الفصل

5

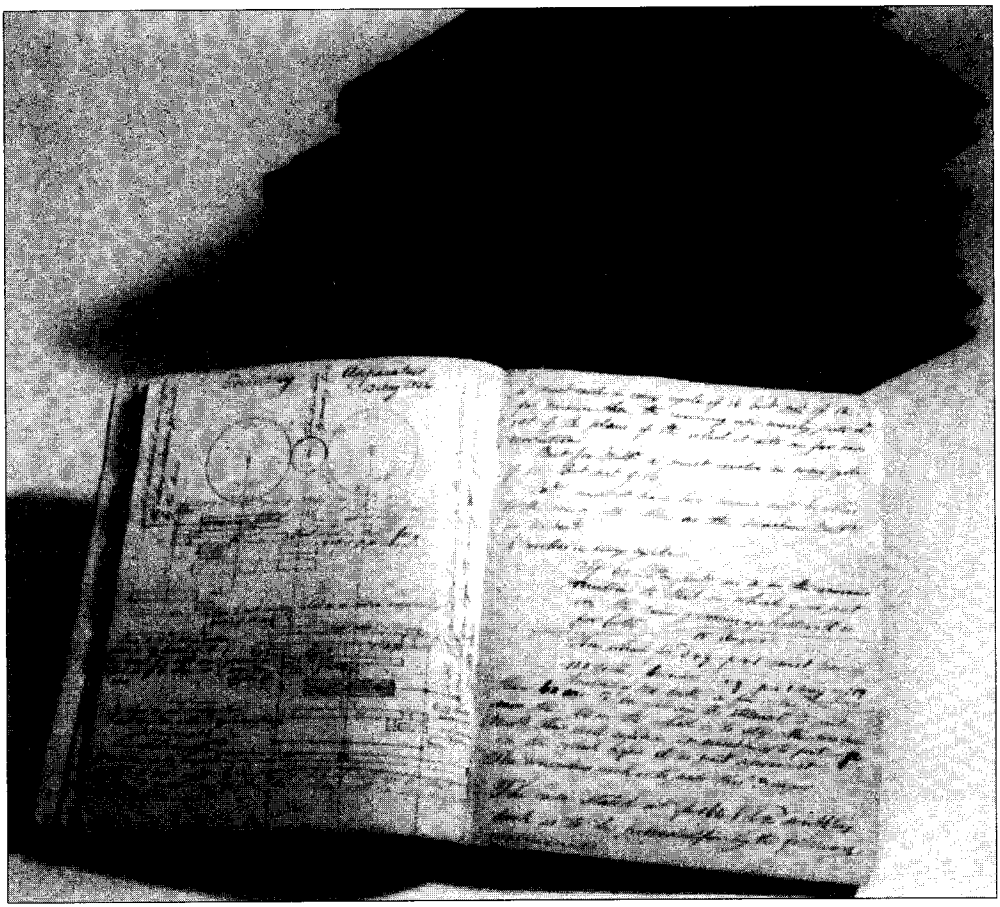
اختراع المحرك التحليلي

بدأ تشارلز بابيج، حوالي 1834، بتصميم الآلة التي ستتغلب على المحدودية الرئيسية لآلته الأخرى «محرك الفارق» التي يمكنها أن تحسب جدولاً من الأعداد بفارق واحد فقط يتم إدخاله يدوياً. فإذا ما اقتضت الضرورة تغييره بحيث يناسب صيغة ما، ينبغي تعديل الآلة بحيث تأخذ تلك القيمة الجديدة. لكن، ثمة صيغ مفيدة عديدة لا يتغير في الفارق كثيراً، من ضمنها تلك الصيغ الخاصة باللوغارتمات ودالات الزوايا في علم المثلثات.

بحث بابيج عن طريقة للتعامل مع هذه المشكلة، وسرعان ما وجدها. فلحساب جدول من جيبات الزوايا، تحقق (من علم المثلثات) أن الفارق الثاني هو الدالة البسيطة لقيمة الجيب قيد الحساب. وهكذا، كان كل ما

يحتاجه هو الطريقة التي يلقم بها قيمة ذلك الجيب (مضروبة بعامل ثابت) من محور الجدول إلى محور الفارق الثاني للآلة. بعدئذ، يمكن حساب قيم الجيبات المتسلسلة دون تدخل من الإنسان. هذا الأمر كان بابيج قد أدركه سابقاً وإلى حد كبير منذ 1822. والحقيقة، أنه ركّب عجلات إضافية داخل «محرك الفارق» الذي جمعه سنة 1832، مستخدماً إياها لتوضيح المبدأ المذكور آنفاً

احتفظ بابيج بمسودات غير رسمية دعاها «دفاتر الخربشة» التي هي وثائق التصاميم والمخططات الاستكشافية التي يبلغ مجموعها حوالي 7000 صفحة مكتوبة بخط اليد.

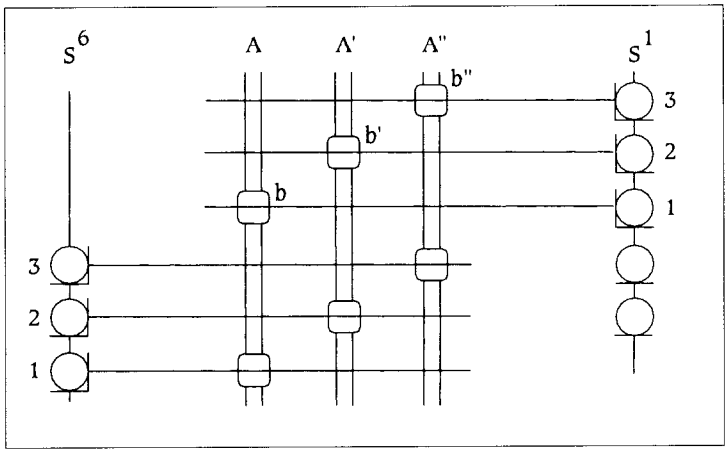


وذلك بالسماح بتلقيم عدد واحد من قيمة الجدول لعمود الفارق الثاني.

على أن بابيج لم يحاول استخدام هذه الطريقة الأكثر عمومية في محرك الفارق السبب بسيط هو أن السمة الأساسية لطريقة الفوارق هي أنها تسمح بجدولة أي دالة معقدة باستخدام الجمع فقط. والجمع سهل مكننته. لكن تلقيم القيم من محور الجدول يمكن أن يتطلب الضرب أيضاً وهو ما يجعل الآلة أبطأ وأكثر تعقيداً بكثير. فاختار بابيج التصميم الذي كان يعتقد أن بالإمكان عملياً تنفيذه.

دعا بابيج طريقته هذه في تلقيم الأعداد من محور إلى آخر بـ «المحرك يأكل ذيله». وسرعان ما بدأ يفكر بالطرق التي يمكن توسيعها بها بحيث تتجاوز قدرة ـ الرقم ـ المفرد في قسم الإيضاح الذي تم تجميعه فعلاً سنة 1832. والمخطط التالي الذي يظهر في المسودة الهندسية التي أشار إليها بعنوان غريب هو، «دفتر الخربشة العظيم».

أما عنوان الرسم فهو «خطة لضرب أي عدد في أي من محاور س وجمعها مع أي عدد آخر». إنه يبين، في هذه الحالة، محور الفارق الأول س^{1} إلى اليمين. ومحور الفارق السادس، س^{6}، إلى اليسار. لقد أضاف بابيج، بينهما، ثلاثة محاور جديدة آ، آ′، آ″، يقوم جهاز تعشيق بالوصل بين العجلات الثلاث العليا للمحور س^{1} وبين القضبان الأفقية الثلاثة التي تتصل بدورها



وتحرك الحوامل ب، ب′، ب″. هذه تدير المحاور آ، آ′، آ″. التي تدير القضبان الأفقية في الأسفل وكذلك العجلات الثلاث المرقمة بالأرقام 3، 2، 1 على المحور $س^6$ بذلك أصبح بالإمكان نقل عدد بثلاثة ـ أرقام من $س^1$ إلى $س^6$، ولكي تضربه بـ1000 يكفي أن تحركه للأسفل ثلاثة مستويات.

لكن ظلت هذه الطريقة لا تسمح بحساب أي جداول مفيدة فائدة خالصة نظراً لأن معادلة مثل: سين (س) = ك سين (س+ ي) تتطلب ضرب نتيجة واحدة بثابت متعدد ـ الأرقام إجباري هو ك بدلاً من مجرد عدد صحيح قوة عشرة مع ذلك، فإن هذا لم يمنع بابيج من اكتشاف المفهوم أكثر فأكثر ـ فكرته الأولى كانت ترتبط ارتباطاً وثيقاً بصورة «المحرك الذي يأكل ذيله». وكان بإمكانه أن يزيل القضبان الأفقية الطويلة في المخطط لو أنه، وبكل بساطة، رتب محاور المحرك على شكل دائرة بدلاً من

الخط المستقيم. بتلك الطريقة، يمكن وصل محور الجدول بصورة مباشرة تماماً بمحور الفارق الأدنى. لكن هذا الأمر كان يحدده، هو الذي كان يريد أن يكون قادراً على وصل ما بين أي محورين.

لذلك جمع ما بين المخططين. إذ أصبح المحور الأصلي في «محرك الفارق» عدة «محاور جمع» كما سماها، لأن المسننات سمحت بجمع القيمة المسجلة على واحد منها مع المحور المجاور. كما أنه دعا المحاور المرقمة بـ آ، آ′، آ″، في المخطط، «بمحاور الضرب» لأنها كانت تتيح ضرب الأعداد بعدد صحيح أس عشرة. وذلك بتدريج الأرقام صعوداً أو نزولاً بين المستويات. كذلك رتبت محاور الجمع والضرب على السواء في دائرة كبيرة حول مسنن مركزي كبير يكمن بواسطته الوصل فيها بصورة اختيارية. وهكذا، يمكن الوصل ما بين أي محور جمع بمفرده ومجموع السنن المركزي أو إبعاد آخر. كما يمكن لمحاور الضرب أن تخطو المجموعة الأول من الأرقام صعوداً أو نزولاً إلى المجموعة الثانية من المسنن المركزي الذي يمكنه بدوره إبعاد أي محور جمع مطلوب إبعاده.

بلغ بابيج هذه المرحلة خريف 1834، وهي ما يمكن أن ندعوها بالمرحلة النهائية لمحرك الفارق. لكن سرعان ما أدرك بابيج أن لخطته احتمالات تتجاوز تماماً محرك الفارق. ذلك أنها، لكي تكون مفيدة فعلاً، لا بد من أن

يكون بالإمكان القيام بعمليات الضرب بأي مجموعة من الأرقام، وليس فقط برقم صحيح قوة عشرة. الطريقة البسيطة لمكننة الضرب من خلال الجمع والنقل كان قد عمل عليها ليبنتز وكولمار، غير أن طموح بابيج كان أكبر، إذ كان يريد للضرب أن يكون آلياً تماماً وأن يتيح للقوة المخزنة على أي محور أن تضرب بالقوة المخزنة على المحور الثاني، مع النتيجة المخزنة على أي محور ثالث. فبدأت آلية الضبط لدى بابيج تتعقد.

بل أصبحت أكثر تعقيداً حين وسع بابيج الآلة بحيث تشمل التقسيم الآلي، الذي لا يمكن تحقيقه إلا بالطرح المتكرر والتدريج (تحريك القاسم بواسطة العامل 10). لكنه كان يتطلب معدات إضافية كي تسمح بمقارنة القاسم في أية نقطة مع البقية بغية رؤية أيهما أكبر والبت فيما إذا كان قد حان الوقت للتدريج أم لا.

إن كيفية تنفيذ الضرب والتقسيم هي المسألة التي اشترك بها بابيج مع مصممي الحاسوب الحديث. كذلك، أيضاً، كانت كيفية تنفيذ حمل الأعداد. ففي كل مرة يتم تنفيذ حلقة من حلقات الجمع. فإن نتيجة إضافة رقمين إلى أي مستوى بعينه يمكن أن يتطلب نقلاً إلى مستوى الأرقام الأعلى التالي، فإذا كان الرقم التالي هو 9، فإن هذا قد ينشئ نقلاً آخر وهلم جرّا. في البداية، استخدم بابيج طريقة المجال المتسلسل المؤخر التي كان قد استخدمها في محرك الفارق، حيث كانت حلقة الجمع

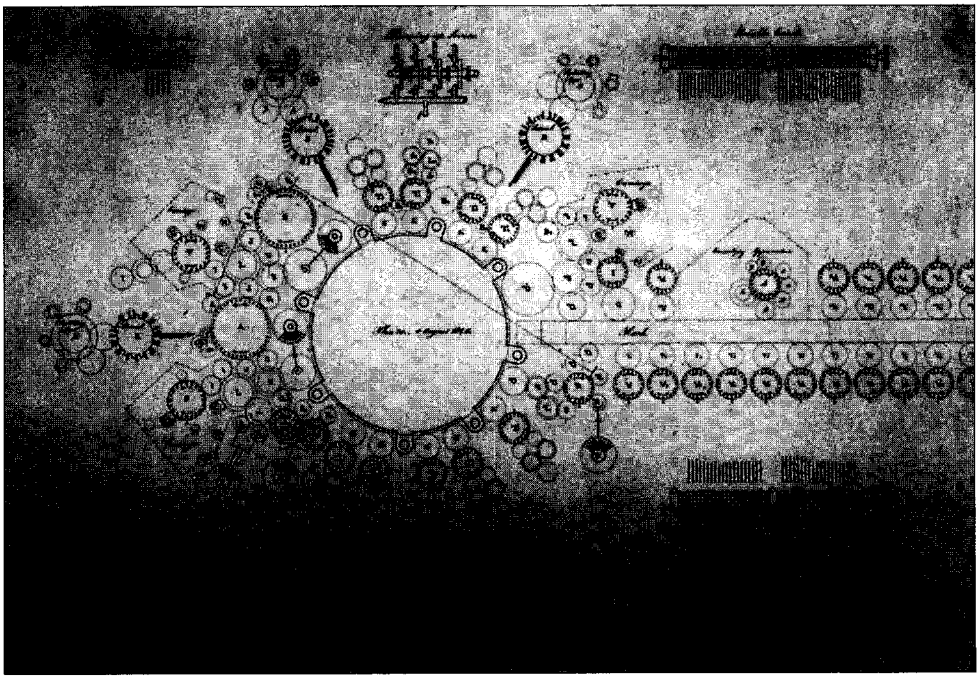
الأساسية تتبعها حلقة نقل منفصلة تقوم حلقة النقل الأولى بتنفيذ أي نقل مطلوب على الرقم الأدنى ثم تمضي إلى الرقم الأعلى التالي وهلم جرا. هذه الطريقة أجدت نفعاً، لكنها كانت بطيئة لأن تنفيذ النقل كان يتم بصورة منفصلة لكل رقم، فيما كان بابيج يفكر بالحصول على 30 أو 40 رقماً في كل عمود أعداد، وبذلك يمكن أن تأخذ عمليات النقل مقادير أكبر بكثير من الجمع ذاته. كما يمكن لعملية ضرب مفردة أن تستغرق بضع مئات من خطوات الجمع المنفصلة. وكان واضحاً أنه لا بد من تقصير زمن النقل.

جرب بابيج مختلف الطرق لجعل عملية الحمل أو النقل أقرب ما تكون إلى الكمال، وخلال بضعة أشهر تبنى ما دعاه باسم الحمل الاستباقي. فقد سمحت معدات إضافية لآلية الحمل بالتبيان الفوري للمكان الذي تقتضي فيه الحاجة للحمل بحيث أن عجلة أو أكثر مرقمة بالرقم 9 يمكن أن تجعل العدد المجهول يتضاعف بسلسلة من الأرقام. كما يتم تنفيذ كل المحمولات في وقت واحد، بغض النظر عن عدد الأرقام على المحور. إن العمل في تفاصيل الحمل الاستباقي قد استغرق من بابيج العديد من السنين، وعلى نحو أطول زمناً من أي جانب آخر من جوانب الآلة. لكن صار باستطاعته أن يسرّع العمليات إلى حد كبير، وهو ما يسوغ ذلك الجهد. بيد أن الآلية كانت أكثر تعقيداً من أن تسمح بوجود آلية حمل أعداد في كل محور جمع. فاضطر بابيج لأن يتبنى تصميماً

يمكن لآلية حمل استباقية واحدة أن توصّل، حسب الرغبة، بأي عمود جمع عبر العجلات المركزية.

حتى ذلك الحين، كانت عمليات الضرب تتم بواسطة معدات متخصصة، وكانت وظيفة النقل تتم من محاور الجمع إلى المعدات المركزية الأكثر تخصصاً. ثم سرعان ما أدرك بابيج أن بالإمكان نقل الجمع ذاته من محاور الجمع وتنفيذه عبر العجلات المركزية. أما محاور الجمع فحسبها أن تختزن الأرقام في كل عجلة من عجلاتها، بحيث يمكن وصلها أو فصلها عن المحاور المركزية حسب الحاجة. لقد فصل بابيج الآلة إلى قسم خاص بمحاور التخزين دعاه باسم «المخزنة» وقسم آخر تجري

رسم لتصميم المحرك التحليلي يوضح الترتيب العام للآلة، مع دوائر مثل عادة عمود المسننات أو العجلات منظوراً إليها من علٍ.



فيه العمليات ودعاه باسم المعمل. وهو التقسيم ذاته الموجود الآن في كل الحواسب الحديثة: رغم أننا ندعوهما الآن بالذاكرة ووحدة المعالجة المركزية.

لقد أدى تبسيط المعدات المعقدة الخاصة بالقسمة إلى مبادئ جديدة للتحكم. ففي التصاميم الأولى، كان باستطاعة الآليات المعقدة أن تستشعر أوضاع العجلات الحاملة للأرقام الخاصة بالقاسم وبالباقي، بعدئذ تقارنها واحداً واحداً لتبت فيما إذا كان يتوجب في المرحلة التالية الطرح أو النقل. بعد ذاك طور بابيج طريقة بديلة بسيطة، تفترض بموجبها الآلة ببساطة أن القاسم أصغر وتقوم بعملية الطرح. فإن كان الافتراض خاطئاً، يصبح الباقي سلبياً، وهذا سيتضح من العجلة العليا ومن محورها الذي سيدل على الإشارة. في هذه الحالة، تمضي الآلة إلى سلسلة خاصة حيث تعيد جمع القاسم مع الباقي وتنزل بالقاسم رقماً واحداً ثم تستأنف الطرح. هذه العملية بسطت المعدات إلى حد كبير وكان لها دلالات هامة بالنسبة إلى التصميم العام. وسرعان ما رأى بابيج أن بإمكانه أن يستخدم تغير العلامة على المحور الترقيمي لضبط مجرى العمليات. أي بعبارة أخرى، إذا كانت النتيجة إيجابية، فإن الاختبار الميكانيكي سيجعل المحرك يتابع سلسلة المراحل المعتادة، لكن إذا كانت سلبية، يتحول المحرك إلى سلسلة أخرى.

لكن، لم تكن كل التغييرات في اتجاه التبسط، إذ أن

بابيج كان متلهفاً لتسريع عمليات الحساب. ومن الأمثلة على معدات الجمع التي تحقق السرعة كان الضرب بواسطة الجدول. فحسب الطريقة الأولى، أي الضرب بتكرار الجمع، كان عدد حلقات الجمع يمكن أن يكون مساوياً لمجموع أرقام عدد الضرب. أي لكي نضرب 38,471 بـ 694 مثلاً، لا بد من جمع الرقم 19,38471 مرة (6+ 9+ 4) إضافة إلى ثلاث نقلات. وقد كانت خطة بابيج أن يعمل على أعداد، أرقامها تصل حتى الـ40، وضرب عددين ذوي 40 رقماً معاً سيتطلب تماماً 200 حلقة جمع.

أدرك بابيج أنه، بتخصيصه بضع حلقات عند البدء بعملية ضرب طويلة، لإجراء إعدادي، يمكنه أن يسرِّع إلى حد كبير عملية الضرب ذاتها. ودعا هذه الطريقة، بالضرب بواسطة الجدول، إذ بات باستطاعته، في 9 حلقات، أن يحسب ويضع على محاور الجدول الخاصة في المعمل مضاعفات الرقم 9 الصحيحة الأولى للمضروب. بعدئذ يمكنه وبكل بساطة أن يلتقط واحداً من هذه لكل رقم من أرقام المضروب فيه ويضيفه إلى ناتج الحساب. في هذه الحالة بات ضرب عددين كل منهما 40 رقماً يستغرق أربعين حلقة جمع فقط إضافة إلى 9 لتشكيل الجدول، أي ما مجموعه 49 حلقة جمع بدلاً من حوالي 200. كذلك فإن طريقة مشابهة للقسمة بالجدول استطاعت أن يسرع عملية التقسيم.

في مطلع 1835، بات للمحرك الجديد أنواع جديدة

ومختلفة من المحاور المختصة التي كان لا بد منها من أجل التوصيل فيما بينها بمختلف الطرق، حسب العملية التي كان يراد إجراؤها. الأمر الذي تطلب طريقة أكثر ارتقاء للتحكم بالآلة، والطريقة التي توصل إليها بابيج في العام التالي كانت تشتمل على عدة مركبات أولية.

لقد كانت المشكلة الأساسية هي مشكلة التحكم التي يمكن بواسطتها وصل المحاور بأي عجلة مركزية في أي وقت. فصمم بابيج لهذه الغاية أسطوانة عليها أزرار، وهي «برميل» يشبه كثيراً الأسطوانة الموجودة في العلبة الموسيقية الميكانيكية حيث توجد أزرار صغيرة تجعل العتلات تضرب ألحاناً مختلفة مع دوران الأسطوانة، غير أن أزرار برميل بابيج كانت ذات أطوال مختلفة، ومع دوران البرميل، خطوة واحدة كل مرة، كانت الأزرار تحرك عتلات التحكم التي تحدد بدورها وضعيات المسننات الصغيرة (التروس الصغيرة). هذه التروس الصغيرة ذات الدوران ـ الحر يمكنها، بوضعية معينة، أن تصل ما بين العجلات على محور معين والعجلات المركزية، في الوضعية الأخرى، تتركها تنفصل. بهذه الطريقة، وبفضل تحكم الأزرار الموجودة على البرميل الأسطواني، تنتقل الأعداد من محور إلى آخر.

هذه الطريقة العامة بالتحكم هي الجانب الذي عاش من تصميم المحرك، رغم أن وظيفته تغيرت تغيراً هاماً تاماً. ففي صيف 1835، كان التصميم يستدعي أن يكون

لكل محور أعداد، ولكل محور وظيفة متخصصة، برميله الخاص، مع صفوف من الأزرار مرتبة على الدوام لكل عملية حسابية أساسية، وكان يتم التحكم بالوضعيات الدورانية لكل أسطوانة من هذه الأسطوانات بواسطة أزرار الطبلة المركزية، وهي أسطوانة مماثلة ذات صفوف من الأزرار يمكن وضعها باليد من أجل سلسلة مرغوبة من العمليات. وهكذا، يمكن أن يوضع صف من الأزرار على الطبلة المركزية مع أزرار لها التأثير ذاته كأن يقول: «ضع التروس الصغيرة بحيث يُلقَّم المحوران المتغيران 7 و24 لأعمدة الضرب»، فيقول الصف الثاني: «قل لأعمدة الضرب أن تبدأ سلسلة ضربها». ويقول الصف التالي: «خذ الناتج الذي تدل عليه أعمدة الضرب وخزِّن النتيجة على المحور المتغير 32».

وكانت هذه طريقة مرنة ومتطوّرة إلى حد كبير للتحكم بالآلة. لكن حتى دون أن يصنع بابيج نماذج تجريبية فقد كان على يقين من أنها غير صالحة للتحكم بالمحرك الحاسب في العمل المعقد ذاته الذي يحتمل أن يصل فيه. فمهمة وضع الأزرار وإعادة وضعها يدوياً في الطبلة المركزية لكي تطلب من الآلة ما عليها أن تفعل كانت عملية مزعجة وعرضة للخطأ مما يقلل من إمكانية الاعتماد عليها. والأسوأ أن طول أية مجموعة من التعليمات سيحددها حجم الطبلة.

إن صراع بابيج مع مشكلة التحكم قد أدى به إلى

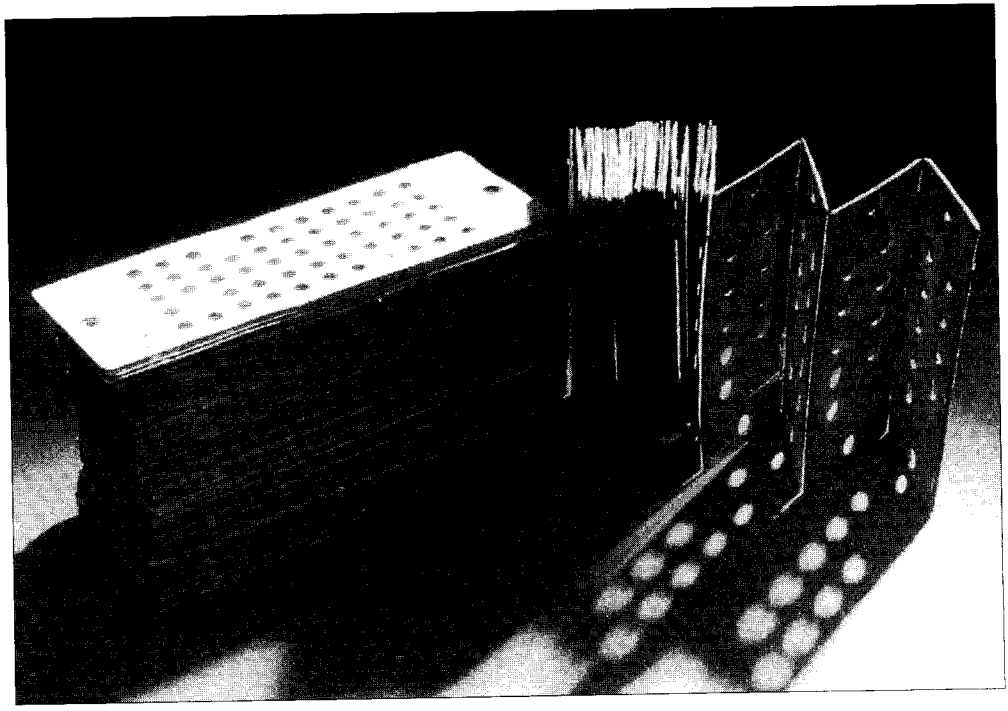
خرق حقيقي حدث في 30 حزيران 1836. فقد أعد العدة لتقديم المعلومات والمعطيات إلى المحرك ليس بتدوير عجلات الأعداد وأزرار التوضع، بل بواسطة إدخال البطاقة المخرّمة. وهذه لم تلغ الطبلة المركزية ولم تحل محلها. بل إن البطاقات المخرمة وفرت مستوى علوياً جديداً من تراتبية التحكم يقوم بالتحكم بوضعية الطبلة المركزية التي بقيت لكن منذ الآن فصاعداً بواسطة سلاسل دائمة من التعليمات. لقد أخذت على عاتقها وظيفة البرمجة ـ الميكروية وهي مألوفة كثيراً لدى الأجيال الحديثة من مهندسي الحاسوب.

لم يبدع بابيج فكرة البطاقة المخرمة من العدم. فقد كانت تستخدم على نطاق واسع وكانت معروفة جيداً في التحكم بأنوال الأقمشة. إنها الطريقة التي اخترعها في القرن الثامن عشر الفرنسي جاك دي فوكانسون ثم حسنها وأضفى عليها الصبغة التجارية مواطنه جوزيف جاكار حوالي نهاية ذلك القرن. في آلة جاكار، هذه، كانت ثمة سلسلة من بطاقات كرتونية سميكة لها ثقوب في وضعيات مناسبة تنظم إلى بعضها بعضاً من أطراف بواسطة شريط متصل. في أية مرحلة بعينها، يمكن الضغط على بطاقة بعينها بمجموعة من العتلات التي تتحكم بالأسلاك التي تحرك خيوط السداة لتحديد النموذج الذي سيحاك على القماش، فكان جاكار أول من أتاح فرصة التحكم الآلي بالنماذج المعقدة.

بمجيء عام 1900، كانت البطاقات المخرمة قد

أصبحت عدة أساسية لجدولة الأعداد، قام بإدخالها هيرمان هولريث، وهو إحصائي يعمل في مكتب الإحصاء في الولايات المتحدة الأمريكية. لقد استخدمها في إحصاء 1890 لتسجيل المعطيات آلياً. حينذاك استطاع هولريث أن يستبدل قضبان بابيج الميكانيكية بفراشٍ كهربائية، وسرعان ما اخترعت الآلات الخاصة بتصنيف أكوام البطاقات وعدها. هذه المعدَّة وفرت جهاز الإدخال - الإخراج الرئيسي الخاص بالحواسب من 1945 إلى حوالي 1980. إن استخدام بابيج للبطاقات المخرمة هو الذي أذن وعلى نحو ملحوظ تماماً، باستخدامها لاحقاً، حتى وإن كانت نسخته تعتمد على الاستشعار الميكانيكي

لقد كان يتم إدخال التعليمات والمعطيات إلى المحرك التحليلي باستخدام البطاقات المخرمة. بطاقات العمليات الأصغر تحدد العمليات الحسابية التي ينبغي إجراؤها، فيما البطاقات المتغيرة الأكبر تملي «عناوين» الأعمدة. حيث توجد الأعداد التي يتعين العمل عليها وحيث يتعين أيضاً وضع النتائج.



للثقوب بدلاً من فراشي هولريث الكهربائية ومن تبعه من مخترعين.

وإذا كان المرء مضطراً لأن يختار تاريخاً بعينه تم فيه الانتقال من محرك الفارق إلى المحرك التحليلي انتقالاً كاملاً. أي حين «اخترعت» الآلة الأخيرة بصورة نهائية، فربما يكون ذلك التاريخ هو 30 حزيران 1836، عندما اختيرت البطاقات المخرمة كآلية للإدخال. أما التصميم الكامل فلسوف يستغرق سنة أخرى ونصف السنة، أي حتى كانون الأول 1837، حين كتب بابيج نهائياً بحثه الموسع «عن القدرات الرياضية للمحرك الحاسب» الذي يصف فيه الآلة. تابع بابيج عمله التصميمي سنين كثيرة أخرى، لكنه كله كان يتعلق بالتفاصيل وبدائل التنفيذ، إنما دون أي تغيير على المبدأ. في 1837 ابتكر بابيج آلة سيبقى تنظيمها الأساسي دون تغيير على المبدأ. في 1837 ابتكر بابيج آلة سيبقى تنظيمها الأساسي دون تغيير طوال عمله اللاحق كله، بل بالحقيقة طوال مرحلة التطوير اللاحقة بكاملها لتصميم الحاسوب.

يتأتى مبدأ التصميم من التقسيم الرباعي لوظائف الآلة.

1 ـ الإدخال. بدءاً من عام 1836 فصاعداً، باتت البطاقات المخرَّمة الآلية الأساسية للتغذية في الآلة. سواء التغذية بالمعطيات الرقمية أو التعليمات عن كيفية التعامل معها.

2 - الذاكرة: بالنسبة إلى بابيج، كانت هذه أساساً هي محاور الأعداد في المخزن، رغم أنه طور أيضاً فكرة منظومة الذاكرة التراتبية باستخدام البطاقات المخرمة الخاصة بنتائج الجمع الوسيطة التي لا يمكن إدخالها في المخزن.

3 - وحدة المعالجة المركزية. إنها العمل، لدى بابيج، وهي، شأنها شأن الوحدة المعالجية الحديثة تعمل من أجل تخزين الأعداد المعمول عليها فوراً (مسجلات). وهناك آليات من أدوات معدنية خاصة بإخضاع هذه الأعداد للعمليات الحسابية الأساسية، وآليات للتحكم خاصة بترجمة التعليمات الصادرة - من قبل - المستخدم تقترح من الخارج لتتحول إلى تحكم تفصيلي بالمعدات الداخلية، وآلية توقيت زمني (ساعة) لتنفيذ المراحل التفصيلية ضمن سلسلة موقتة بدقة.

4 - الإخراج: آلية بابيج الأساسية هنا، كانت دائماً الجهاز العام، لكنه كان يفكر أيضاً بأجهزة إخراج خطية قبل حتى أن يفكر بالبطاقات المخرمة من أجل الإخراج مثلما هي للإدخال أيضاً.

يمكننا أن نرى في الصورة الموجودة على الصفحة 119 الطريقة التي كان بابيج قد نظم بها المخزن والمعمل في محركه ووصل بينهما، طبقاً لوصفه في بحثه المقدم عام 1837، وهي الصورة التي لا تتضمن الإدخال

والإخراج. إنها نظرة تخطيطية للمحرك وكأنك تنظر إليه من فوق. في الأعلى ثمة قسم التخزين الذي يتضمن ستة محاور متنوعة مرقمة من V1 إلى V6. قد يكون المخزن عملياً، أطول بكثير وذلك بإضافة محاور متنوعة أكثر بكثير، كان بابيج يفكر أحياناً أن تكون كحد أدنى 100 وكحد أعلى 1000. كل محور متغير يحتوي على عجلات رقمية كثيرة تدور حول محور مركزي وكل منها يحمل رقماً من أرقامه المتغيرة. وكان بابيج عادة يخطط لأن يكون لديه 40 رقماً لكل متغير، على أن تسجل عجلة إضافية واحدة في الأعلى ما إذا كانت القيمة إيجابية أم سلبية.

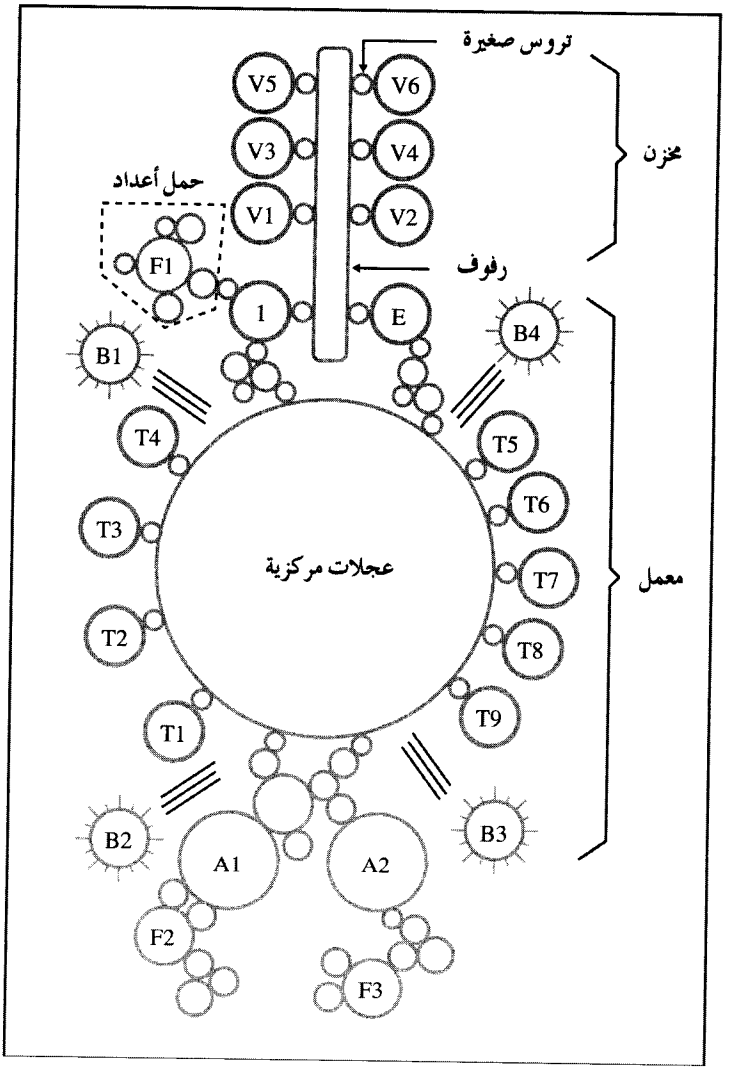
وكان يجري بين المحاور المتغيرة، الرفوف وهي شرائح طويلة من المعدن ذات حواف مسننة طبقاً للمسنين تنقل الأرقام ذهاباً وإياباً بين المخزن والمعمل. كما كانت تتوضع تروس صغيرة متحركة إما لوصل محور متغير بعينه إلى الرفوف أو لفصله. فإذا مضى عدد إلى داخل المعمل، ستوصل الرفوف أيضاً بمحور الدخول في المعمل (مرقَّم بـ I). من هناك، يمرر إلى جزء مناسب آخر من أجزاء المعمل. وحين ينتهي المعمل من العمل على العدد، يوضع على محور الخروج (مرقم بـ E). عندئذ يمكن وصله بالرفوف التي تمرر العدد على طول إلى أي محور تم اختياره لحمل النتيجة.

أما المعمل فهو القسم السفلي المرتب حول عجلات

مركزية كبيرة تربط ما بين أجزائه. لكن للتوضيح. ليست كل جوانب المحرك مبينة في هذا المخطط، وإن كان هذا قد يخفي تعقيد الآلة وحجمها، فالعجلات المركزية وحدها كانت بقطر يزيد على القدمين، والمعمل ككل كان حوالي 4,5 قدم في كل اتجاه. والمخزن ذو الـ100 محور متغير كان سيبلغ حوالي الـ10 أقدام طولاً.

كما كان لمحور الدخول آليته الخاصة بالحمل الاستباقي وقد رقمت بـ F1 حيث يمكن القيام بعمليات الجمع أو الطرح هناك ومن ثم تمريرها مباشرة إلى محور الخروج بغية تخزينها. وإذا ما كانت تجري عملية ضرب، فإن أرقام الضرب التسعة الأولى يمكن أن تجمع على محور الدخول ثم تخزن على محاور الجدول، كما هو مبين من T1 إلى T9.

أما نتائج الضرب أو التقسيم الكاملة فإنها تتشكل على العمودين المرقمين بـ A1 و A2 في أسفل الصور. الأمر الذي جعل بالإمكان حمل النتائج الوسيطة على شكل «ضبط مضاعف». أي، إذا ضرب عددان لكل منهما 40 رقماً معاً، فإن نتيجته من 80 رقماً يمكن أن تحفظ على المحورين A1 وA2، كما أن قسمة لاحقة على عدد آخر من 40 رقماً يسمح أيضاً بنتيجة دقيقة من 40 رقماً. مثال مختصر على ذلك يوضح هذا وهو استخدام أعداد من ثلاثة أرقام. فعندما تضرب 111 بـ 999 يكون الناتج عدداً من ستة أرقام 110889، فإذا قسم الناتج الآن على 222

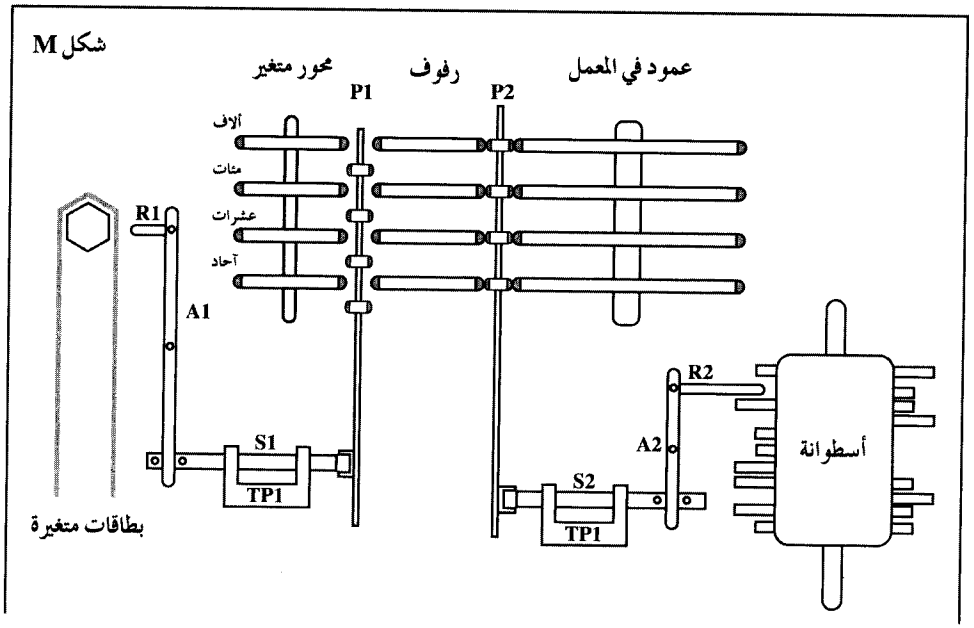


كانت الأرقام الثلاثة الأول من الجواب هي تماماً 494. لكن، إذا كانت الأرقام الثلاثة الأعلى وحدها هي التي استبقيت من عملية الضرب، أي 110، حينذاك يكون ناتج القسمة التي تلي ذلك هو رقم خاطئ قليلاً، 495. تستقي

الحواسيب الحديثة مرحلة «ضبط مضاعف» خاصة بالضرب وذلك لضمان دقة النتائج لهذه العمليات الحسابية.

يبين المحوران F2 و F3 آلية الحمل الاستباقي الخاصة بالأعمدة A. وكما هو مبين في الشكل الرمزي (B1 إلى B4) هناك 4 براميل ذات أزرار بارزة هي التي تتحكم بالعمليات الداخلية للمعمل.

تظهر أيضاً بعض تفاصيل التحكم الأخرى في الشكل المبسط للمصدر M على الصفحة 121. إنه مقطع عرضاني، وكأن المرء يختلس النظر عبر الرفوف من طرف الآلة إلى طرفها الآخر. كذلك يظهر محور متغير كعينه. فيما لا يظهر في هذا المصدر إلا 4 من أصل 40 عجلة مرسومة. في هذه الحالة، نرى محور الترس الصغير P1 في وضعيته الأدنى، تاركاً المحور المتغير ينفصل عن الرفوف. لكن يمكن أن يتصل، إذا ما جاءه أمر من بطاقة متغيرة. ومن الممكن رؤية سلسلة من هذه البطاقات المخروزة معاً (الحافة على الحافة) إلى يسار الصورة، متدلية فوق حامل البطاقات C. أما الذراع A1 فيدور حول مركز، فيما قضيب صغير هو R1، يبرز من أعلاه ويستشعر ما إذا كان هناك ثقب في البطاقة المتغيرة الراهنة تتطابق مع المحور المتغير المبين. إن كان هناك ثقب، يمكن للطرف العلوي لـ A1 أن يدور إلى اليسار، فيما الأسفل يدور إلى اليمين. مما يسبب انزلاق S1



بحيث ينطبق على الحافة البارزة المبينة في أسفل محور الترس الصغير P1. الآن، يشكل TP1 جزءاً من المنصة المتنقلة التي تحرك صعوداً ونزولاً وبمقدار ضئيل في الأوقات المناسبة حاملة معها S1. فإذا انطبق S1 على P1، حين ترتفع، فإن P1 سيرتفع صاعداً أيضاً، واصلاً عجلات المحور المتغير بالرفوف المطابقة.

يظهر أيضاً إلى يمينها الرفوف بضع عجلات من عمود المعمل المجاور للرفوف (إما محور الدخول أو محور الخروج). وكما هو مبين، فإن عجلاته تتصل بالرفوف بواسطة عجلات الترس الصغير لـ P2. مع ذلك، يمكنها أن تنفصل إذا ما وجهتها الأسطوانة المبينة إلى اليمين والأسفل، يدور الذراع P2 حول مركزه، فيما يمكن

للقضيب الصغير R2 أن يرفع من أعلاه نحو اليسار بواسطة الزر المجاور في الرف إلى الجانب اليساري من الإسطوانة. لكن لا شيء هناك، لذا يمكن لـ R2 أن يدور إلى اليمين، مسبباً انزلاق S2 كي يتحرك إلى اليسار ثم ينطبق على الحافة البارزة في أسفل العمود P2. وإذا ما تابعت المنصة المتنقلة TP2 بعدئذ عبر حلقة الحركة نزولاً، فإن P2 سينزل أيضاً فاصلاً الرفوف من محور المعمل.

للأسطوانة المبينة في رسم الإيضاح حوالي 10 وضعيات للزر فقط في كل صف شاقولي. لقد كانت الأسطوانات، في الآلة الفعلية، أكبر بكثير، لأنها كانت تتحكم بتداخل آلاف القطع، وتنسقها. إذ كان باستطاعة كل صف أن يحوي ما يصل إلى 200 وضعية زر، وكل أسطوانة يمكن أن يكون فيها 50 إلى 100 صف منفصل. وكان للآلة كلها عدة أسطوانات مختلفة تتحكم بالأقسام المختلفة. بالطبع، كان يتعين على الأسطوانات أن تكون متناسقة تناسقاً محكماً مع بعضها بعضاً. ففي العملية العادية، تدور كل أسطوانة من هذا الصف إلى الصف المجاور من أجل حلقات الآلة المتتالية. فيما وقائع خاصة تبت في بعض المعالجات الأخرى. مثال على ذلك، باستطاعة الأسطوانات أن تأمر صفاً معيناً بالدوران إلى الوراء عدداً معيناً من الصفوف وعلى نحو يمكن به تكرار السلسلة.

يبين الشكل M البطاقات المتغيرة فقط كشكل خارجي للإدخال. لكن، عملياً، كان هناك أربعة أنواع من البطاقات المخرمة ذات الوظائف المختلفة، فالبطاقات

العددية كانت تستخدم لتحديد قيمة الأعداد التي سيتم إدخالها في المخزن، أو الأعداد التي ستستعاد من المخزن بغية التخزين الخارجي، والبطاقات المتغيرة التي تحدد أي المحاور في المخزن يجب أن يكون مصدر المعطيات الملقَّمة للمعمل أو متلقي المعطيات المستعادة منه. أي، باللغة الحديثة، هم يزودون الذاكرة بعنوان المتغيرات التي ستستخدم.

أما بطاقات العمليات فتحدد الوظائف الرياضية التي يجب القيام بها. والمحتوى المنطقي لبطاقة العملية يمكن أن يكون أشبه بهذا المثال: «خذ الأعداد من المحاور المتغيرة التي تحددها البطاقتان المتغيرتان التاليتان، واجر لها عملية ضرب في المعمل. خزِّن النتيجة في المحور المتغير الذي تحدده البطاقة المتغيرة الثالثة». هذا الأمر تفسره قضبان الاستشعار في جهاز قراءة بطاقات ـ العمليات ثم يترجم داخلياً على هذا النحو: «قدِّم البطاقات المتغيرة موقعاً واحداً ودوِّر كل الأسطوانات إلى وضعية الانطلاق من أجل سلسلة ضرب ـ وتخزين عادية. فيما بطاقات الضم تتحكم بالكيفية التي تدوَّر بها بطاقات العمليات إلى الوراء أو الأمام بعد اكتمال عمليات محددة. وهكذا، يمكن لبطاقة عمليات أن يكون لها محتوى منطقي كهذا: «حرّك البطاقات المتغيرة إلى الأمام 25 موقعاً، ثم ضع بطاقات العمليات على نقطة بدء المجموعة التي تخبرك كيف يمكن استخلاص جذر تربيعي».

كان بابيج يخطط لأن يُدخِل بطاقات الضم ضمن

بطاقات العمليات التي تتحكم بها، وبذلك فإن المجموعات الأربع من البطاقات تتطلب ثلاث قارئات بطاقات فقط (زائد بطاقة مخرمة واحدة، لكون بطاقات الأعداد مخرجة من الآلة).

وهكذا، كان بابيج قد صمم آلة متطورة في مبادئ تحكمها على الأقل تطور الآلات التي أعقبتها حتى حوالي 1950. تفاصيل العمليات الصغيرة كانت تحددها أدوات اللب الأساسية التي كانت تتحكم بها الأسطوانات، فيما يتحكم بهذه الأسطوانات بطاقات العمليات والبطاقات المتغيرة. وهذه بدورها يتحكم بها بطاقات الضم.

ينظر بعض مؤرخي صنع الحاسوب الحديثين إلى التقسيم الثلاثي لإدخال التعليمات أي بطاقات متغيرة، وعمليات، وفُهم على أنه قديم بالٍ. فقد اعتدنا على الإجراء الذي يحدد فيه دفعه ـ التحكم، العمليات، المعطيات، وعناوين التخزين كلها بعبارة مفردة هي «تيار التعليمات» لكن هذا يحط من قدر ما أنجزه بابيج بطريقة تصميم السطح البيني للبرمجة، رغم أنه لم يتوفر له قط الآلة العملية التي كان يحتاجها لكي يبرمج.

ولسوف يكون من العدل أن نقول إن سلسلة بطاقات العمليات لم تكن تقدم برنامجاً، بالمعنى الحديث للكلمة، بل سلسلة من النظم الفرعية. أما بطاقات الضم فكانت تقدم المصطلحات، برنامج دفق ـ التحكم، استدعاء النظم الفرعية بقيم النداء ـ بواسطة ـ المرجع التي تقدمها البطاقات المتغيرة. فيما مفاهيم بابيج عن البرمجة كانت تتضمن بكل

وضوح ما ندعوه بالحلقات، النظم الفرعية والفروع (وهو ما دعته الأجيال اللاحقة من المبرمجين بتعليمات «إذا» أو «إذا ـ بعدئذ») كان بابيج يدرك أن البرامج أو النظم الفرعية (وليست هذه المصطلحات التي استخدمها بالتأكيد) بحاجة للتدقيق والتحقق ـ وهو ما سوف ندعوه بالمصطلح debugged. كما كان يعلم أيضاً أنه سيكون أمراً بالغ الأهمية أن نعيد تسيير البرامج المحققة على المجموعات الجديدة من المعطيات، بل وأن نشرك البرامج داخل محركات الضرب. بذلك، كانت الطريقة الطبيعية والعملية هي أن نحدد المعطيات باعتبارها مستقلة عن العمليات. ولما كان غير ذي خبرة في برمجة الحاسوب الفعلي، فليس بالأمر المفاجئ أن بابيج لم يتوصل إلى المفاهيم الحديثة للغات أو المفسرين أو المؤلفين الأعلى مستوى. فأفكاره حول ما يرقى إلى تجميع برمجة لغة لا تتطابق تماماً مع ما ظهر في مطلع خمسينيات القرن العشرين، في بداية عصر الحاسوب الإلكتروني. مع ذلك. ليس ثمة داع للقول إن صوغه لمجموعة مفاهيمه كان أدنى من حيث الأساس، مما تلاه، بأي شكل من الأشكال، بل لعل تلك المفاهيم كانت، بشكل ما أكثر تجريبية، أكثر قوة، وأكثر عمومية.

وعلى الرغم من أن بابيج لم يكن يتوقع أن يكمل محركاً تحليلياً واحداً فعلاً، إلا أنه كان يعلم أن تصميم المحرك سيتطور مع الزمن، وكان هذا يعني أن صيغة بطاقته الأولية يمكن أن تتغير أيضاً. وبذلك، فكر مسبقاً بالحاجة لآلات متخصصة يمكنها أن تحوّل ما بين الصيغ

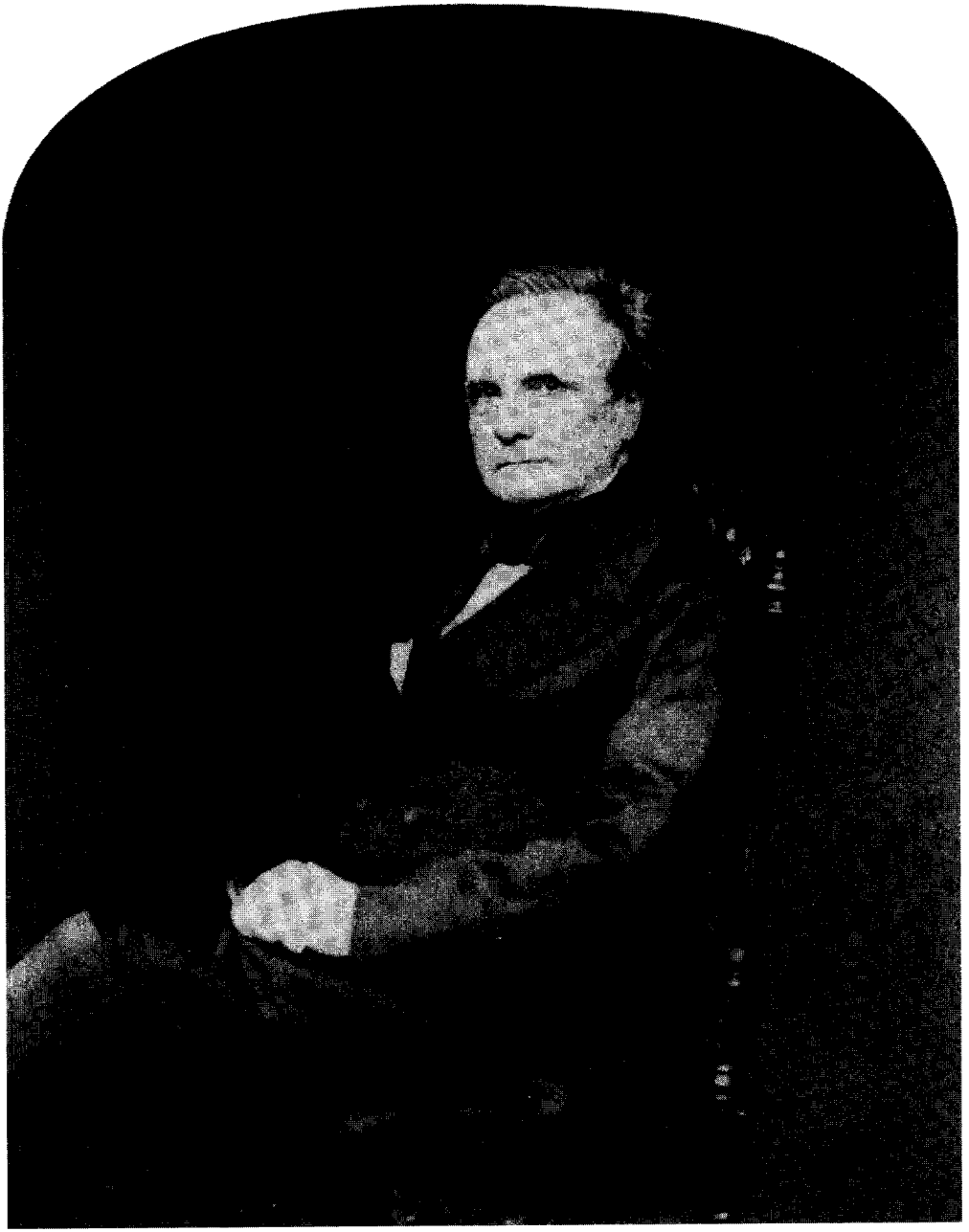
التي تستخدمها نماذج مختلفة من المحركات التحليلية كما كان بابيج يعلم أن آلته ستجعل بالإمكان **نظرياً** إجراء حسابات أكثر دقة واتساعاً مما كان يجري يدوياً على الإطلاق غير أن تلك الحسابات ستكون ممكنة. **عملياً** فقط بوجود آلة يمكن الاعتماد عليها إلى درجة عالية وسريعة تماماً. لقد علم، منذ بدايات عمله، أن إمكانية الاعتماد هذه تتطلب مسننات لا تدور بسرعة كبيرة. بل ينبغي التوصل إلى السرعة الإجمالية من خلال التصميم البارع لا من خلال القوة الخام. ذلك هو ما حرك العبقرية المكثفة التي استثمرها بابيج في طرائق توفير الوقت، كالحمل الاستباقي والضرب بواسطة الجدول مثلاً.

في الآلة التي صممت في أواخر ثلاثينيات ذلك القرن، كانت عملية جمع مفردة لعددين كل منهما 40 رقماً، تستغرق حوالي 19 ثانية، لكن مقداراً كبيراً من هذا الوقت كان يضيع في تحريك الأعداد بين الأقسام المختلفة قبل الجمع الفعلي أو بعده.

وعلى نحو مماثل تم تسريع الضرب والقسمة بتصميم منطقي ذكي. بحيث تتوقف المدة الزمنية على عدد الأرقام الموجودة في الأعداد. لنأخذ حالة ضرب 20 رقماً بـ40 رقماً (درجة عالية جداً من الدقة حتى بالمعايير الحديثة). هذه العملية إذا ما استخدمنا طريقة الجمع والتدرج المباشرة، وبغرض أن كل عملية جمع استغرقت 3,1 ثوان، ستستغرق لانجازها 8 دقائق تقريباً. بينما

استطاع بابيج أن يخفضها إلى أقل من دقيقتين. هذه الأيام. مع سرعة المعالج ـ الميكروي الذي يجري ملايين عمليات الضرب بالثانية، فإن سرعة الدقيقتين هاتين تبدو بطيئة إلى درجة غير معقولة. لكنها كانت إنجازاً عظيماً في حينها أي قبل أكثر من قرن على الحاسوب الإلكتروني.

أخيراً، ومن منظور هذه الأيام، من المهم أن نلاحظ أن بابيج كان يدرك أن السرعة يمكن أن تتأثر تماماً بالقاعدة الترقيمية التي تمثل فيها المتغيرات. فقد انطلقت تصاميم بابيج من افتراض نظامنا العشري المألوف ومن استخدام الـ10 كأساس. لكنه كان يأخذ بعين الاعتبار أنظمة داخلية أخرى، مع أسس تتراوح بين النظام الاثنيني (أساس 2) والنظام المئوي (أساس 100)، لكن دون أن يثبت بالبرهان أن هذا سيحسن الأداء، كان دائماً يعود إلى التصميم العشري. أما الحواسب الحديثة فكلها تعمل بالنظام الثنائي بصورة أساسية ذلك أن المعدات الإلكترونية التي صنعت منها لها حالتان أساسيتان اثنتان فقط: «شغال» و «غير شغال». لكن هذا لا ينطبق على عجلات المسننات، على أن استخدام النظام الثنائي في الحاسوب الميكانيكي كان سيزيد إلى حد كبير من عدد القطع والحجم الإجمالي وسيجعل المحرك أبطأ كثيراً. ولقد تمسك بابيج بالآلة العاملة بالنظام العشري كخيار للتصميم بعد طول دراسة وتأمل.



هذه الصورة الفوتوغرافية التقطت في المؤتمر الإحصائي الدولي الرابع الذي عقد في لندن سنة 1860، حين كان بابيج في الـ68 من عمره.