



قانون مور زوزه‌کنان در حال رسیدن به خط پایان است. 50 سال پیش گوردون مور برای [صنعت] الکترونیک آینده روشنی را پیش‌بینی کرد. ایده‌های او بعدها در قالب اصلی سامان‌بخش موسوم به قانون مور تلخیص شد. اصلی که فناوری را به‌گونه‌ای سرسام‌آور به پیش برده است. همه ما از توسعه شگفت‌انگیزی سود برده‌ایم که جهان مدرن ما را با قدرت شکل داده است. ما در این گزارش ویژه، این تاریخ بزرگ را جشن می‌گیریم و نیز به افول گریزناپذیر این روند می‌پردازیم. ما درمی‌یابیم پایان قانون مور به‌ناگاه و نامحسوس روی نخواهد داد، بلکه به‌تدریج و به‌گونه‌ای پیچیده رقم خواهد خورد. قانون مور به‌راستی هدیه‌ای است که همچنان به دهش و شگفت‌آفرینی خود ادامه می‌دهد.

این مطلب یکی از مقالات پرونده ویژه «**پنجاه سالگی قانون مور**» است. برای دانلود رایگان کل این پرونده ویژه [اینجا](#) را کلیک کنید.

با نگاهی دوباره به آن مقاله معروف و مهم، می‌توان جزئیاتی را بیان کرد که اغلب نادیده گرفته شده‌اند. نخست این‌که پیش‌بینی مور تقریباً شمار اجزای الکترونیکی را مد نظر داشت؛ یعنی، نه فقط ترانزیستورها بلکه قطعه‌هایی مانند مقاومت، خازن‌ها و دیودها را نیز شامل می‌شد. در بسیاری از مدارهای مجتمع اولیه شمار مقاومت‌ها عملاً بیش از تعداد ترانزیستورها بود. پس از آن نیز مدارهای نیمه‌رسانای اکسید آهن (MOS) ساخته شدند که کم‌تر به بخش‌های غیرترانزیستوری وابسته بودند و دوران دیجیتال آغاز شد. ترانزیستورها در این صنعت سیطره یافتند و شمار آن‌ها به معیاری برای سنجش پیچیدگی مدارهای مجتمع تبدیل شد. مقاله مور همچنین نشان می‌دهد که او به پیامدهای اقتصادی یک‌پارچه‌سازی نیز توجه ویژه‌ای داشته است. او شمار اجزای هر تراشه را نه با توجه به بیشینه یا میانگین آن‌ها، بلکه با توجه به کم‌ترین هزینه هر جزء تعریف کرد. او دریافت شمار اجزایی که روی یک تراشه کنار هم چیده می‌شوند و شمار اجزایی که چینش آن‌ها از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است، الزاماً یکسان نیستند. بلکه برای هر نسل از فناوری تولید تراشه معیار متفاوتی وجود دارد. هرچه قطعه‌های بیشتری را در تراشه جای دهید، هزینه قطعه را کاهش خواهید داد. پس از گذر از یک نقطه مشخص، تلاش برای کنار هم چیدن ترانزیستورهای بیشتر در فضای موجود می‌تواند ایرادهای جدی به‌دنبال داشته باشد و بازده تراشه‌های کارآمد را کاهش دهد. در آن‌جا است که روند افزایش هزینه هر جزء آغاز خواهد شد. هدف از طراحی مدار مجتمع و تولید آن دستیابی به تعادل بهینه سود و هزینه بود و اکنون نیز چنین است. هرچه فناوری تولید تراشه ارتقا یافته است، توجه به تناسب سود و هزینه نیز بیش از پیش به

افزایش شمار اجزای تراشه و کاهش هزینه هر جزء متمایل شده است. در 50 سال گذشته، هزینه هر ترانزیستور از 30 دلار (برحسب ارزش کنونی) به حدود یک نانودلار (یک میلیارد دلار) کاهش یافته است. با این که مور به سختی می‌توانست چنین کاهش قیمت شدیدی را پیش‌بینی کند، اما در سال 1965 پی برد که مدارهای مجتمع از قطعه‌های مجزای گران و البته کارآمد به قطعه‌ای ارزان و باز هم کارآمد تبدیل خواهند شد و با یک‌پارچه شدن روی تراشه هم کارایی و هم صرفه اقتصادی را با هم به ارمغان خواهد آورد. ده سال پس از آن مور در پیش‌بینی خود بازنگری کرد و آن را اندکی تغییر داد. او در یکی از تحلیل‌های خود در سال 1975 ضمن شرکت در نشست IEEE International Electron Devices Meeting سخن خود را با طرح این پرسش آغاز کرد: «دو برابر شدن اجزای تراشه عملاً چگونه اتفاق می‌افتد؟» او گفت سه چیز در این روند نقش دارد؛ کاهش اندازه اجزای تراشه، افزایش مساحت تراشه و تردستی در قطعه. مورد اخیر یعنی مهندسان تا کجا می‌توانند فاصله بی‌استفاده ترانزیستورها از هم را کاهش دهند. به نظر مور نیمی از روند دو برابر شدن شمار اجزای هر تراشه به دو مورد نخست بستگی دارد و نیم دیگر به تردستی در قطعه. اما درباره حافظه‌های CCD که اینتل خود را برای عرضه آن‌ها آماده می‌کرد، نظرش این بود که نقش «تردستی در قطعه» به‌زودی کاهش خواهد یافت. در آرایه‌های CCD، قطعه‌ها به‌صورت شبکه‌های به هم فشرده کنار هم چیده می‌شوند و هیچ فضایی هدر نمی‌رود. از این رو، او پیش‌بینی کرد به‌زودی زمانی فرا می‌رسد که دو برابر شدن اجزای تراشه فقط به ساخته شدن ترانزیستورهای ریزتر و تراشه‌های بزرگ‌تر بستگی خواهد داشت. در نتیجه، روند دو برابر شدن اجزای تراشه 50 درصد کندتر خواهد شد و هر دو سال یک بار اتفاق خواهد افتاد، نه هر سال.

شگفت‌انگیز این که حافظه CCD نشان داد مستعد ایرادهای زیادی است و از این رو اینتل هرگز یک قطعه از آن‌ها را نیز به بازار عرضه نکرد. اما پیش‌بینی مور درباره تراشه‌های منطقی، از جمله ریزپردازنده‌ها که از اوایل دهه 1970 تاکنون شمار اجزای آن‌ها هر دو سال یک بار تقریباً دو برابر شده است، همچنان معتبر ماند. تراشه حافظه‌ها با آرایه‌های انبوهی از ترانزیستورهای یکسان سریع‌تر تغییر مقیاس دادند و تقریباً هر 18 ماه یک بار دو برابر شدند. علت آن طراحی ساده‌تر آن‌ها است.

از سه مورد فوق که فناوری را به پیش می‌بردند و مور آن‌ها را (در دگرگون کردن صنعت تراشه‌سازی) مؤثر می‌دانست، یکی از آن‌ها اهمیت ویژه‌ای یافت؛ کاهش ابعاد ترانزیستور. کوچک‌تر شدن ترانزیستورها (دست‌کم برای مدتی) موجب بروز پدیده‌ای شد که در جهان مهندسی به ندرت اتفاق می‌افتد؛ نبود trade-off، به عبارتی بی‌تعادلی دو مورد مطلوب اما ناسازگار. اصول جاری در حیطه کاهش مقیاس که رابرت دنارد از مهندسان آی‌بی‌ام آن را مطرح کرد می‌گوید که هر نسل جدید از ترانزیستورها بهتر از نسل پیشین است. ترانزیستور کوچک‌تر هم ریزقطعه‌های بیش‌تری را روی خود جای می‌دهد و هم سریع‌تر و کم‌مصرف‌تر است. بخش عمده‌ای از اعتبار کنونی قانون مور مرهون همین مورد اخیر است و تاکنون به دو صورت مختلف نمود یافته است. در روزهای نخست (دورانی که آن را قانون مور¹ می‌خوانم) پیشرفت‌های موجود ناشی از افزایش اندازه ترانزیستور و شمار ریزقطعه‌های تراشه بود. در آغاز، هدف این بود که اجزای مجزا و مستقل از هم با هم ترکیب و به‌صورت یک قطعه فشرده و یک‌پارچه و ارزان ارائه شوند. در نتیجه، تراشه‌ها بزرگ‌تر و پیچیده‌تر شدند. ریزپردازنده که در اوایل دهه 1970 پدید آمد، به الگوی این دوران بدل شد.



در چند دهه گذشته، پیشرفت صنعت نیمه‌رسانا از نسخه دوم قانون مور، یعنی قانون مور 2 ناشی شده است. تقریباً برخلاف دوره نخست، آنچه در این دوران روی داد، به کاهش اندازه و هزینه ترانزیستور انجامید، حتی وقتی شمار ترانزیستورهای تراشه ثابت می‌ماند.

با این‌که دوران قانون مور 1 و 2 هم‌پوشانی داشتند، سیطره دوران کاهش اندازه بر افزایش اندازه (تراشه) را می‌توان به همان گونه‌ای که صنعت نیمه‌رسانا نشان می‌دهد، مشاهده کرد. در دهه 1980 و اوایل دهه 1990، نسل‌های فناوری (Nodes) که بازگوکننده پیشرفت این صنعت به‌شمار می‌آیند، به اسم حافظه‌های RAM داینامیک هم‌عصر خود خوانده شدند: برای مثال، نسل 5 مگابایتی حافظه DRAM در سال 1989 و نسل 16 مگابایتی در سال 1992. هرچه بر شمار ترانزیستورها افزوده می‌شد و قیمت‌شان ثابت می‌ماند، هر نسل ظرفیت بیشتری می‌یافت. در اوایل دهه 1990، انتخاب اسم برای هر نسل از تراشه‌ها زمانی آغاز شد که برای کاهش اندازه ترانزیستورها از تمهیدات ویژه‌ای بهره بردند. این رویه طبیعی بود. در بیش‌تر تراشه‌ها نیاز نبود حداکثر تعداد ترانزیستورهای ممکن پیاده شود. مدارهای مجتمع در حال همه‌گیر شدن بودند و به درون خودروها و اسباب‌بازی‌ها قدم می‌نهادند. هرچه این روند تداوم می‌یافت، اندازه ترانزیستور (و در پی آن کارایی و کاهش هزینه آن) به معیار معنادارتری برای سنجش بدل می‌شد.

سرانجام، هم‌گام با پیشرفت فناوری تولید تراشه، حتی روند افزایش اندازه ریزپردازنده‌ها نیز متوقف شد. صنعت تراشه‌سازی اینک به ما اجازه می‌دهد تا بیش از 10 میلیارد تراشه را به‌گونه‌ای مقرون به‌صرفه روی یک تراشه منطقی بچینیم. اما فقط اندکی از تراشه‌های کنونی این تعداد ترانزیستور دارند، علت عمده‌اش این است که طرح تراشه‌های ما عموماً نتوانسته‌اند با این تعداد ترانزیستور هماهنگ شوند. قانون مور 1 هنوز در پردازنده‌های گرافیک (جی‌پی‌یو)، مدارهای مجتمع دیجیتال برنامه‌پذیر و شاید معدودی از ریزپردازنده‌های ویژه ابرکامپیوترها اعتبار خود را پاس داشته است، اما حیطه‌های دیگر در سیطره قانون مور 2 است. اینک این قانون باز هم در حال دگرگونی است. این دگرگونی ناشی از آن است که مزیت‌های کوچک‌سازی رفته‌رفته به بن‌بست می‌رسد. این روند در اوایل دهه 2000 و با نمایان شدن واقعیتهای تلخ آغاز شد. در آن زمان، اندازه ترانزیستور روند کاهشی خود را تا رسیدن به کم‌تر از 100 نانومتر آغاز کرد و قانون ساده مقیاس‌پذیری ندارد به محدودیت‌های خود نزدیک شد. ترانزیستورها آن‌قدر کوچک شدند که حتی وقتی قطعه‌ها باید خاموش می‌شدند، الکترون‌ها به‌سادگی می‌توانستند از آن‌ها عبور کنند و این کار باعث نشت برق و کاهش اطمینان‌پذیری قطعه می‌شد. با این‌که مواد و فناوری‌های جدید در صنعت تولید تراشه به حل این مشکل کمک کردند، اما مهندسان باید روند کاهش چشم‌گیر ولتاژ مورد نیاز هر ترانزیستور را متوقف می‌کردند تا شدت جریان الکتریکی را ثابت نگه دارند.

به علت فروپاشی قانون تغییر مقیاس ندارد، کوچک‌سازی ترانزیستورها به ناسازگاری‌های زیادی انجامیده است. کوچک‌سازی ترانزیستور دیگر به افزایش سرعت و کارایی آن کمک نمی‌کند. در واقع، کوچک‌سازی ترانزیستورهای امروزی و ثابت نگه داشتن سرعت و مصرف آن‌ها نیز بسیار سخت است، چه رسد به این‌که بخواهیم سرعت آن‌ها افزایش و کارکرد برق‌شان کاهش بیابد. نتیجه آن‌که در دهه گذشته قانون مور بیش‌تر در حیطه هزینه اهمیت داشته است تا کارایی. ما ترانزیستورهای کوچک‌تری می‌سازیم تا قیمت‌شان کاهش یابد. البته معنی‌اش این نیست که ریزپردازنده‌های 5 یا 10 سال پیش از ریزپردازنده‌های کنونی بهتر هستند. در بعضی حیطه‌ها طراحی ارتقا یافته است، اما بخش عمده دستاوردهای مربوط به کارایی نتیجه یک‌پارچه‌سازی چند هسته است که خود از ارزان‌تر شدن ترانزیستورها ناشی می‌شود.

یکی از ویژگی‌های مهم و پیش‌رو قانون مور باعث شده است تا موارد اقتصادی همچنان اهمیت داشته باشند. هرچه ترانزیستورها کوچک‌تر می‌شوند، ما نیز می‌توانیم هزینه تولید هر سانتی‌متر مربع از سیلیکون نهایی را هر سال تقریباً ثابت نگه داریم (دست‌کم تاکنون که چنین بوده است). مور هزینه آن را در هر جریب، حدود یک میلیارد دلار برآورد کرده است. البته تراشه‌سازان به ندرت از واحد سنجش جریب استفاده می‌کنند. ثابت نگه داشتن قیمت سیلیکون نهایی به مدت چند دهه کار ساده‌ای نبوده است. تلاش‌های مداومی صورت گرفت تا این دستاورد حاصل شود. این تلاش‌ها در دهه 1970 با نسبت سود به هزینه تقریباً 20 درصدی آغاز شد و اینک 80 تا 90 درصد است. ویفرهای سیلیکونی - صفحه‌های گرد سیلیکون - که سرانجام در اندازه تراشه‌ها برش می‌خورند نیز بزرگ‌تر و بزرگ‌تر شدند. این شتاب فزاینده در گستره‌افزایی تراشه‌ها هزینه شماری از مراحل تولید مانند صدور گواهی و برش را که به یک‌باره روی کل یک ویفر اعمال می‌شود، کاهش داد. ظرفیت تولید تجهیزات کارخانه‌ها افزایش یافته است. هزینه ابزارهای مورد استفاده در لیتوگرافی (فناوری چاپ که برای پیاده‌سازی ترانزیستورها و اتصال‌های آن‌ها به‌کار می‌رود) 35 سال پیش صد برابر میزان کنونی بود. اما این ابزارها ویفرها را صد بار سریع‌تر نقش‌زنی و به‌علت دقت بسیار بیش‌تر هزینه زیاد خود را جبران می‌کنند.

تراشه‌سازان با توجه به همین سه مؤلفه - بهبود نسبت سود به هزینه، ساخت ویفرهای بزرگ‌تر و افزایش ظرفیت تولید تجهیزات کارخانه - توانسته‌اند در چند دهه گذشته تراشه‌ها را هرچه پرچگال‌تر بسازند. همچنین، هزینه تولید تراشه به‌ازای مساحت را تقریباً ثابت نگه دارند و هزینه هر ترانزیستور را کاهش دهند. اکنون به‌نظر می‌رسد این روند به پایان خود نزدیک می‌شود و علت عمده این است که هزینه لیتوگرافی (چاپ) افزایش یافته است. در طی دهه گذشته، سختی‌های چاپ اجزای تراشه باعث شد هزینه تولید به‌ازای مساحت سیلیکون هر سال تقریباً 10 درصد افزایش یابد. از آن‌جا که مساحت به‌ازای ترانزیستور سال به سال حدود 25 درصد کاهش یافته است، هزینه هر ترانزیستور نیز رو به کاهش نهاده است.

هزینه‌های تولید سریع‌تر از کاهش قیمت مساحت ترانزیستور افزایش می‌یابد و نسل آتی ترانزیستورها گران‌تر از نسل پیش از خود خواهد بود. اگر هزینه‌های لیتوگرافی به‌سرعت افزایش یابد، اعتبار قانون مور همان‌گونه که می‌دانیم به‌سرعت پایان خواهد یافت و نشانه‌هایی وجود دارد که این پایان به‌زودی فراخواهد رسید. تراشه‌های پیش‌رفته کنونی با لیتوگرافی فشرده ساخته می‌شوند که در آن برای پیاده‌سازی الگوها روی ویفر از پرتو فرابنفش 193 نانومتری استفاده می‌شود. گفته می‌شود در لیتوگرافی نسل آتی تراشه‌ها از پرتو شدیدتر فرابنفش با طول موج کوتاه‌تر استفاده خواهد شد. قرار بود این فناوری در سال 2004 به‌کار گرفته شود، اما بارها به‌تعلیق افتاد و در نتیجه تراشه‌سازان برای پر کردن این وقفه‌های زمانی از نقش‌زنی دو برابری (Double patterning) بهره بردند که ضمن آن برخی از مراحل دو بار تکرار می‌شود تا بر مرغوبیت کالا افزوده شود. نقش‌زنی دو برابری، دو برابر زمان بیش‌تر می‌برد. با این همه، تراشه‌سازان در اندیشه سه و چهار برابر کردن نقش‌زنی هستند که باز هم از هزینه‌ها خواهد کاست. تا چند سال دیگر شاید با نگاه به سال 2015، این سال دوره ایجاد دگرگونی و توقف کاهش هزینه‌ها و افزایش دوباره آن‌ها باشد. من به اظهارنظرهای صریح درباره فرارسیدن پایان قانون مور در کنفرانس‌های لیتوگرافی معروف هستم. اما واقعیت این است که فکر نمی‌کنم قانون مور به‌پایان برسد، بلکه گفته‌ام که باز رو به دگرگونی می‌رود. هرچه پیش می‌رویم، نوآوری‌ها در نیمه‌رساناها تداوم خواهد یافت، اما هزینه ترانزیستورها به‌صورت سامان‌مند کاهش نخواهد یافت، بلکه پیش‌رفت در این حیطه با گونه‌های جدیدی از یک‌پارچه‌سازی تعریف خواهد شد؛ گرد آوردن توانمندی‌های مجزا روی یک تراشه برای کاهش هزینه سیستم که ممکن است بسیار شبیه دوران قانون مور 1 باشد. البته درباره یک‌پارچه‌سازی قطعه‌های مجزای منطقی سخن نمی‌گوییم، بلکه درباره یک‌پارچه‌سازی توابع غیرمنطقی حرف می‌زنیم که از نظر تاریخی از تراشه‌های سیلیکونی مجزا مانده بودند.

این مقاله به بررسی آخرین دستاوردهای فناوری ساخت نیمه رسانا با استفاده از سیم‌کشی گسترده عمودی موسوم به گذرگاه‌های درون سیلیکونی مستقیماً روی سیگنال‌پرداز دیجیتال پیاده می‌شود. در آینده، مثال‌های دیگری را نیز می‌توان برشمرد. طراحان تراشه کنکاش درباره چگونگی یک‌پارچه‌سازی ریزسامانه‌های الکترومکانیک را آغاز کرده‌اند تا بتوان برای ساخت شتاب‌سنج‌ها، ژيروسکوپ‌ها و... از آن بهره برد. همچنین، ریزحس‌گرهای سیال که برای برآوردهای بیولوژیک و آزمایش‌های زیست‌محیطی به کار می‌روند. همه این فناوری‌ها اجازه می‌دهند تا یک تراشه دیجیتال CMOS مستقیماً به بیرون و گستره آنالوگ متصل شود. اگر حس‌گرها و اکتواتورهای جدید بتوانند از مزیت هزینه کم و رویکردهای تولید انبوه در صنعت تولید سیلیکون بهره ببرند، این مورد می‌تواند نتایج اقتصادی زیادی در پی داشته باشد.

این دوران جدید از قانون مور - که آن را قانون مور 3 می‌خوانم و دیگر دوره‌ها در صنعت نیمه‌رسانا موسوم به «فرامور» - شاید توجیه اقتصادی نداشته باشند. یک‌پارچه‌سازی اجزای غیرمعمول روی یک تراشه موقعیت‌ها و ظرفیت‌های بسیار جالبی را برای محصولات جدید فراهم می‌کند، اما نقشه و دورنمای قانون‌مند و پیش‌بینی‌پذیری ندارد که موفقیت‌های مداوم آن را تضمین کند. آنچه در پیش است، بسیار ناواضح‌تر است.

افزودن یک توانمندی جدید به یک تراشه می‌تواند یک شرکت را ثروتمند کند، اما هیچ تضمینی وجود ندارد که افزودن یک توانمندی دیگر در آینده نیز همین دستاورد را به‌دنبال داشته باشد. این روند سختی‌ها و برای شرکت‌های نیمه‌رسانا برنده‌ها و بازنده‌های خود را خواهد داشت. هنوز فکر می‌کنم قانون مور 3 می‌تواند نمود جذاب‌تری از این قانون باشد. وقتی انتظارات برای پیش‌رفت سنجش‌پذیر به واقعیت بدل شود، می‌توانیم انبوهی از کاربردهای نوآورانه را برای آن تصور کنیم. از جمله اسمارت‌فون‌هایی که می‌توانند هوا را بو بکشند یا آب را آزمایش کنند، حس‌گرهای کوچکی که می‌توانند خود را از انرژی‌های موجود در محیط شارژ کنند و دیگر کاربردهایی که می‌توان تصور کرد. قانون مور همان گونه که می‌دانیم شاید به پایان برسد، اما تأثیر آن تا مدت‌ها ما را به پیش خواهد برد.

منبع:
اسپکتروم
تاریخ انتشار:
17 خرداد 1394

نشانی منبع: <https://www.shabakeh-mag.com/cover-story/779>