جَامعة
المَنارة
MANARA UNIVERSITY

البرمجة التفرعية

Parallel Programming

Dr.-Eng. Samer Sulaiman

2023-2024

مفردات المنهاج

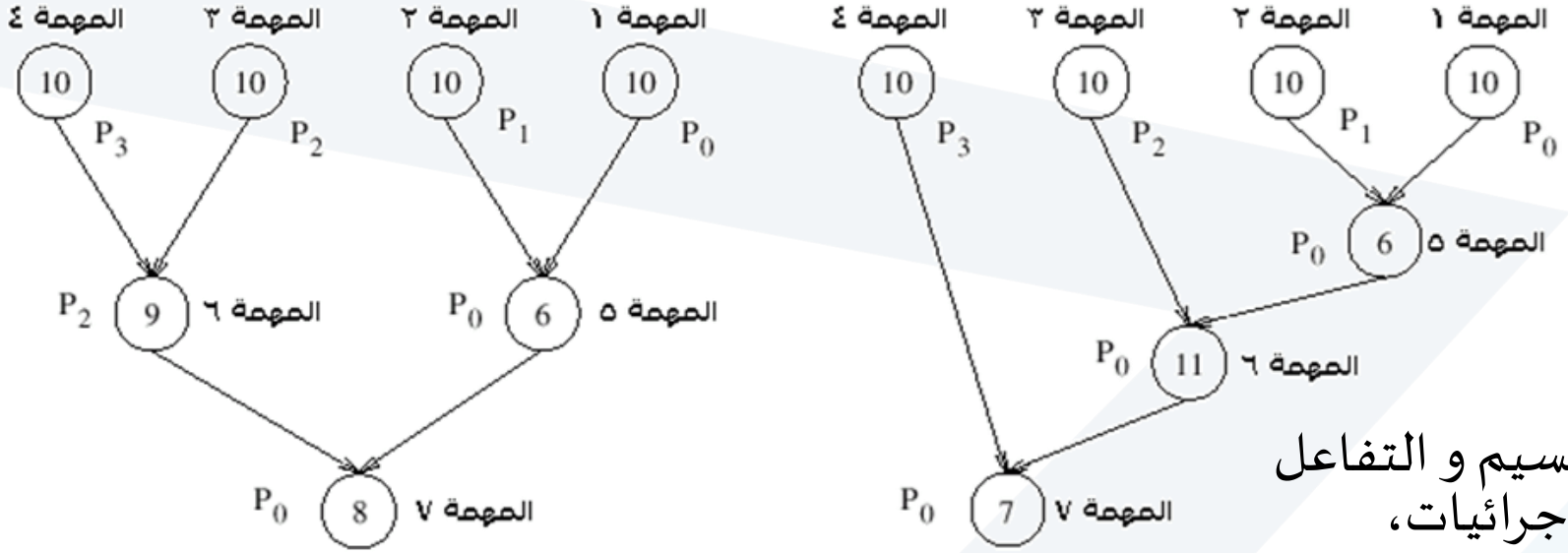
- أساسيات البرمجة التفرعية
  - مقدمة
  - معامل التسريع
  - أنواع الأنظمة المتعددة المعالجات والبرمجيات الداعمة لها
  - موازنة الأعباء وتحمل الخلل
  - تطبيقات البرمجة التفرعية
  - أشكال معالجة المعطيات على التوازي
- الحواسيب التفرعية
  - تصنيف فلاين Flynn's Classification Scheme
  - شبكات الربط الداخلية Interconnection Networks
- مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية
  - مفاهيم أساسية
  - الإجرائيات والمقابلة
  - تقنيات التقسيم
- البرمجيات الداعمة للبرمجة التفرعية
  - المعتمدة على الذاكرة المشتركة
  - المعتمدة على تمرير الرسائل
- تحليل الأداء Performance Analysis

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- الإجرائيات والمقابلة:
  - إن الإجرائيات هي أدوات حسابية منطقية (Logical) تقوم بتنفيذ المهام. أما المعالجات فهي وحدات عتادية (Hardware) والتي تقوم بتنفيذ العمليات الحسابية فيزيائيًا
  - غالبا ما يوجد تطابق بين مصطلح الإجرائيات وبين مصطلح المعالجات، وعمومًا فإنه يمكن توضيع أكثر من إجرائية على المعالج الواحد
  - لكي نحصل على تسريع أعلى من التنفيذ التسلسلي يجب على البرنامج المتوازي أن يكون لديه عدة إجرائيات تعالج عدة مهام بنفس الوقت، وتسمى الآلية المستخدمة لتوزيع المهام لتنفيذها على عدة إجرائيات بالمقابلة (mapping)
    - مثال: في ضرب المصفوفات يمكن أن تخصص أربع إجرائيات لمهمة حساب مصفوفة جزئيه
    - حتى نقول عن المقابلة أنها جيدة
      - يجب أن تسعى إلى زيادة استعمال التوازي وذلك بمقابلة المهام المستقلة على إجرائيات مختلفة،
      - يجب أن تسعى إلى تقليص الزمن الكلي وذلك بضمان أن الإجرائيات جاهزة لتنفيذ المهام على المسار الحرج حالما تكون المهام قابلة للتنفيذ،
      - يجب أن تسعى إلى الإقلال من التفاعلات بين الإجرائيات وذلك بمقابلة المهام التي لها درجة عالية من التفاعل المشترك سويًا على نفس الإجرائية.

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- الإجرائيات والمقابلة:
  - مثال:



- مقابلة فعالة لمخطط التقسيم و التفاعل بين المهام الواردة إلى أربع إجرائيات،
  - يلاحظ في هذه الحالة أن الحد الأعلى لأربع إجرائيات يمكن أن يستخدم بشكل مفيد على الرغم من أن عدد المهام هو سبع مهام،
    - السبب: أن درجة التزامن القصوى هي أربعة فقط. أما المهام الثلاث الأخيرة فيمكن أن يتم مقابلتها
  - من الأفضل مقابلة المهام التي ترتبط بضلع على نفس الإجرائية لأن ذلك يمنع أن يحدث تفاعل بين المهام بسبب حدوث تفاعل بين الإجرائيات

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

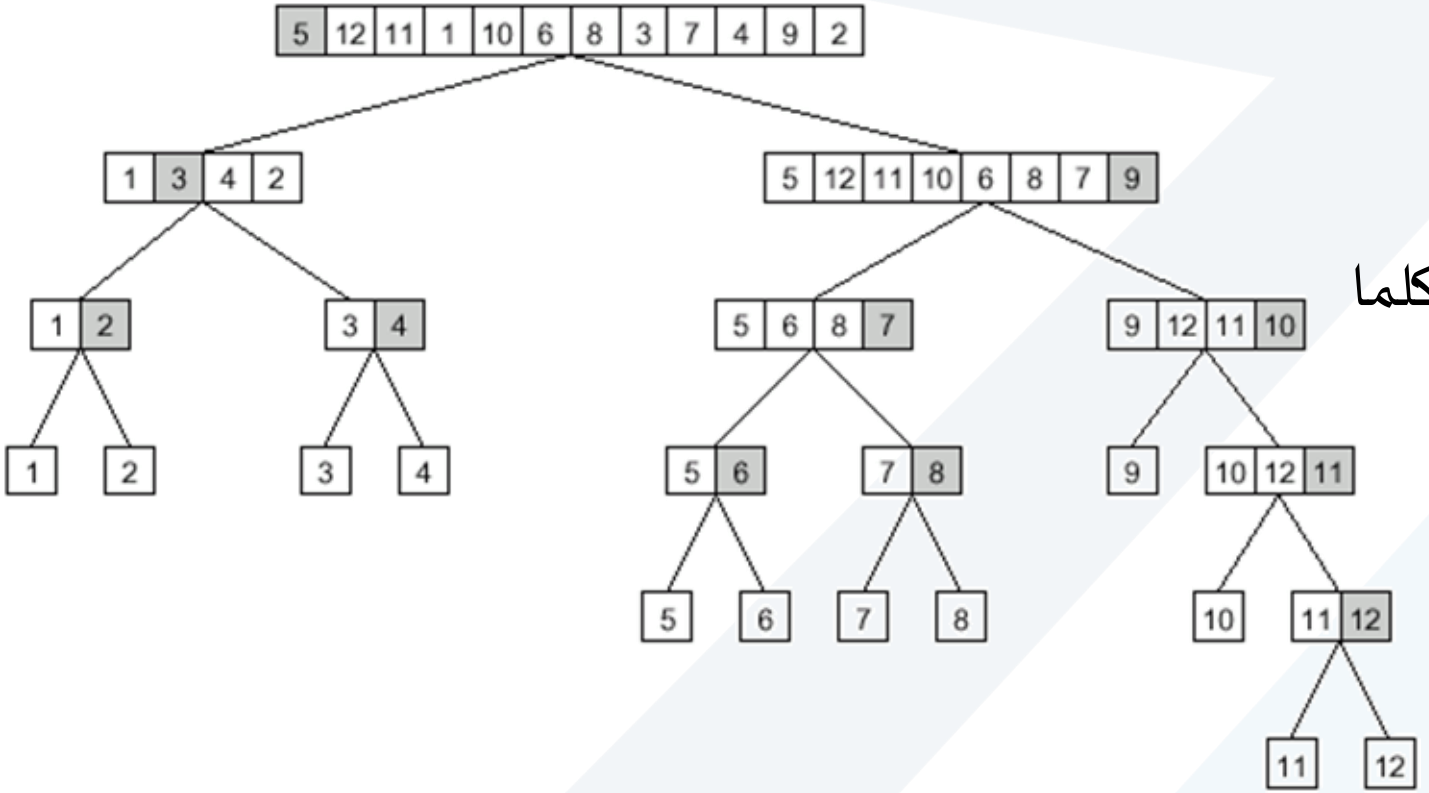
- تقنيات التقسيم:
  - إحدى الخطوات الأساسية التي نحتاجها من أجل حل المسائل بالتوازي هي تقسيم (Decomposition) العمليات الحسابية لتأديتها على مجموعة مهام بشكل متزامن كما هو محدد بواسطة مخطط التبعية.
  - تستخدم من أجل الحصول على التزامن.
    - يمكن تقسيم تقنيات التقسيم إلى مجموعة من الأساليب الشائعة ولكن لا يمكن اعتبار هذه الأساليب شاملة لكل تقنيات التقسيم
    - كما أنه لا يوجد ضمان لأي أسلوب تقسيم بأنه سيعطي أفضل خوارزمية متوازية بشكل دائم
  - تصنيف تقنيات التقسيم
    - إن أسلوبي التقسيم العَودِي وتقسيم البيانات كلاهما ذو غرض عام؛ وذلك لأنه يمكن استخدامهما في حل العديد من المسائل.
    - أما أسلوبي التقسيم التخميني و الاستكشافي فكلاهما يستخدم لأغراض أكثر خصوصية، ويمكن تطبيقهما على أنواع معينة من المسائل
    - التقسيم العَوْدِي (Recursive Decomposition)
    - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - التقسيم الاستكشافي (Exploratory Decomposition)
    - . التقسيم التخميني (Speculative Decomposition)

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - التقسيم العَوْدِي (Recursive Decomposition):
    - يعتبر وسيلة لتحقيق التزامن في المسائل التي يمكن حلها باستخدام استراتيجية "فرّق-تَسُد" (divide-and-conquer)
    - يتم حل المسألة بتقسيمها أولا إلى مجموعة مسائل فرعية مستقلة،
      - كل واحدة منها تُحل أيضًا بتكرار تقسيمها إلى مسائل فرعية ثم تتُبع بنتائجها مجتمعة.
    - استراتيجية "فرِّق-تَسُد" تؤدي إلى تزامن طبيعي وذلك لأنه يمكن حل المسائل الفرعية المختلفة بنفس الوقت
    - مثال: الفرز السريع (Quicksort)
      - بفرض أننا نريد فرز(ترتيب) السلسلة A والمكونة من n عنصر باستخدام خوارزمية الفرز السريع شائعة الاستخدام والتي تعدُّ خوارزميًة من النمط (فرِّق تَسُد)
        - تبدأ باختيار عنصر محوري X ثم بعد ذلك يتم تقسيم السلسلة A إلى سلسلتين فرعيتين A0 و A1
          - تكون جميع عناصر A0 أصغر من X بينما جميع عناصر A1 أكبر من أو تساوي X
        - تشكل خطوة التجزيء هذه خطوة التقسيم في الخوارزمية. وكل من السلسلتين الفرعيتين A0 و A1 يتم فرزهما بواسطة الاستدعاء العَودِي لخوارزمية الفرز السريع
          - يتوقف الاستدعاء العودي عندما تحتوي كل سلسلة فرعية على عنصر وحيد فقط

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - التقسيم العَوْدِي (Recursive Decomposition):
    - مثال: الفرز السريع (Quicksort)
      - مخطط التبعية للفرز السريع والقائم على التقسيم العودي لتقسيم متسلسلة من ١٢ رقم
      - يستمر التزامن في الزيادة كلما نزلنا إلى أسفل الشجرة



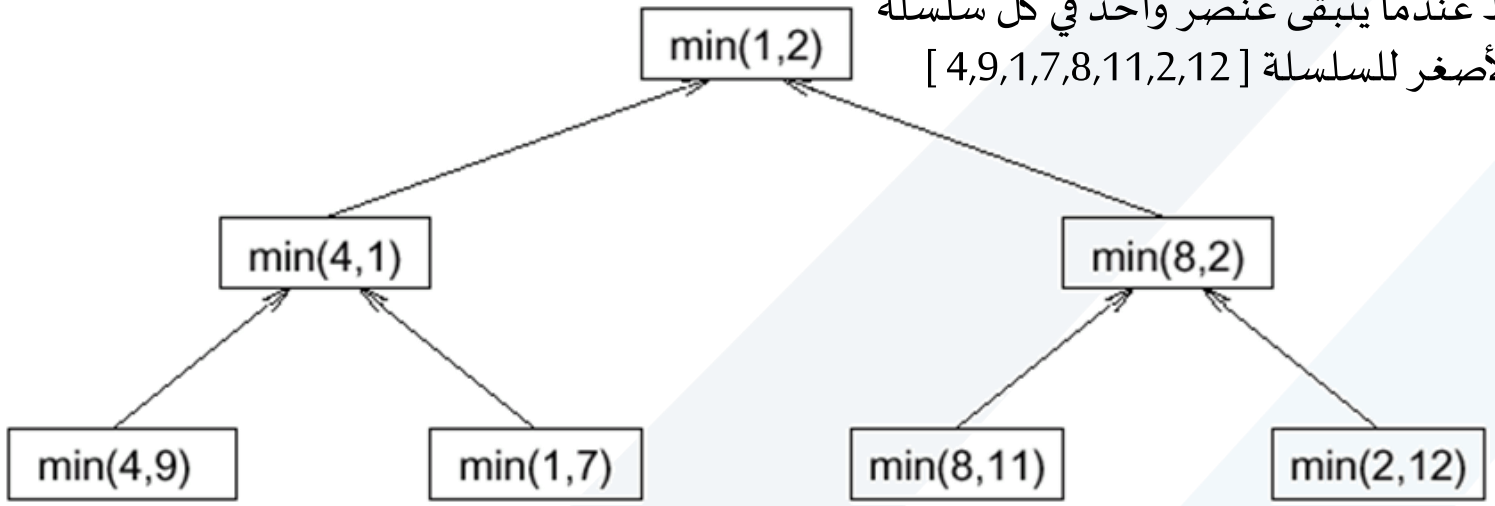
مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - التقسيم العَوْدِي (Recursive Decomposition):
    - في بعض الأحيان لا تكون الخوارزمية المستخدمة للمسألة من النمط (فرِّق-تَسُد) ولذلك يتم القيام بإعادة هيكلة العملية الحسابية لجعلها قابلة للتقسيم العودي
    - مثال:
      - بفرض أننا نريد إيجاد العنصر الأصغر في سلسلة غير مرتبة A مكونة من n عنصر
      - تقوم الخوارزمية التسلسلية لحل هذه المسألة بالتدقيق في كل السلسلة A وفي كل خطوة تقوم بتسجيل أصغر عنصر موجود حتى الآن وعليه تعتبر هذه الخوارزمية غير متزامنة

```
procedure SERIAL_MIN (A, n)
begin
min = A[0];
for i := 1 to n - 1 do
if (A[i] < min) min := A[i];
endfor;
return min;
end SERIAL_MIN
```

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - التقسيم العَوْدِي (Recursive Decomposition):
    - مثال:
      - يمكن إعادة هيكلة هذه الخوارزمية لكي نجعلها من النمط "فرّق-تَسُد"، حيث يمكن استخدام التقسيم العودي كي نجعل منها خوارزمية متزامنة
        - نقوم بتقسيم السلسلة A إلى سلسلتين فرعيتين لهما الحجم (n/2)
        - نقوم بإيجاد العنصر الأصغر لكل واحدة من السلسلتين وذلك باستخدام الاستدعاء العودي.
          - العنصر الأصغر الكلى يوجد بانتقاء أصغر عنصر في هذين السلسلتين
        - يتوقف الاستدعاء العودي فقط عندما يتبقى عنصر واحد في كل سلسلة
        - مخطط التبعية لإيجاد العدد الأصغر للسلسلة [4,9,1,7,8,11,2,12]



مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - التقسيم العَوْدِي (Recursive Decomposition):
    - مثال:
      - برنامج عودي لإيجاد العدد الأصغر من بين عناصر A المكونة من n عنصر

```
procedure RECURSIVE_MIN (A, n)
begin
if (n = 1) then
min := A[0];
else
lmin := RECURSIVE_MIN (A, n/2);
rmin := RECURSIVE_MIN (&(A[n/2]), n - n/2);
if (lmin < rmin) then
min := lmin;
else
min := rmin;
endelse;
endelse;
return min;
end RECURSIVE_MIN
```

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - يعتبر تقسيم البيانات أسلوبًا فعالاً وشائعًا يستخدم للحصول على التزامن في الخوارزميات التي تعمل على تراكيب البيانات الضخمة.
    - تقسيم العمليات الحسابية يتم في خطوتين:
      - الخطوة الأولى يتم فيها تجزيء البيانات التي تجري عليها العمليات الحسابية
      - الخطوة الثانية يتم استخدام البيانات المجزئة لإحداث تقسيم للعملية الحسابية إلى مهام.
    - العمليات التي تتم بها هذه المهام على أجزاء البيانات المختلفة عادة ما تكون متشابهة، أو يتم اختيارها من بين مجموعة صغيرة من العمليات.
    - تجزيء البيانات المخرجة
      - يمكن في العديد من الحسابات أن يتم حساب كل عنصر من المخرجات على حدة كتابع للمدخلات.
      - في مثل هذه العمليات الحسابية فإن تجزيء البيانات المخرجة يتسبب في حدوث التقسيم آليًا للمسألة إلى مهام، بحيث يتم إسناد عمل حساب لجزء من المخرجات إلى كل مهمة

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - مثال:
      - بفرض أننا نريد إجراء عملية الضرب على المصفوفتين (A, B) وكلاهما من الحجم nxn وسنقوم بوضع الناتج في المصفوفة C
        - سيتم تقسيم هذه المسألة إلى أربع مهام
          - حيث سيتم اعتبار أن كل مصفوفة مركبة من أربع كتل (أو مصفوفات جزئية) تحدد هذه الكتل بواسطة تقسيم كل بعد من المصفوفة إلى نصفين
            - وبذلك سينتج لدينا أربع كتل داخل المصفوفة
            - المصفوفات الجزئية الأربع للمصفوفة C كلها تقريبا من الحجم n/2Xn/2
              - يتم حسابها بشكل مستقل باستخدام أربع مهام كمجموع لحواصل الضرب الموافق للمصفوفات الجزئية الموجودة في A, B

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - مثال:
      - التجزيء لمصفوفات المدخلات والمخرجات إلى مصفوفات جزئية بحجم 2X2

$$\begin{pmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} \\ B_{2,1} & B_{2,2} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} \\ C_{2,1} & C_{2,2} \end{pmatrix}$$

(a)

$$\begin{aligned} \text{Task 1: } C_{1,1} &= A_{1,1}B_{1,1} + A_{1,2}B_{2,1} \\ \text{Task 2: } C_{1,2} &= A_{1,1}B_{1,2} + A_{1,2}B_{2,2} \\ \text{Task 3: } C_{2,1} &= A_{2,1}B_{1,1} + A_{2,2}B_{2,1} \\ \text{Task 4: } C_{2,2} &= A_{2,1}B_{1,2} + A_{2,2}B_{2,2} \end{aligned}$$

(b)

- التقسيم لمسألة ضرب المصفوفات إلى أربع مهام إعتماداً على تجزيء المصفوفات السابق

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - مثال:
      - يتم تجزيء مصفوفة الخرج C إلى أربع مصفوفات جزئية
      - كل واحدة من المهام الأربع تقوم بحساب واحدة من المصفوفات الجزئية.
    - يجب ملاحظة أن تقسيم البيانات يختلف عن تقسيم العملية الحسابية إلى مهام.
      - بالرغم من أن كلاهما متصل بالآخر وأن الأول في الغالب مساعد للثاني، فإن تقسيمًا معطى للبيانات لا ينتج عنه تقسيمًا فريدًا إلى مهام
    - مثال:
      - تقسيمين آخرين لضرب المصفوفات، كل واحد إلى ثماني مهام، وهذان التقسيمان مماثلان لنفس تقسيم البيانات السابق

التقسيم I	التقسيم II
Task 1: $C_{1,1} = A_{1,1}B_{1,1}$	Task 1: $C_{1,1} = A_{1,1}B_{1,1}$
Task 2: $C_{1,1} = C_{1,1} + A_{1,2}B_{2,1}$	Task 2: $C_{1,1} = C_{1,1} + A_{1,2}B_{2,1}$
Task 3: $C_{1,2} = A_{1,1}B_{1,2}$	Task 3: $C_{1,2} = A_{1,2}B_{2,2}$
Task 4: $C_{1,2} = C_{1,2} + A_{1,2}B_{2,2}$	Task 4: $C_{1,2} = C_{1,2} + A_{1,1}B_{1,2}$
Task 5: $C_{2,1} = A_{2,1}B_{1,1}$	Task 5: $C_{2,1} = A_{2,2}B_{2,1}$
Task 6: $C_{2,1} = C_{2,1} + A_{2,2}B_{2,1}$	Task 6: $C_{2,1} = C_{2,1} + A_{2,1}B_{1,1}$
Task 7: $C_{2,2} = A_{2,1}B_{1,2}$	Task 7: $C_{2,2} = A_{2,1}B_{1,2}$
Task 8: $C_{2,2} = C_{2,2} + A_{2,2}B_{2,2}$	Task 8: $C_{2,2} = C_{2,2} + A_{2,2}B_{2,2}$

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - مثال: حساب تكرارات المكونات في التعامل مع قاعدة البيانات
    - المطلوب حساب التكرار لمجموعة من العناصر التي تحدث سويًا (itemsets) في قاعدة بيانات تفاعلية أو إجرائية
    - لدينا في هذه المسألة المجموعتان T وI بحيث أن المجموعة T تحتوي على n إجرائية بينما المجموعة I تحتوي على m عنصر من itemsets
    - المطلوب حساب عدد المرات التي ظهرت فيها عناصر I في جميع الإجرائيات

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - مثال: حساب تكرارات المكونات في التعامل مع قاعدة البيانات
      - يمكن تقسيم المسألة السابقة إلى مهمتين وذلك بتقسيم البيانات المخرجة إلى جزأين
      - ثم تحسب كل مهمة الجزء الخاص بها من التكرارات.

(a) Transactions (input), itemsets (input), and frequencies (output)

Database Transactions	Itemsets	Itemset Frequency
A, B, C, E, G, H	A, B, C	1
B, D, E, F, K, L	D, E	3
A, B, F, H, L	C, F, G	0
D, E, F, H	A, E	2
F, G, H, K,	C, D	1
A, E, F, K, L	D, K	2
B, C, D, G, H, L	B, C, F	0
G, H, L	C, D, K	0
D, E, F, K, L		
F, G, H, L		

(b) Partitioning the frequencies (and itemsets) among the tasks

task 1

Database Transactions	Itemsets	Itemset Frequency
A, B, C, E, G, H	A, B, C	1
B, D, E, F, K, L	D, E	3
A, B, F, H, L	C, F, G	0
D, E, F, H	A, E	2
F, G, H, K,		
A, E, F, K, L		
B, C, D, G, H, L		
G, H, L		
D, E, F, K, L		
F, G, H, L		

task 2

Database Transactions	Itemsets	Itemset Frequency
A, B, C, E, G, H	C, D	1
B, D, E, F, K, L	D, K	2
A, B, F, H, L	B, C, F	0
D, E, F, H	C, D, K	0
F, G, H, K,		
A, E, F, K, L		
B, C, D, G, H, L		
G, H, L		
D, E, F, K, L		
F, G, H, L		

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - ملاحظة: أن مدخلات مجموعة العناصر أيضا تم تقسيمها، ولكن الداعي للتقسيم هو أن تقوم كل مهمة بحساب جزء من التكرارات الذي أسند إليها بشكل مستقل
    - تجزيء البيانات المدخلة
      - إن التجزيء للبيانات المخرجة يمكن أن يتم فقط إذا كان كل مخرج يمكن أن يحسب طبيعيًا كتابع للبيانات المدخلة.
      - في العديد من الخوارزميات ليس من الممكن القيام بتجزيء البيانات المخرجة.
      - فمثلا: عند محاولة إيجاد العدد الأصغر أو الأكبر لمجموعة من الأعداد، فإن المخرجات هي قيمة فردية غير معلومة.
      - في خوارزمية الفرز فالعناصر الفردية من المخرجات لا يمكن معاملتها وهي منعزلة.
      - في مثل هذه الحالات قد يكون من الممكن القيام بتجزيء البيانات المدخلة ومن ثم استخدام هذه الأقسام للحصول على التزامن.
    - يتم إنشاء مهمة لكل جزء من بيانات المدخلات، وتنفذ هذه المهمة قدر المستطاع باستخدام البيانات المحلية.
    - يمكن أن يكون الحل للمهام في تجزيء البيانات المدخلة لا يؤدي إلى الحل النهائي مباشرة،
      - في مثل هذه الحالات يلزم إجراء حسابات إضافية لتجميع النواتج الجزئية.

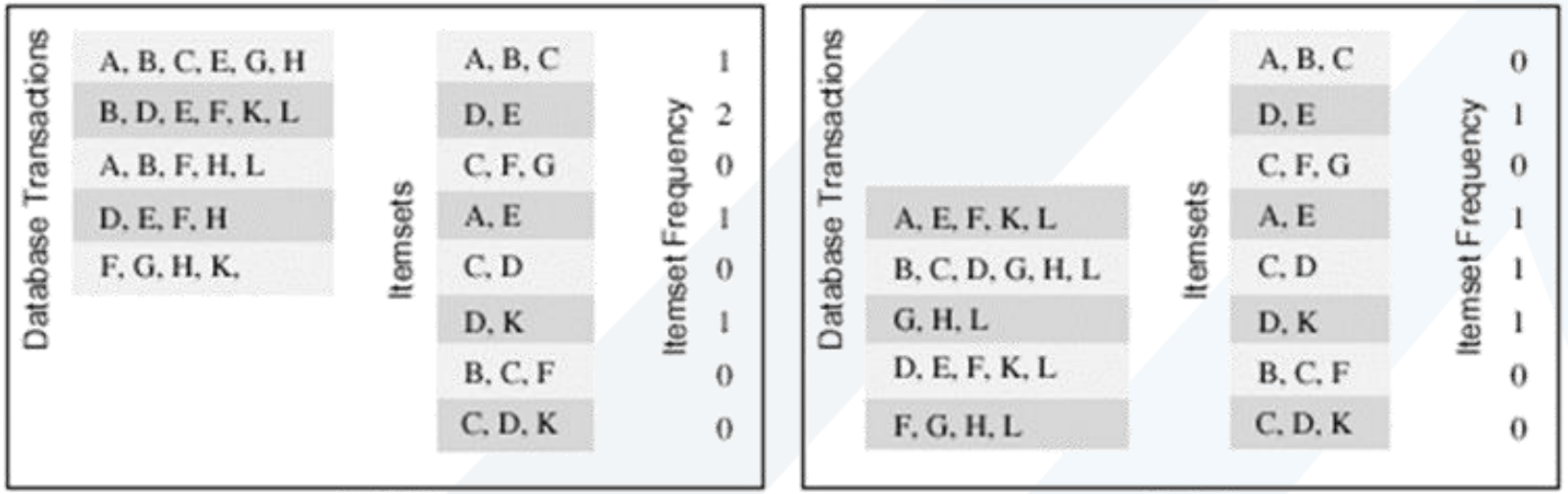
مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - تجزيء البيانات المدخلة
    - مثال:
      - عند محاولة إيجاد مجموع سلسلة مكونة من N عدد باستخدام P إجرائية بحيث N>P فإنه يمكن تجزيء المدخلات إلى P سلسلة فرعية بأحجام متساوية.
        - بعد ذلك تقوم كل مهمة بحساب المجموع لواحدة من السلاسل الفرعية.
        - في النهاية يمكن أن نحصل على الناتج النهائي وذلك بتجميع نواتج الـ P سلسلة فرعية
      - مثال: حساب التكرار لمجموعة من العناصر في قاعدة بيانات إجرائية (المثال السابق)
        - يمكن أيضًا أن يتم تقسيمها بالاعتماد على التجزيء للمدخلات
          - تقوم كل مهمة من المهمتين بحساب التكرارات للمجموعة الفرعية الخاصة بها.
          - المجموعتان الناتجتان عن المهمتين تمثلان نواتج وسيطة وبضم هذه النواتج سويًا سينتج لدينا الناتج النهائي

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - تجزيء البيانات المدخلة
      - مثال: بعض التقسيمات لحساب تكرار المكونات في تعاملات قاعدة البيانات

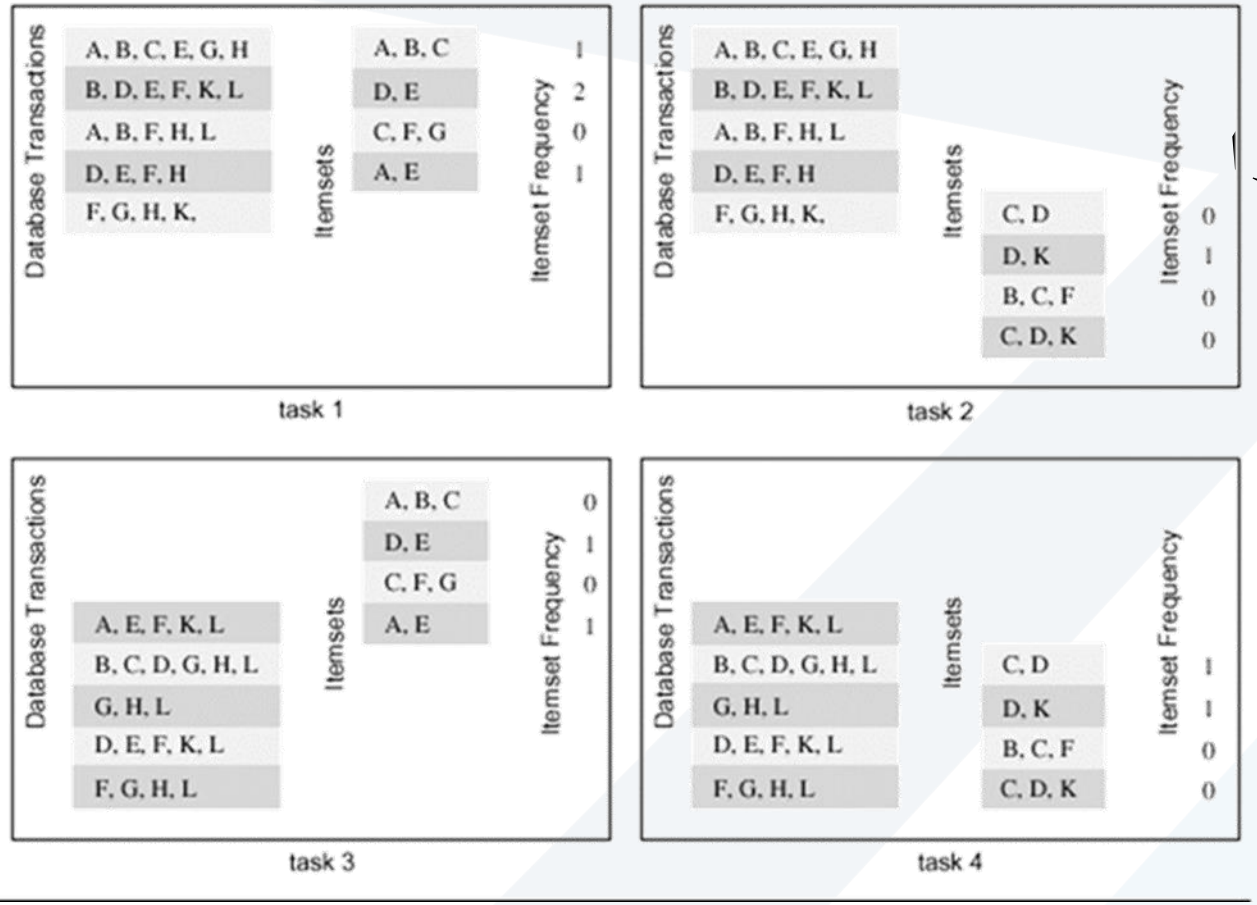
(a) Partitioning the transactions among the tasks



مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - تجزيء البيانات المدخلة
      - مثال: بعض التقسيمات لحساب تكرار المكونات في تعاملات قاعدة البيانات

(b) Partitioning both transactions and frequencies among the tasks



مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - تجزيء البيانات المخرجة والمدخلة معًا
      - من الممكن في بعض الحالات التي تقبل تجزيء المخرجات أن يتم تجزيء المدخلات أيضا مما يؤدي إلى تزامن أكثر.
      - مثال: مسألة حساب التكرار في قاعدة بيانات
        - يمكن ملاحظة أن الـ Transaction مقسم إلى جزأين وكذلك frequencies قد تم تقسيمها إلى جزأين،
          - يسند لكل مهمة أحد الاحتمالات الأربع.
          - بعد ذلك تقوم كل مهمة بحساب الجزء الخاص بها من التكرارات،
          - في النهاية يتم جمع مخرجات
            - المهمة 1 مع مخرجات المهمة 3، ويتم أيضًا جمع المهمة 2 مع المهمة 4

مبادئ تصميم الخوارزميات المتوازية

- تقنيات التقسيم:
  - تقسيم البيانات (Data Decomposition)
    - تجزيء البيانات المخرجة والمدخلة معًا
    - مثال: مسألة حساب التكرار في قاعدة بيانات

(b) Partitioning both transactions and frequencies among the tasks