPU
- אם בתוכנית לחישוב שאילתה הוחלט שיש לעבור על קובץ באופן סדרתי, אז אפשר לקרוא בכל שלב מספר בלוקים לתוך החוצץ (בהתאם לגודל החוצץ), כאשר באותו הזמן ה- CPU פועל על הבלוקים שנקראו בשלב הקודם

## סוגי קבצים

25

## סוגי קבצים לאחסון יחסים

- קובץ ערמה (Heap file)
  - הרשומות מאוחסנות (ללא מיון) בבלוקים, שמשורשרים זה לזה
- קובץ ממוין (Sorted file)
  - טוב לשליפת כל הרשומות לפי סדר המיון או למציאת הרשומות בטווח מסוים של ערכים
- קובץ ערבול (Hash file)
  - פונקצית הערבול מקבלת ערכים עבור המפתח ומוצאת רשומות עם ערכים אלה

26

## הפעולות על קובץ

- הוספת או מחיקת רשומה בודדת
- חיפוש לפי ערך עבור המפתח
- קובץ ערמה
  - מוסיפים בסוף הקובץ
- קובץ ממוין
  - הקובץ ממוין לפי המפתח
  - מכווצים את הקובץ לאחר מחיקה
- קובץ ערבול
  - אין overflow, 80% תפוסה

27

## המאפיינים של קובץ שקובעים את הזמן הנדרש לביצוע הפעולות

- מספר הבלוקים של הקובץ – B
- מספר הרשומות בבלוק – R
- הזמן (הממוצע) לקרוא בלוק – D
- בעזרת הפרמטרים האלה נקבע את הזמן (של פעולות ה- I/O) הנדרש לביצוע הפעולות בסוגי הקבצים השונים

28

## הערה

- מתעלמים מקריאה מקדימה של בלוקים (pre-fetching)
  - קריאה מקדימה חוסכת זמן, כי היא מתבצעת במקביל לעיבוד בלוקים שכבר נמצאים בזיכרון
  - אבל קשה להביא אותה בחשבון באופן מדויק
  - במקרה הגרוע ביותר אי אפשר לבצע קריאה מקדימה

29

## הזמן הנדרש לביצוע הפעולות

| | ערמה | ממוין | ערבול |
|---|---|---|---|
| מעבר על כל הרשומות | BD | BD | 1.25BD |
| חיפוש רשומה לפי מפתח | 0.5BD | $D\log_2 B$ | D |
| חיפוש כל הרשומות בטווח נתון | BD | $D(\log_2 B$ + # of pages with matches) | 1.25BD |
| הוספת רשומה | 2D | Search + BD | 2D |
| מחיקת רשומה | Search + D | Search + BD | 2D |

## אינדקסים

- אינדקס מעל קובץ (קרי, יחס) נבנה עבור מפתח חיפוש (search key)
- מפתח חיפוש הוא אוסף כלשהו של שדות, שאיננו בהכרח מפתח של היחס
- בהינתן ערך עבור מפתח החיפוש, האינדקס מאפשר להגיע ישירות לכל הרשומות בעלות הערך הנתון (יכולה להיות יותר מרשומה אחת עם אותו ערך עבור מפתח החיפוש)



## שתי האפשרויות למבנה הרשומות של אינדקס

- רשומות רגילות של יחס, כלומר האינדקס הוא חלק מקובץ שמאחסן רשומות של יחס
  - במקרה זה האינדקס חייב להיות על המפתח הראשי
  - לכל היותר אינדקס אחד יכול להיות כזה
- נתוני כניסה (data entries) לקובץ אחר
  - נתוני כניסה הן רשומות שמאפשרות להגיע במהירות לכל הרשומות, בקובץ האחר, שיש להן את הערך המבוקש עבור מפתח החיפוש
  - במקרה זה האינדקס הוא קובץ נפרד



## האפשרויות למבנה של נתוני כניסה

- נתוני כניסה מהצורה (k, rid), כאשר k הוא ערך ו- rid (record identifier) הוא מצביע לרשומה של היחס עם הערך k
  - הרשומה (k, rid) היא מאורך קבוע ויכולות להיות מספר רשומות עבור ערך נתון של k
- נתוני כניסה מהצורה (k, list of rids)
  - זוהי רשומה מאורך משתנה ויש רק רשומה אחת עבור ערך נתון של k



## סיווג אינדקסים: אינדקס ראשי לעומת אינדקס משני

- אינדקס ראשי – מפתח החיפוש מכיל מפתח ראשי של היחס
- אינדקס משני – אחרת
- פירוש אחר: אינדקס ראשי מכיל רשומות של קובץ, בעוד שאינדקס משני מכיל נתוני כניסה



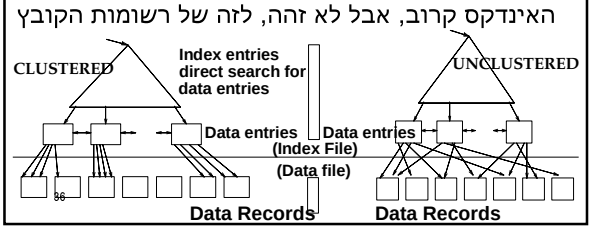
## סיווג אינדקסים: אינדקס מקובץ לעומת אינדקס שאינו מקובץ

- אינדקס מקובץ (clustered index) – סדר הרשומות באינדקס זהה או "קרוב" לסדר הרשומות בקובץ
- אינדקס לא מקובץ (unclustered index) – אחרת
- אינדקס שמכיל רשומות של קובץ הוא תמיד מקובץ, אבל אינדקס מקובץ יכול להיות בנוי גם מנתוני כניסה
- לכל היותר אינדקס אחד יכול להיות מקובץ
- שליפת רשומות לפי אינדקס לא מקובץ לוקחת יותר זמן
- אינדקס מקובץ, שהנו נפרד מהקובץ עצמו, דורש תהליך יקר למדי של עדכון, כדי שיישאר מקובץ גם לאחר עדכונים תכופים של הקובץ עצמו



## בניית אינדקס מקובץ עבור קובץ ערמה

- מיין את הערמה והשאר בכל בלוק שטח פנוי להוספת רשומות בעתיד
- בעתיד יתכן ויהיה צורך בבלוקים של overflow לצורך הוספת רשומות – לכן הסדר של רשומות האינדקס קרוב, אבל לא זהה, לזה של רשומות הקובץ



## אינדקס צפוף ואינדקס דליל

- אינדקס דליל שומר רק חלק מהערכים של מפתח החיפוש
  - חייב להיות אינדקס מקובץ
- כדי למצוא את הרשומות של הקובץ עם מפתח k מחפשים ערך b כך ש-
  - b הערך הגדול ביותר באינדקס שעדיין אינו גדול מ- k
- ממשיכים לחפש בקובץ בסדר עולה מהרשומה הראשונה עם הערך b



## מפתח חיפוש מורכב

- כאשר מפתח חיפוש כולל כמה שדות, רצוי למיין את השדות השונים לפי מיון לקסיקוגרפי (או לבחור בשיטת אכסון מתוחכמת יותר), כדי שניתן יהיה לבצע ביעילות חיפוש טווח על חלק מהשדות
- לדוגמה, אינדקס על (age, sal)
  - חפש רשומות עם age=20
  - חפש רשומות עם age=20 and sal>1000
  - ← מצא כל הרשומות עם sal=20 ובחר מתוכן את אלה עם המשכורות הגדולות מ- 1000



## סוגי מבנים של אינדקסים

- אינדקס מבוסס על עץ חיפוש מאוזן
  - עץ +B הוא הנפוץ ביותר
  - מאפשר חיפוש לפי טווח
- אינדקס מבוסס על ערבול
  - מחייב ערבול בר-הרחבה (extendible hashing), כלומר אפשרות להגדיל את מספר הדליים (ולשנות בהתאם את פונקצית הערבול) כאשר מתווספות רשומות
  - מאפשר חיפוש רק לפי שוויון



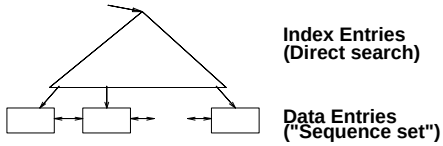
## שקפים על עץ +B

- להלן שלושה שקפים מפרק 9 בספר של Ramakrishnan על עץ +B



## B+ Tree: The Most Widely Used Index

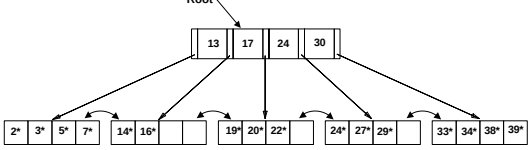
- Insert/delete at $\log_F N$ cost; keep tree *height-balanced*. (F = fanout, N = # leaf pages)
- Minimum 50% occupancy (except for root). Each node contains **d** <= *m* <= 2**d** entries. The parameter **d** is called the *order* of the tree.
- Supports equality and range-searches efficiently.






## Example B+ Tree

- Search begins at root, and key comparisons direct it to a leaf Search for 5*, 15*, all data entries >= 24* ...




☛ *Based on the search for 15*, we know it is not in the tree!*

## B+ Trees in Practice

- Typical order: 100. Typical fill-factor: 67%.
  - average fanout = 133
- Typical capacities:
  - Height 4: $133^4$ = 312,900,700 records
  - Height 3: $133^3$ = 2,352,637 records
- Can often hold top levels in buffer pool:
  - Level 1 = 1 page = 8 Kbytes
  - Level 2 = 133 pages = 1 Mbyte
  - Level 3 = 17,689 pages = 133 MBytes

43

## נושאים נוספים על עצי +B בפרק 9

- הוספה ומחיקה של רשומות
  - צריך לדאוג שכל צומת יישאר לפחות חצי מלא
  - צריך לדאוג שהעץ יישאר מאוזן
- בנייה ראשונית של עץ +B עבור קובץ נתון
- דחיסת מפתחות בעלים הפנימיים
  - מגדיל את ה- fan-out ולכן מקטין את עומק העץ

44

## נושאים נוספים שלא נכסה

- פרק 10 עוסק באינדקסים הבנויים על ערבול
- פרק 11 עוסק במיון חיצוני
  - כלומר, שיטות מיון כאשר אי אפשר לקרוא בבת אחת את כל הנתונים לתוך הזיכרון הפנימי
  - מיון חיצוני נחוץ
    - כאשר רוצים תוצאה ממוינת
    - למחיקת עותקים כפולים של רשומות (DISTINCT)
    - לצורך ביצוע group by
    - לביצוע sort-merge join (אחת השיטות של צירוף)

45