Manara University
Faculty of Engineering
Department of IT

Computer Architecture 1

توازي خط الأنابيب
Pipelining

Lecture 7

Prof Dr. Eng. Mariam M. Saii

What is Pipelining?

ما هو نوازي خط الأنابيب؟

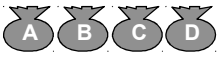
التوازي خط الأنابيب pipelining *هو تقنية تطبيق مفتاحي تستخدم من أجل بناء معالجات سريعة. تسمح هذه التقنية بالتراكب الزمني التنفيذي لعدة تعليمات.*

يشبه توازي السير المتحرك في المعالج خطوط تجميع السيارات ونطلق على كل محطة تجميع تسمية مرحلة أنبوبية *pipe stage* أو قطاع أنبوبي *pipe segment*.

Pipelining is Natural!

طبيعة توازي خط الأنابيب

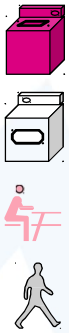
غرفة غسيل الملابس



- لدى كل من أمل و بسام و كرم ودعد حمل من الملابس لغسلها وتجفيفها وطيها وترتيبها في الخزانة

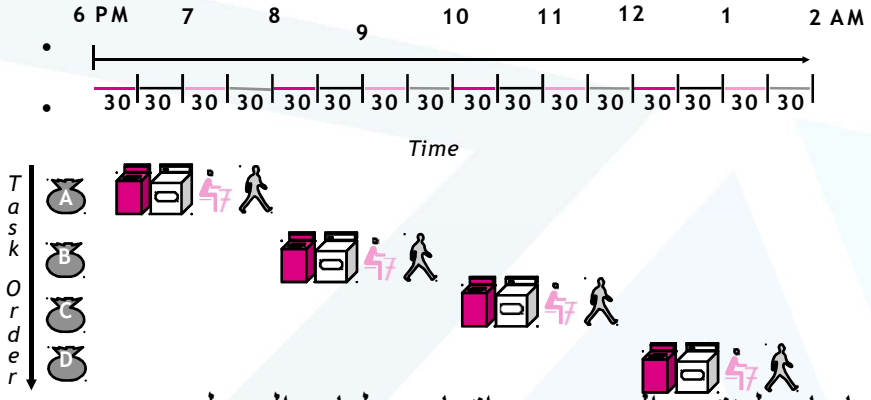
لكل حمل من الأحمال

- تأخذ مرحلة الغسيل 30 minutes
- تأخذ مرحلة التجفيف 30 minutes
- تأخذ مرحلة الطوي 30 minutes
- تأخذ مرحلة الترتيب 30 minutes



If we do laundry sequentially...

اتمام عمليات الغسيل بشكل تسلسلي

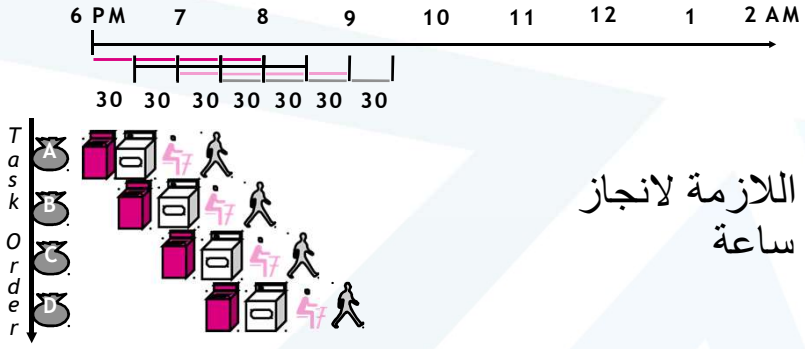


نحتاج الى 8 ساعات لينتهي الجميع من اتمام عمليات الغسيل

هل يمكن توفير الوقت؟

To Pipeline, We Overlap Tasks

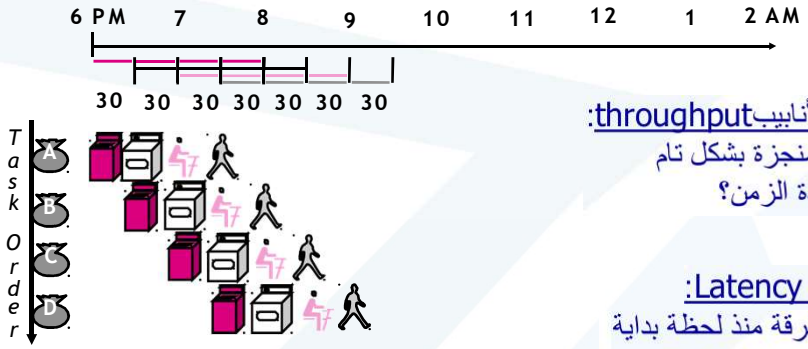
تداخل المهام من أجل توازي الانبوب



أصبحت المدة اللازمة لانجاز المراحل 3.5 ساعة

To Pipeline, We Overlap Tasks

تداخل المهام من أجل توازي الانبوب

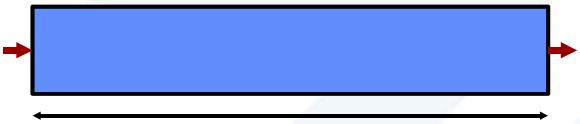


إنتاجية توازي خط الأنابيب throughput:
عدد الأحمال المنجزة بشكل تام في واحدة الزمن؟

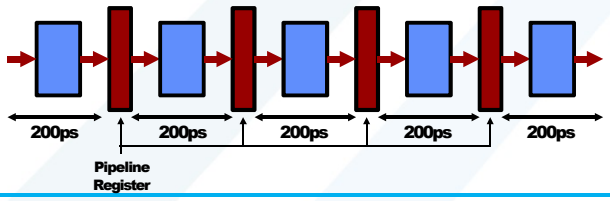
تأخير خط الأنابيب Latency:
المدة الزمنية المستغرقة منذ لحظة بداية العملية حتى تمامها (نهايتها)؟

Pipelining a Digital System

Key idea: break big computation up into pieces تقسيم العمليات الكبيرة الى أجزاء

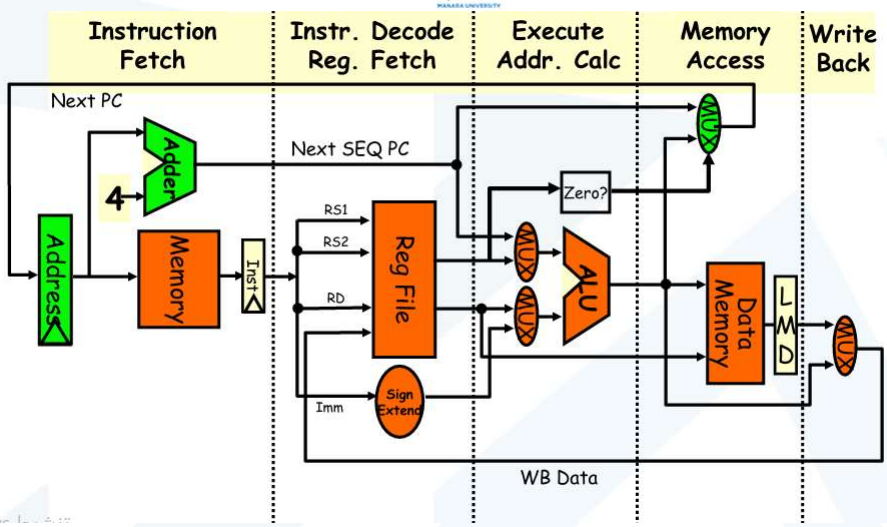


Separate each piece with a pipeline register فصل كل جزء بمسجل توازي انبوب



5 Steps of MIPS Data path

المراحل الخمسة التي تمر بها المعالجات متعددة التعليمات في الثانية MIPS



Pipeline Stages

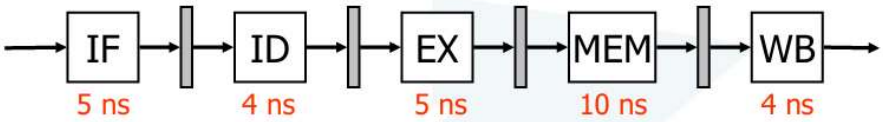
مراحل توازي خط الانبوب

يمكن تقسيم مراحل توازي خط الانبوب الى

IF: Instruction Fetch
ID: Instruction Decode
EX: Execution
MEM: Memory Access
WB: Write Back

Throughput and Latency

تأخير وانتاجية توازي الانبوب

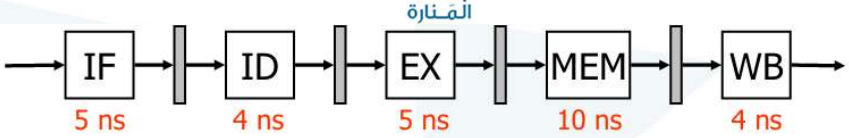


نريد أن نحدد من أجل توازي خط الأنابيب بأزمان التأخير المذكورة أعلاه ماهي إنتاجية التوازي الأنبوبي *pipeline throughput* وماهو التأخير الأنبوبي *pipeline latency*.

يقاس Pipeline throughput بعدد التعليمات المنتهية في الثانية

يقاس Pipeline latency بالمدة المستغرقة لتنفيذ تعليمة وحيدة.

Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب



يقيس تأخير المرحلة الأنبوبية Pipeline throughput تواتر تنفيذ الأنبوب للتعليمات.

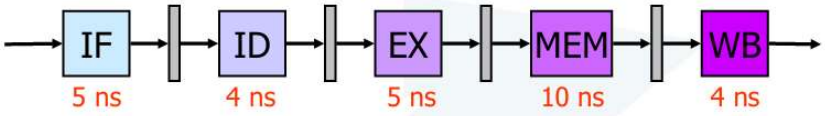
$$T = 1instr / \max[lat(IF), lat(ID), lat(EX), lat(MEM), lat(WB)]$$
$$= 1instr / \max[5ns, 4ns, 5ns, 10ns, 4ns]$$
$$= 1instr / 10ns$$

Pipeline latency تأخير التوازي الأنبوبي: يقيس الفترة الزمنية اللازمة لإتمام تنفيذ تعليمة بالتوازي الأنبوبي:

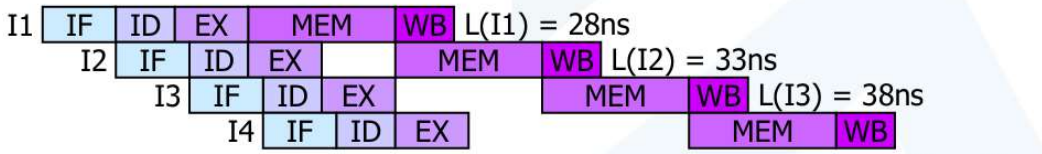
$$L = lat(IF) + lat(ID) + lat(EX) + lat(MEM) + lat(WB)$$
$$= 5ns + 4ns + 5ns + 10ns + 4ns = 28ns$$

Is this right?

Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب

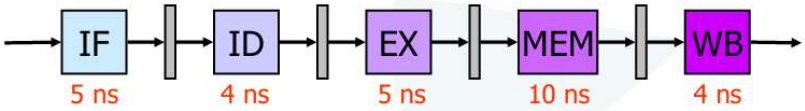


نضيف التأخيرات الزمنية لكل مرحلة فنحصل على التأخير الكلي للتعليمة.
يحسب التأخير لكل تعليمة على حدة

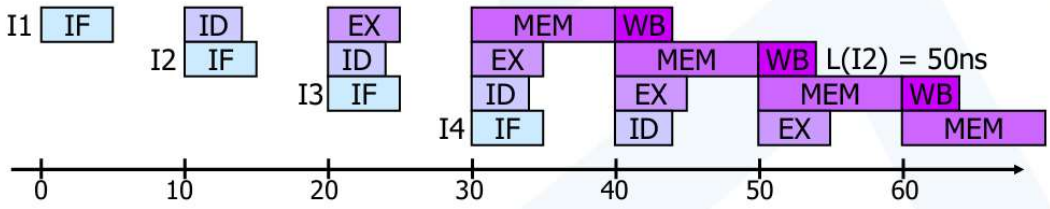


المشكلة التي تظهر هي عدم ثبات زمن التأخير.
ينجم ذلك عن عدم تساوي تأخير المراحل
والحل هو بجعل جميع المراحل تأخذ نفس الزمن وذلك
بجعل زمن كل مرحلة يساوي زمن المرحلة الأطول,

Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب

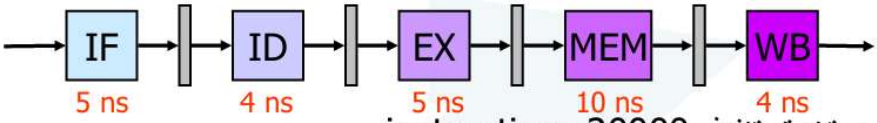


عندها يتحدد التأخير الكلي بزمن تأخير المرحلة الأبطأ



L(I1) = L(I2) = L(I3) = L(I4) = 50ns

Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب



كم يستغرق تنفيذ 20000 instructions.

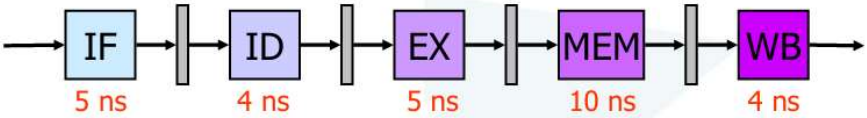
في الحالة المبينة بإهمال الأزمان الانتقالية مثل التفريع Branches وأخطاء النفاذ إلى الذاكرة المخبأية cache misses , والأخطار hazards. يكون الزمن:

$$ExecTime_{pipe} = 20000 \times 10ns = 200000ns = 200\mu s$$

بينما يستغرق نفس النموذج دون التوازي الأنبوبي:

$$ExecTime_{non-pipe} = 20000 \times 28ns = 560000ns = 560\mu s$$

Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب



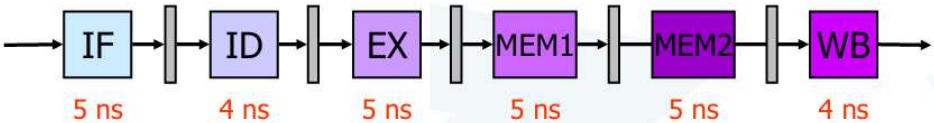
نسبة التسريع هي:

$$Speedup_{pipe} = \frac{ExecTime_{non-pipe}}{ExecTime_{pipe}} = \frac{560\mu s}{200\mu s} = 2.8$$

والسؤال هو كيف نستطيع تحسين التصميم الأنبوبي؟

نحتاج إلى تقليل **الاختلاف** في طول المراحل الأنبوبية لنزيد نسبة التسريع

Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب



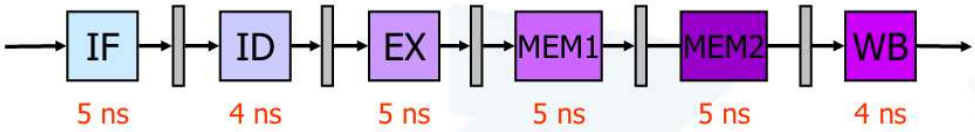
باضافة مرحلة أنبوبية جديدة مع المحافظة على زمن تنفيذ التعليمة الواحدة نقلل تأخير نفاذ المرحلة الأعظمي إلى النصف.

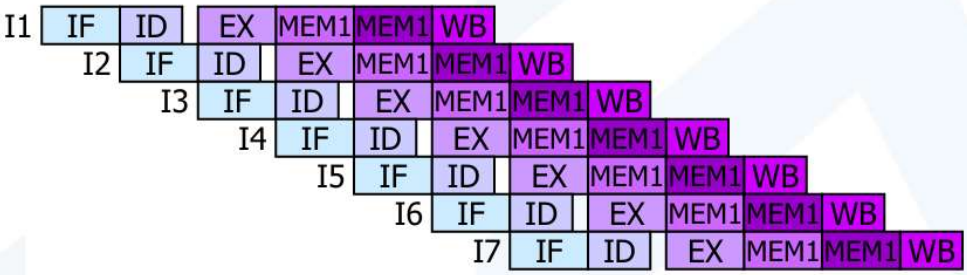
$$T = 1instr / \max(lat(IF), lat(ID), lat(EX), lat(MEM1), lat(MEM2), lat(WB))$$
$$= 1instr / \max(5ns, 4ns, 5ns, 5ns, 5ns, 4ns)$$
$$= 1instr / 5ns$$

تأخير تنفيذ التعليمة الواحدة انطلاقاً من تأخير نفاذ المرحلة هو:

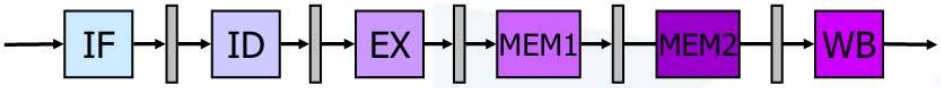
$$L = 6 \times 5ns = 30ns$$

Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب





Throughput and Latency — تأخير وانتاجية توازي الانبوب



ماهو الزمن اللازم لتنفيذ 20000 instructions في التوازي الأنبوبي المبين أعلاه؟ (أهمل الضياع الناجم عن bubbles branches, إلخ.. cache misses)

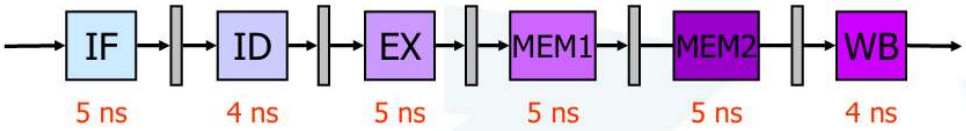
$$ExecTime_{pipe} = 20000 \times 5ns = 100000ns = 100\mu s$$

نسبة التسريع التي نحصل عليها هي:

$$Speedup_{pipe} = \frac{ExecTime_{non-pipe}}{ExecTime_{pipe}} = \frac{560\mu s}{100\mu s} = 5.6$$

Throughput and Latency

تأخير وانتاجية توازي الانبوب



نستنتج مما سبق:

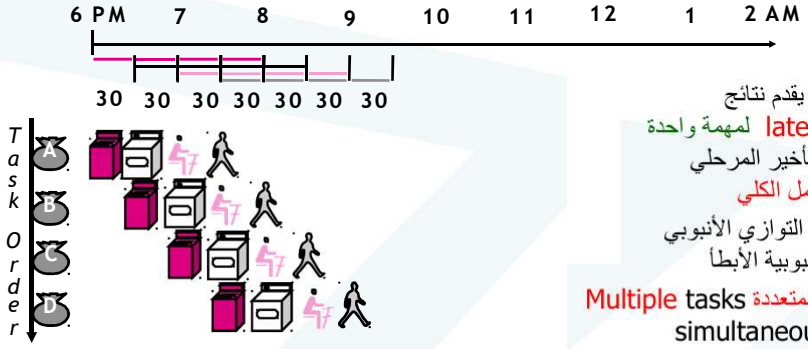
١-ضرورة موازنة التاخير في كل مرحلة من مراحل التوازي الأنبوبي

٢-تأخيرالنفاذ الأنبوبي Throughput هو 1/max(delay).

٣-التأخير Latency هو Nxmax(delay)، حيث
N هي عدد مراحل التوازي الأنبوبي.

To Pipeline, We Overlap Tasks

تداخل المهام من أجل توازي الانبوب



- التوازي الأنبوبي لا يقدم نتائج مناسبة للتأخير latency لمهمة واحدة ولكن يقدم تحسين للتأخير المرحلي throughput للحمل الكلي
- يتم ضبط إيقاع التوازي الأنبوبي وفقاً للمرحلة الأنبوبية الأبطأ
- تعالج المهمات المتعددة Multiple tasks بنفس الوقت simultaneously
- التسريع الكلي يتناسب مع عدد مراحل التوازي الأنبوبي
- الطول غير المتوازن للمراحل الأنبوبية يقلل نسبة زيادة السرعة

Example of Pipe Processing

مثال توازي عمليات

لانجاز عملية الضرب ثم عملية الجمع سيتم حفظ كل جزء في مسجل

$$A_i * B_i + C_i \qquad \text{for } i = 1, 2, 3, \ldots, 7$$

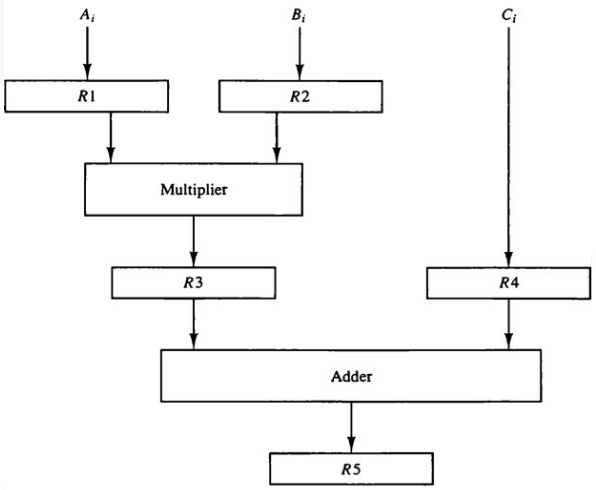
يتم تنفيذ كل تعليمة فرعية في جزء داخل خط الأنابيب. يحتوي كل جزء على مسجل واحد أو اثنين ودائرة توافقية

العمليات الفرعية التي يتم تنفيذها في كل قسم هي كما يلي:

- $R1 \leftarrow A_i, \quad R2 \leftarrow B_i$ Input A_i and B_i
- $R3 \leftarrow R1 * R2, \quad R4 \leftarrow C_i$ Multiply and input C_i
- $R5 \leftarrow R3 + R4$ Add C_i to product

Example of Pipe Processing

مثال عملية توازي انبوب



Content of Registers in Pipeline

مثال محتوى المسجلات في عملية توازي انبوب

Clock Pulse Number	Segment 1		Segment 2		Segment 3
	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$	$R5$
1	A_1	B_1	—	—	—
2	A_2	B_2	$A_1 * B_1$	C_1	—
3	A_3	B_3	$A_2 * B_2$	C_2	$A_1 * B_1 + C_1$
4	A_4	B_4	$A_3 * B_3$	C_3	$A_2 * B_2 + C_2$
5	A_5	B_5	$A_4 * B_4$	C_4	$A_3 * B_3 + C_3$
6	A_6	B_6	$A_5 * B_5$	C_5	$A_4 * B_4 + C_4$
7	A_7	B_7	$A_6 * B_6$	C_6	$A_5 * B_5 + C_5$
8	—	—	$A_7 * B_7$	C_7	$A_6 * B_6 + C_6$
9	—	—	—	—	$A_7 * B_7 + C_7$

Space Time Diagram of Pipeline

Segment:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6			
2		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6		
3			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	
4				T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6

Clock cycles