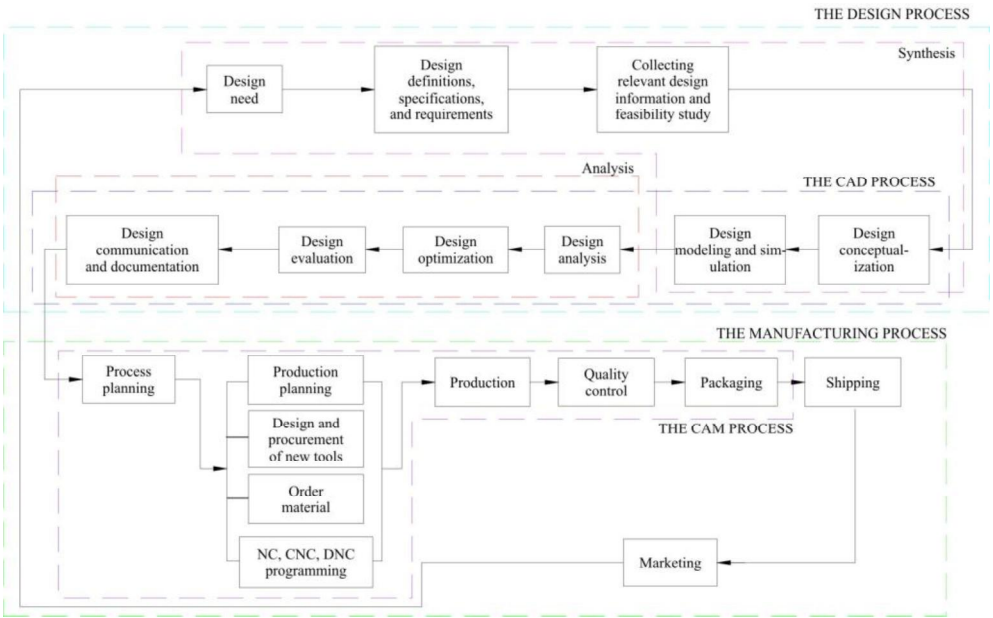
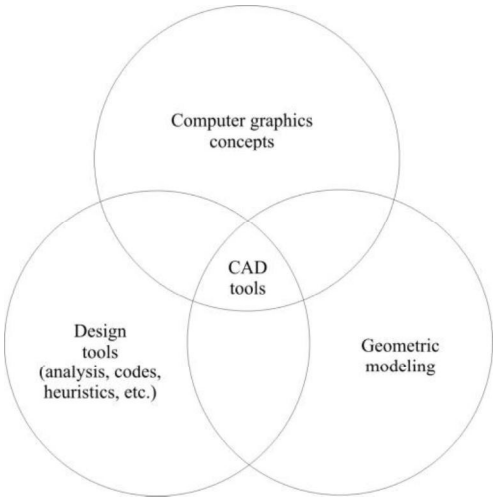
فصل اول

مقدمه

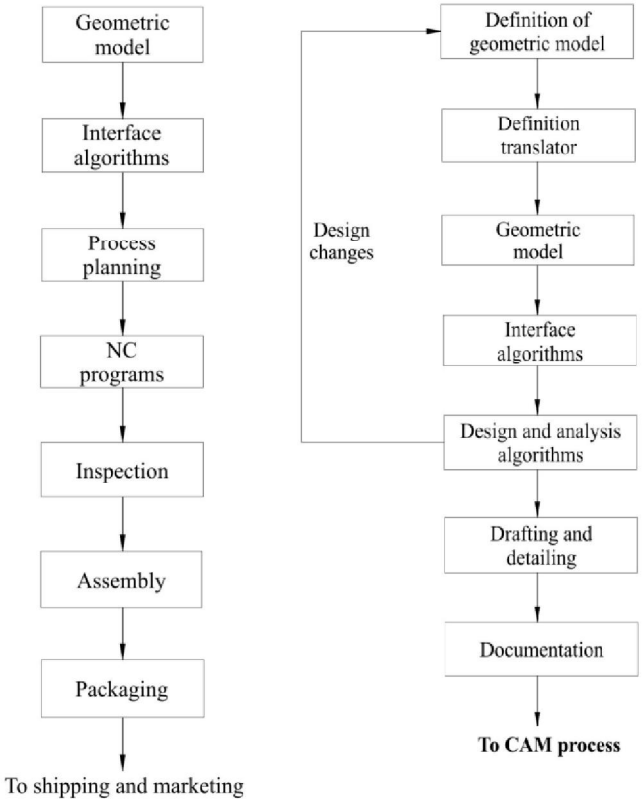
۱-۱ کلیات



شکل ۱-۱ سیکل طراحی و ساخت محصول.



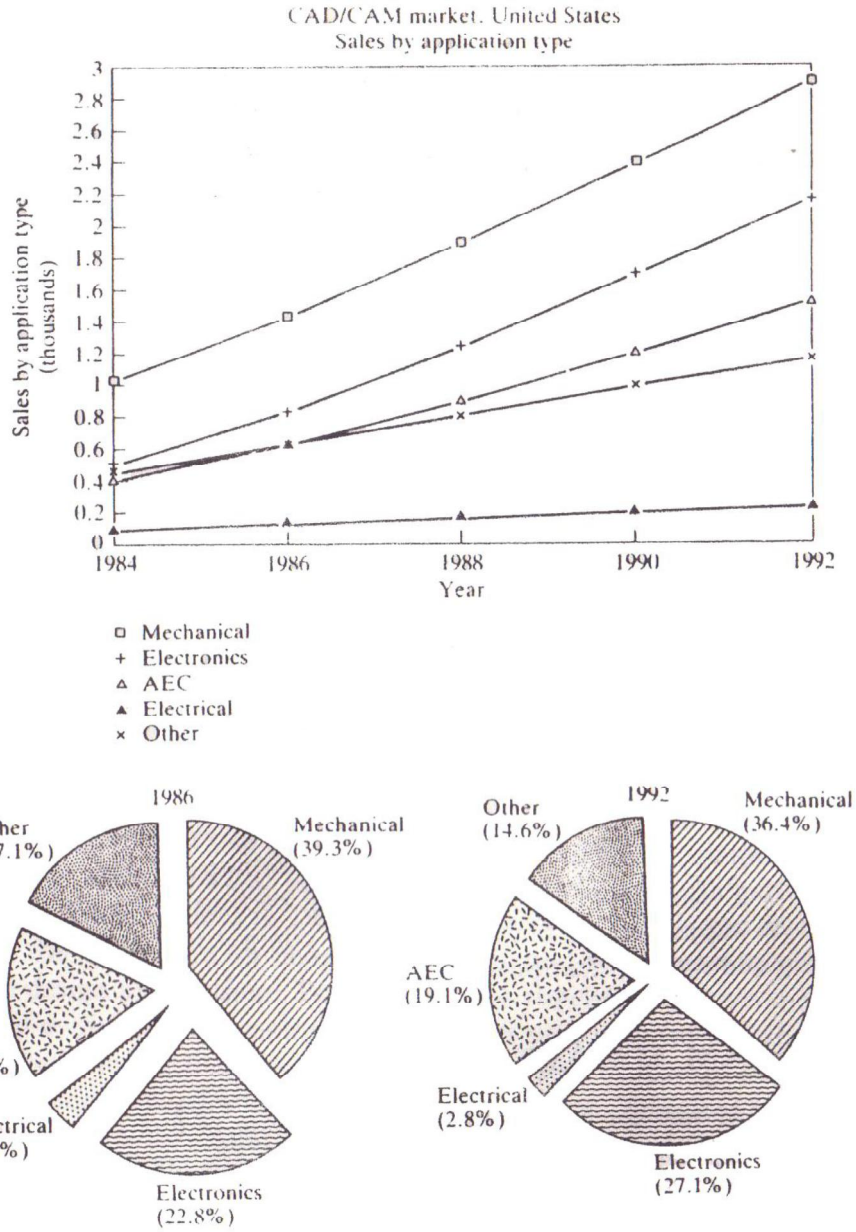
شکل ۱-۲ شماتیک ابزارهای طراحی به کمک رایانه.



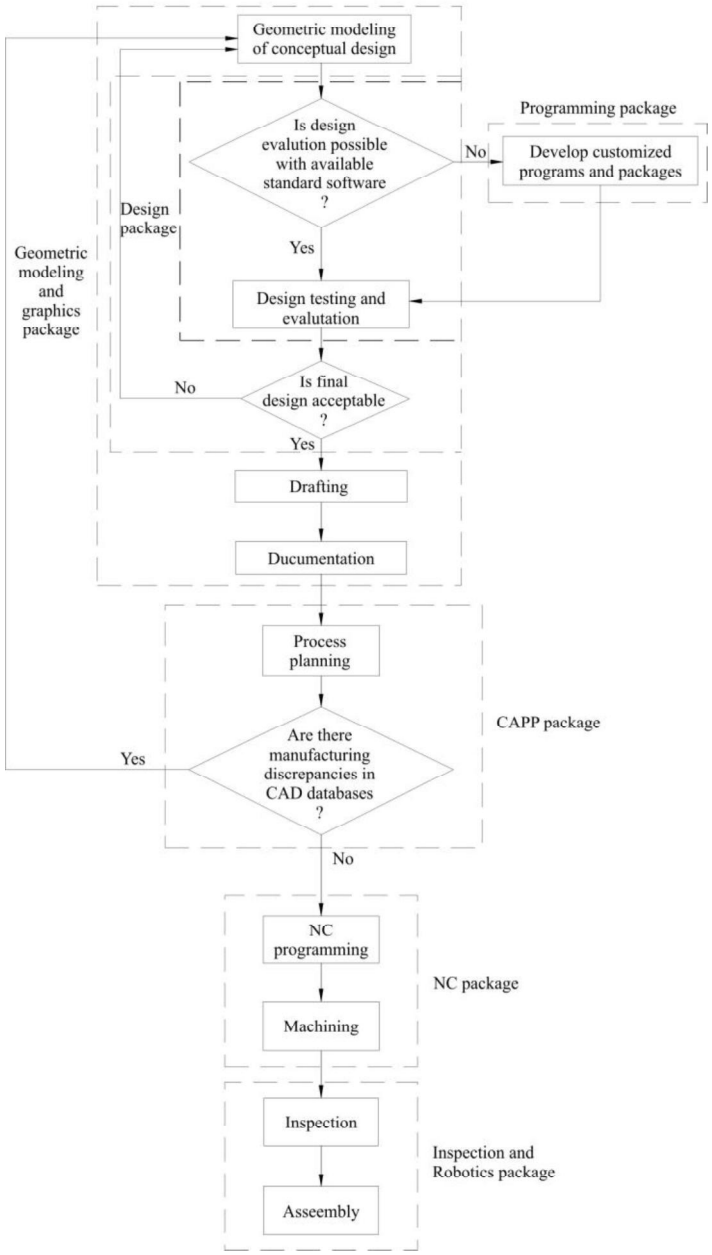
شکل ۱-۳ نمودار جریان طراحی به کمک رایانه و نمودار جریان ساخت به کمک رایانه.

جدول ۱-۱ ابزارهای مورد نیاز برای *CAD*.

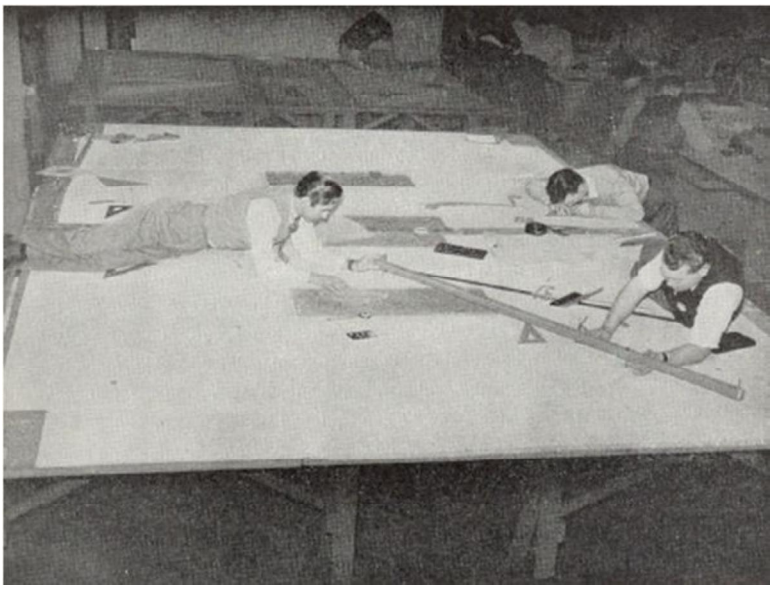
Design phase	Required CAD tool(s)
Design conceptualization	Geometric modeling techniques; graphics aids, manipulation, and visualization
Design modeling and simulation	Same as above; animation; assemblies; special modeling packages
Design analysis	Analysis packages; customized programs and packages
Design optimization	Customized applications; structural optimization
Design evaluation	Dimensioning; tolerances; bill of material; NC
Design communication and documentation	Drafting and detailing; shaded images



شکل ۱-۴ نمونه‌ای از نمودارهای رشد بازار نرم افزارهای *CAD/CAM*.



شکل ۱–۵ نمونه‌ای از نمودار جریان طراحی و ساخت به کمک رایانه.



شکل۱-۶ نقشه‌کش‌ها مشغول کار روی نقشهٔ هواپیما.

۱-۲ عوامل زمینه‌ساز ظهور *CAD*

تا حدود دههٔ ۱۹۶۰، برای طراحی قطعات ورق‌کاری از جمله ورق‌های بدنهٔ خودرو از شابلن برای ایجاد منحنی‌ها و سطوح انحنادار استفاده می‌شد؛ اما در عمل استاندارد نهایی، «مدل اصلی[1]» ساخته شده توسط مدل‌سازها بود چرا که شکل آن بدلایل مختلف، بر منحنی‌های نقشه منطبق نبود. این امر باعث بروز جر و بحث‌ها، چانه‌زنی‌ها، دستکاری‌ها، هزینه‌های اضافی و تأخیر می‌شد.

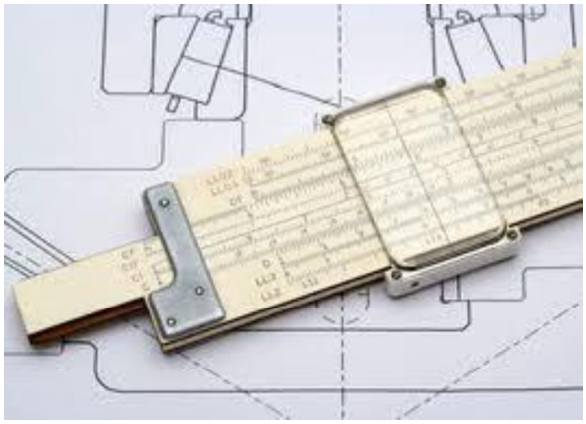
مشکل دیگر در صنایع هوا-فضا، نیاز به نقشه‌های دقیق با مقیاس ۱:۱ برای قطعات بزرگ هواپیما بود (شکل۱-۶) زیرا امکان تبدیل نقشه‌های کوچک‌تر به شابلن‌های مورد نیاز برای تولید این قطعات نبود.

بعد از جنگ جهانی دوم، عرضه‌کنندگان تجهیزات نقشه‌کشی، لوازمی را برای افزایش بهره‌وری در نقشه-کشی ارائه کردند. از جملهٔ این لوازم نوعی برچسب بود که بجای ترسیم همهٔ جزئیات از این برچسب‌ها استفاده‌می‌شد(شکل۱-۷). این نوآوری همراه با نسل جدیدی از دستگاه‌های تکثیر، زمان لازم برای تهیهٔ نقشه‌ها را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش‌می‌داد.

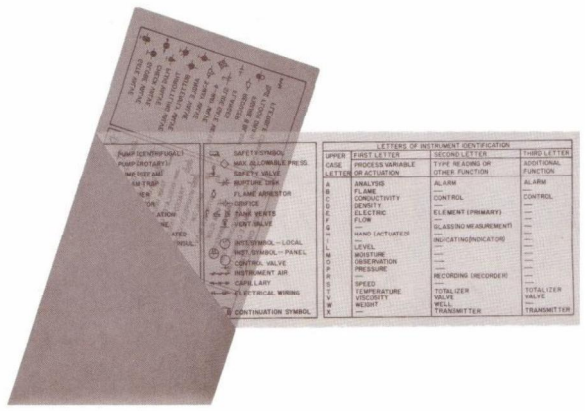
علاوه بر مشکلات تولید نقشه‌های فنی، خود فرآیند طراحی نیز پیچیده‌تر شد. محاسبات بطور معمول با خط‌کش‌های خاص[2](شکل۱-۸)، ماشین حساب‌های رومیزی الکترومکانیکی و کتابچه‌های حاوی جداول ریاضی و مهندسی انجام می‌شد.

---

[1] *Master model*
[2] *Slide rule*



شکل۱-۷ برچسب مخصوص مصارف نقشه‌کشی.



شکل۱-۸ خط‌کش محاسباتی ***(Slide Rule)***.

متأسفانه در بعضی از این مراجع خطاهای جزئی وجود داشت. از طرف دیگر، فرآیند طراحی مهندسی از جمله نقشه‌کشی، مستعد خطاهای متعددی بود. در نتیجه هر محاسبه و نقشه‌ای باید چند بار کنترل می‌شد. براساس آمار موجود تا سال۱۹۹۱میلادی، سی و پنج بیلیون نقشهٔ مهندسی در ایالات متحده آمریکا و کانادا وجود داشته و هر سال حدوداً بیست و شش میلیون نقشهٔ جدید به این تعداد اضافه می‌گردیده است. هزینهٔ سالانهٔ نگهداری، تکثیر، دسترسی و رسم این نقشه‌ها از یک بیلیون دلار وقت تجاوز می‌کرده است. یک نیروگاه هسته‌ای در حدود پنجاه هزار نقشهٔ سایز D و E دارد که مقرارت ایمنی و بهره‌برداری و تعمیر–نگهداری و غیره ایجاب می‌کنند که تکنسین‌ها دسترسی سریع به نقشه‌ها داشته باشند و حدودا سی درصد نقشه‌ها زنده و در گردش باشند.

به این ترتیب لزوم هماهنگی دقیق‌تر بین طراحی و ساخت، افزایش پیچیدگی محصولات و فرآیند طراحی، حجم بالای اسناد فنی در کنار قابلیت‌های بالای بالقوه و بالفعل رایانه‌های تازه ابداع شده از جمله عوامل ظهور *CAD* بودند.

۱-۳ رایانه شروع به تغییر تمرین مهندسی کرد

توسعهٔ رایانه‌های اولیه در اواسط دهه۴۰ بیشتر توسط سازمان‌های نظامی صورت می‌گرفت. یک دهه بعد، *IBM* و چند شرکت دیگر شروع به عرضهٔ رایانه‌هایی به سازمان‌های مهندسی بزرگ بخصوص صنایع دفاع و خودروسازها کردند. به تدریج، برنامه‌هایی برای حل مسایل مهندسی تدوین شدند.

روال معمول برای حل یک مسالهٔ فنی این بود که مهندس فرمی را با داده‌های قابل اجرا پُر می‌کرد. سپس این فرم به یک اپراتور منگنه‌زن داده می‌شد که یک دسته کارت پانچی و شاید لیستی از داده‌ها را تولید کند. مهندس باید لیست عددی را بررسی می‌کرد که خطا نداشته باشد و در صورت نیاز اصلاح نماید. پس از اطمینان از صحت کارت‌ها، آنها را به مسئول کار با رایانه می‌داد که کار مربوطه را با رایانه انجام دهد. این رایانه‌ها یک کار را بعد از دیگری انجام می‌دادند. سپس نتایج حاصل از اجرای رایانه‌ای به صورت یک لیست عددی به مهندس عودت داده می‌شد. این بدان معنی‌بود که فردی باید نتایج را رسم کند تا بطور چشمی قابل فهم باشند. این مراحل می‌توانست از یک روز تا چندین هفته زمان ببرد.

در اواسط دههٔ پنجاه رایانه‌های ارزان‌تری به بازار عرضه شدند. ماشین‌هایی مانند*Librascope LGP-30*[۳] علی‌رغم کندتر بودن نسبت به ماشین حساب‌های امروزی، باز هم از محاسبات دستی مؤثرتر بودند. خروجی، غالباً بصورت لیست‌های عددی بود؛ گرچه رسام‌های دیجیتالی محصول شرکت کال‌کامپ[۴] در حدود ۱۹۶۰ به بازار عرضه شدند.

IBM مدل بسیار محبوب۱۶۲۰را در سال۱۹۶۰ معرفی کرد. این دستگاه برای حدود ۳۰۰۰ دلار در هر ماه اجاره داده می‌شد(اکثر رایانه‌های*IBM* در آن زمان به جای فروش، اجاره داده می‌شدند) و کارایی کمتر از ۰/۰۱*MIPS* (میلیون دستور در ثانیه) داشت. درحالیکه این سرعت بسیار پائین با استانداردهای امروزی، برای حل بسیاری از مسائل مهندسی خیلی بیشتر از کافی بود. رایانه‌های مِین‌فریم[۵] مثل*IBM360* مدل۶۰، چهل هزار دلار در ماه اجاره داده می‌شدند و کارایی آن حدود ۰/۳۶*MIPS* بود. این رایانه‌ها محاسبات با نقطه شناور از نوع دقت مضاعف را پشتیبانی می‌کردند و در نتیجه برای کارهای آنالیز مهندسی پیچیده مورد استفاده قرار می‌گرفتند. کم‌کم مهندسین و نقشه‌کش‌های شرکت‌های تولیدی بزرگ بویژه خودروسازها و صنایع دفاع برای افزایش بهره‌وری به سامانه‌های گرافیک رایانه‌ای احساس نیاز کردند.

اولین سامانهٔ گرافیکی تعاملی به نام *Sketchpad* توسط ایوان ساترلند[۶]در۱۹۶۳ ابداع شد. رسالهٔ دکتری او بخشی از پروژهٔ *CAD* در *MIT* بود. بخاطر گرانی خیلی زیاد رایانه‌های اولیه و نیازهای منحصربفرد شرکت‌های بزرگ هواپیماسازی و خودروسازها، این شرکت‌ها اولین مشتریان نرم‌افزارهای *CAD* بودند. نسل اول سامانه‌های*CAD* در دهه شصت نوعاً نرم‌افزارهایی برای نقشه‌کشی دوبعدی بودند که توسط بخش*IT* خود این شرکت‌ها با کمک دانشگاه‌ها تدوین شده بودند. نرم‌افزار*DAC* (اواسط دههٔ۶۰) در جنرال

---

[3] *Librascope General Purpose*
[4] *Calcomp*
[5] *Mainframe computers*
[6] *I. Sutherland*

موتورز، *CADD* (۱۹۶۶) در مک دونل داگلاس[۷]، *PDGS*(۱۹۶۷) در فورد، *CADAM*(۱۹۶۷) در لوک هید[۸]، *EVE* در داسُلت سیستمز[۹] و *UNISURF* در رنو از جمله این نرم‌افزارها بودند. در دهۀ هفتاد این رویه همچنان ادامه داشت. به عنوان مثال نرم‌افزار *SYRCO* در مرسدس بنز، *CAD-I*(۱۹۷۷) در نیسان، *TINCA*(۱۹۷۳) و *CADETT*(۱۹۷۹) در تویوتا، *CADANC* در جنرال موتورز و *NCAD* در نورس رُپ[۱۰] از این نوع نرم‌افزارها بودند. البته در دهۀ ۱۹۶۰ شرکت کنترل دیتا[۱۱] اولین سامانۀ *CAD* تجاری با نام «ماشین نقشه‌کشی الکترونیکی» را به بازار معرفی کرد. نرم‌افزار این سامانه روی یک رایانۀ مین فریم از نوع *PDP-1* از شرکت دیجیتال[۱۲] اجرا می‌شد و مثل *Sketchpad* ورودی‌ها از طریق قلم نوری وارد می‌شدند. اما قیمت این سامانه پانصدهزار دلار به ازای هر واحد بود و فقط تعداد خیلی کمی به فروش رفت.

مقایسه‌ای بین یک پدیده در صنعت رایانه با آنچه در زنجیرۀ غذایی اتفاق می‌افتد انجام گرفته است. در زنجیره غذایی حیوانات بزرگتر، کوچکترها را می‌خورند درحالیکه در صنعت رایانه سطوح پائین‌تر زنجیره، قابلیت‌های سطوح بالاتر را درخود فرو می‌برند. بعنوان مثال توابعی که ابتدا جزئی از بسته نرم-افزاری را تشکیل می‌دادند بعدها در سیستم عامل[۱۳] گنجانده شدند و توابعی که ابتدا در سیستم عامل انجام می‌شدند، بعداً بخشی از پردازندۀ رایانه شدند. آنچه در طول زمان برای پردازندۀ نقطۀ شناور[۱۴] اتفاق افتاده نمونه‌ای از مثال بالاست. سی تا سی و پنج سال پیش در بسیاری از سامانه‌های مینی‌رایانه، این عملیات را روال‌های نرم‌افزاری تعبیه شده در سیستم عامل به کار می‌گرفتند. نیاز به کارایی بیشتر، تولیدکنندگان رایانه را به ساخت شتاب دهنده‌های سخت‌افزاری مربوطه تشویق کرد. هم‌پردازندۀ ریاضی[۱۵] تراشه‌ای بود که در *PC* این کار را انجام می‌داد. بعدها این توابع به تراشه‌های ریزپردازندۀ اصلی افزوده شدند.

در *CAD* خدمات گرافیکی توابعی برای تعامل با کاربر و نمایش تصاویر مورد نظر هستند. در گذشته هر عرضه کنندۀ سامانۀ *CAD* بخش قابل ملاحظه‌ای از منابع خود را صرف سرمایه‌گذاری روی این توابع می کرد. به مرور زمان استانداردهای صنعت مثل *X-Windows ،MOTIF ،OpenGL* ها در بازار پذیرفته شدند و فروشندگان از این نرم‌افزارها به عنوان بخشی از سیستم عامل استاندارد خود استفاده کردند. به این ترتیب آنها به جای کُد نرم‌افزاری اختصاصی، شروع به استفاده از توابع استاندارد سیستم عامل کردند. با این‌کار به طور نمونه، ۸۰ درصد از حجم نرم‌افزارهای اختصاصی جایگزین شدند.

---

[7] *McDonnel Douglas*
[8] *Lock Heed*
[9] *Dassult systemes*
[10] *Northrop*
[11] *Control Data*
[12] *DigitalEquipment*
[13] *Operating system*
[14] *Floating point*
[15] *Math-coprocessor*

۱-٤ معرفی سامانه‌های تجاری

در سال ۱۹۶۹ صنعت *CAD* با تشکیل شرکت‌های اپلیکُن[۱۶] و کامپیوترویژن[۱۷] ظهور پیدا کرد. طی چند سال شرکت‌های اتوترول[۱۸]، ام. اس. کامپیوتینگ[۱۹] و کالما[۲۰]هم به این جمع پیوستند. سامانه‌های تجاری اولیه، رایانه‌های کوچک مانند *PDP-11*، *Data General Nova1200* و نمایشگرهای *Tektronix* را به کار می‌گرفتند. یک نمونه از این سامانه‌ها شامل یک مینی رایانهٔ ۱۶ بیتی با ۸ یا ۱۶ کیلو بایت حافظه اصلی، یک دیسک سخت ۱۰ یا ۲۰ مگابایتی و یک تا چهار پایانه بود. اکثر این سامانه‌ها دارای میزهای رقومی‌گری[۲۱] بزرگ، صفحه کلیدهایی برای ورود دستور، یک تبلت[۲۲]برای ورود مختصات و یک رسام دیجیتالی بودند.

دکتر پی. هانراتی[۲۳] که از دههٔ پنجاه در تدوین نرم‌افزار *PRONTO* برای برنامه‌نویسی ماشین فرز کنترل عددی فعال بود در ۱۹۷۲ با تاسیس شرکت *MCS*، نرم‌افزاری به نام *ADAM CAD* را عرضه کرد که به زودی توسط شرکت‌های کامپیوتر ویژن، گِربِر[۲۴]و یونایتدکامپیوتینگ[۲۵]به عنوان هستهٔ[۲۶] نرم‌افزار *CAD* خودشان خریداری شد. بعضی‌ها به دکتر هانراتی لقب پدر *CAD/CAM* داده‌اند. در ۱۹۷۵ کمپانی داسُلت سیستمز لیسانس نرم‌افزاری برنامهٔ *CADAM* را از لوک هید خریداری کرد و در سال۱۹۷۷ شروع به گسترش نرم‌افزار سه‌بعدی خود با نام تجاری *CATIA* کرد. نرم‌افزارهای تجاری موجود تا اواخر دههٔ هفتاد عبارت بودند از: *AutoDraft* از شرکت اتوترول، *Calma* از شرکت کالما، *CADDS* از کامپیوتر ویژن، *CADAM*از لوک هید، *IGDS* از ام.اس.کامپیوتینگ و *Unigraphics* از مَک‌اُتو[۲۷](که بعدا حق مالکیت یونایتد کامپیوتینگ را هم خرید).

کارایی، اغلب مسأله مهمی بود و عرضه‌کنندگان اولیه تلاش زیادی می‌کردند که یک رابط گرافیکی مؤثر ایجاد کنند که قادر باشد فرآیند تولید تصاویر را تسریع کند. وقتی‌که یک شی گرافیکی در صفحهٔ نمایش جابجا می‌شد و یا از آن حذف می‌گردید کل تصویر باید مورد بازسازی قرار می‌گرفت. کارآیی مناسب نیازمند نرم‌افزار و سخت‌افزار تخصصی‌تر بود.

شرکت‌های خودروساز مثل رنو و فورد روی تعریف ریاضیاتی سطوح پیچیده متمرکز شدند؛ در حالیکه شرکت‌هایی مثل لوک‌هید به ارتقای بهره‌وری نقشه‌کشی پرداختند. این شرکت‌ها از رایانه‌های مِین‌فِریم بزرگ که عمدتاً ساخت *IBM* بودند استفاده می‌کردند. این رایانه‌ها اکثراً دارای پایانه‌های گرافیکی برداری بودند. یک گام سخت‌افزاری کلیدی، معرفی خط تولید سامانه *IBM360* در ۱۹۶۴ بود که از پایانهٔ گرافیکی

---

[16] *Applicon*
[17] *Computervision*
[18] *Auto-trol Technology*
[19] *M&S Computing*
[20] *Calma*
[21] *Digitizer tablet*
[22] *Tablet*
[23] *P. Hanratty*
[24] *Gereber Scientific*
[25] *United Computing*
[26] *Kernel*
[27] *McAuto*

مدل ۲۲۵۰ استفاده می‌کرد. در سال‌های بعد شرکت‌هایی مثل اسپکتراگرافیکس[۲۸] و اِیج[۲۹] پایانه‌های سازگار با *IBM* ساختند اما کمی گران‌تر بودند. غیر از برنامه‌های *CATIA* و *CADAM* کمتر محصولی در این سال‌ها مستقیماً توفیق تجاری پیدا کرد.

از جمله اتفاقات دیگر اواخر دهۀ هفتاد، عرضۀ زبان‌های برنامه‌نویسی سطح بالاتر مانند *C* بجای فرتـرن و سیستم‌های عامل ساده‌تر مانند یونیکس و نسل جدید رایانه‌های رومیزی گرافیکـی (ماننـد *HP9845* سـری ۱۹۷۸) بود که مهندسان را به برنامه‌نویسی ترغیب می‌کرد.

۱-۵ ساختار اساسی تغییرات صنعت *CAD*

احتمالا دهۀ هشتاد یکی از مهمترین دوره‌ها از نظر رشد صنعت *CAD* بود. در اوایل این دهه، صنعت *CAD* تحت تسلط پنج شرکت اپلیکن، اتوترول، کامپیوترویژن، اینترگراف[۳۰] (ام.اس.کامپیوتینگ سابق) و کالما بود. شرکت‌هایی مانند مک دونل داگلاس، *SDRC* و *IBM* از جمله شرکت‌های نوظهور در این عرصه بودند. این سه شرکت نرم‌افزار *CADAM* را بازاریابی می‌کردند. فقط کامپیوترویژن و *IBM* رایانه‌های خود را تولید می‌کردند. شرکت‌های دیگر، به جز *SDRC*، پایانه‌های گرافیکی نسبتاً گران و دیگر اجزای سامانه را طراحی کرده و می‌ساختند. در اکثر موارد، این فروشندگان عمده[۳۱] شرکت‌های سازنده بودند که به فروش نرم‌افزار می‌پرداختند. سودآوری اولیه این صنعت به وضوح در اطراف حاشیه تولید بود.

سامانه‌های اولیه اغلب اتاق رایانه با تهویۀ مطبوع نیاز داشتند. حتی آموزش پایه‌ای کـاربر در زمـان چنـد هفته صورت می‌گرفت و برای اکثر سامانه‌ها رسیدن به نسبت بهره‌وری ۱:۱ می‌توانست براحتی شش ماه طول بکشد. بخاطر گرانی این سامانه‌ها، بر اساس روش «فروشگاه بسته[۳۲]» عمل می‌شد. روی این سامانه-ها نوعاً افرادی کار می‌کردند که به طور تمام وقت با کنسول‌های گرافیکی مشغول بکار بودند. مهندسان و طراحان کار مربوط به بخش *CAD* را سفارش می‌دادند و پس از چنـد سـاعت یـا روز بعـد بـرای دریافـت خروجی رسم شده برمی‌گشتند. سپس نقشه‌های بازبینی شده به اپراتورهای *CAD* که نقشـه‌هـا را اصـلاح می‌کردند عودت داده می‌شد. بندرت به یک مهندس اجازه داده می‌شد که از یک سامانه برای کـار طراحـی استفاده کند و یا با یک اپراتور بنشیند و آن شخص بطور مستقیم به پیشنهادها پاسخ دهد. ماهیت هزینه‌بر این سامانه‌ها اغلب منجر به دو یا حتی سه شیفت کار می‌شد.

شرکت *HP* در ۱۹۸۰ با نرم‌افزار *PECAD* محصول گـروه نـرم‌افـزاری خـود وارد ایـن بـازار شـد. در ۱۹۸۱ داسلت سیستمز پیرو توافقنامه‌ای با *IBM* به این شرکت امتیاز فـروش *CATIA* را داد. نسـخه اول ایـن نـرم-افزار که با افزودن مدل‌سازی سطحی سه بعدی و توابع ماشـین‌کـاری *NC* بـه *CADAM* تـدوین شـده بـود در ۱۹۸۲ به بازار داده شد. در همین سال شرکت *GE* با خرید حق مالکیـت شـرکت کالمـا کـه در آن زمـان

---

[28] *Spectragraphics*
[29] *Adge*
[30] *Intergraph*
[31] *Turnkey vendors*
[32] *Closed shop*

سالانه صدمیلیون دلار درآمد داشت وارد بازار*CAD* شد. شرکت اینترگراف در۱۹۸۳نرم‌افزارهای مدل‌ساز سطحی سه بعدی خود را به نام‌های *InterAct* و *InterPro* روی پردازنده‌های به‌ترتیب*VAX* و *MicroVAX* ساخت شرکت *DEC* اجرا می‌کرد.

تغییرات عمده‌ای در اوایل دههٔ هشتاد رخ داد. یکی انتقال از مینی رایانهٔ ۱۶ بیتی مانند *Digital PDP-11* و *Data General Nova1200* به ابر مینی رایانهٔ ۳۲ بیتی مانند*Digital VAX II/780* بود. تغییر دیگر در حال وقوع، تغییر از پایانه‌های گرافیکی لولهٔ ذخیره‌سازی *Tektronix* به فن‌آوری رنگی بود و این امر مستلزم تجدید نظر عمدهٔ همهٔ شرکت‌ها در نرم‌افزارشان بود.

در اواخر۱۹۸۲، یک شرکت تحقیقات بازاریابی به نام اینپوت۳۳ تحلیلی از صنعت *CAD* برای شرکت جنرال موتورز آماده کرد. این گزارش براساس مصاحبه‌های متعدد با کاربران و فروشندگان تدوین شد. فقدان مدل‌سازی حجمی۳۴ کارآمد و عدم یکپارچگی کاربردهای طراحی و ساخت بعنوان دو محدودیت اصلی گزارش شد. همچنین ابزارهای مدیریت انبارهٔ داده‌ها برای ترکیب کاربردها جزو الزامات دوفوریتی بودند و کاربران، نرم افزارهای قابل اطمینان‌تری می‌خواستند. این سه موضوع برای پاسخ دهندگان از اهمیت بالاتری نسبت به سهولت استفاده، خدمات و آموزش مناسب برخوردار بودند. در آن موقع گرایش کلیدی در جریان، انتقال به ایستگاه‌های کاری۳۵هوشمند، شبکه‌سازی۳۶و تغییر به گرافیک رنگی بود. گزارش شد در مقایسه با نتایج مطالعات مشابهی که شرکت درست یک سال قبل انجام داده بود نیاز به رنگ از اولویت بالاتری در اواخر سال۱۹۸۲ برخوردار است. این گزارش همچنین یک تغییر عمده در قیمت‌ها شناسایی کرد و آن اینکه رشد قیمت سخت‌افزار کمتر از نرم‌افزار خواهد بود.

۱-۶ ایستگاه‌های کاری جایگزین مینی رایانه‌ها

یکی از مهمترین توسعه‌های سخت‌افزاری در دههٔ ۸۰ معرفی ایستگاه‌های کاری مهندسی بود. اکثر فروشندگان سامانهٔ *CAD* ضمن انتقال هرچه بیشتر توابع دست‌کاری گرافیکی از رایانهٔ میزبان، مشغول به تکمیل قابلیت‌های پایانه‌های گرافیکی خود شده بودند. در مورد ایستگاه کاری مهندسی از این هم فراتر رفتند و تمام اجرای نرم‌افزار کاربردی نیز منتقل شد. در این حالت میزبان مینی رایانه‌ای یا مِین‌فریم تنها در صورت نیاز، برای مدیریت فایل‌ها بکار می‌رفت و به این واسطه بزودی با شکل خاصی از ایستگاه کاری، معروف به «سِرور37» جایگزین شدند. شاخص کلیدی دیگر این وسایل قابلیت شبکه‌سازی آنها بود که امکان اشتراک داده‌ها و حتی برنامه‌های رایانه‌ای را بین آنها فراهم می‌کرد. معماری باز یونیکس، موج جدیدی از ایستگاه‌های کاری کم قیمت، با تعمیر و نگهداری کم و کارایی بالا را در بازار رایانه ایجاد

---

[33] *Input*
[34] *Solid Modeling*
[35] *Workstation*
[36] *Networking*
[37] *Server*

کرد. بـر ایـن اسـاس در سـال ۱۹۸۰ آپولـو کـامپیوتر*38*، در ۱۹۸۱ سـان‌میکروکـامپیوتر*39*و در ۱۹۸۲ سیلیکون گرافیکس*40* این طرح را پی گرفتند.

سامانه‌های *CAD* مبتنی بر ایستگاه‌کاری مزایایی بر نمونه‌های مبتنی بر مینی رایانه‌های قدیمی‌تـر داشـتند. هزینهٔ ورودی[۴۱] و هزینه به ازای هر صندلی[۴۲] خیلی کمتر بود. قیمت به سـرعت بـه حـدود ۷۵۰۰۰ دلار بـه ازای هر صندلی کاهش یافت و در عرض چند سال به زیر ۵۰۰۰۰ دلار رسید. علاوه بر ایـن، کـارایی قابـل پیش‌بینی‌تر بود. وقتی که یک شرکت شش یا هشت پایانهٔ *VAX II/780* داشت و یک کاربر، اقـدام بـه تحلیـل پیچیده‌ای می‌کرد، کارایی سایر پایانه‌ها کم می‌شد. اگر رایانهٔ میزبان از کار می‌افتاد همهٔ پایانه‌ها غیرقابـل استفاده می‌شدند. با ایستگاه‌های کاری مهندسی، کارایی به آنچه که کاربر آن انجام می‌داد بستگی داشـت، نه به کار دیگر کاربران و اگر یک ایستگاه کاری از کار می‌افتاد دیگران هنوز هم قابل استفاده بودند.

سیستم عامل ایستگاه‌های کاری آپولو، *AEGIS*، شبیه یونیکس بود ولـی بـا آن فـرق مـی‌کـرد. همچنـین از شبکه *token-ring* که یک فن‌آوری به اثبات رسیده بود استفاده می‌شد اما اِترنت[۴۳]نبـود کـه بـه سـرعت بـه عنوان یک استاندارد صنعت رایانه درحال رشد بود. میکروسامانه‌های *SUN* که درست کمی بعـد از آپولـو شروع به کار کردند قادر بـه اسـتفاده از یـونیکس و اجـزای اِترنـت بودنـد. *SUN* بـه زودی بـه سـیلیکون گرافیکس یا *SGI* ملحق شد که بیشتر مشتری‌ها آن را می‌شناختند. طولی نکشید که صنعت رایانه احتمالاً با بیش از بیست تولید کننده ایستگاه کاری مهندسی منفجر شد. اغلب به این ایستگاه‌ها لقب *JAWS* (فقـط یـک سامانهٔ ایستگاه‌کاری دیگر[۴۴])می‌دادند، ولی اکثراً نتوانستند ادامه دهند و در مدت کوتاهی از عرصهٔ رقابـت محو شدند. ام.دی.ام.ایی/یونی‌گرافیکس[۴۵]اولین عرضـه کنندهٔ*CAD*ی بود که ظهور سریع ایستگاه‌های کاری یونیکس را درک کرد و سابقهٔ استفاده از معماری سخت‌افـزاری چندگانـه را داشـت. در۱۹۸۷ایـن شـرکت استراتژی «معماری سخت‌افزاری باز» را در پیش گرفت و از رایانه‌های آپولو،*HP* و*Sun* به ایسـتگاه‌کـاری یونیکس با نوع جدید *HP*(۱۹۸۸) منتقل شد. داسُلت سیستمز هم نسـخهٔ سـوم*CATIA* را بـه ایسـتگاه‌کـاری جدید *IBM* به نام *RS6000* منتقل کرد. *IBM RS/6000* محصول قابل اطمینانی بـود؛ امـا *HP* و دیجیتـال بـرای بدست آوردن اندازهٔ لازم در این زمینه تلاش می‌کردند. دیجیتال هرگز سهم قابل ملاحظه‌ای از بازار را به دست نیاورد. *HP* با خرید آپولو در سال۱۹۸۹ این مشکل خود را حل کرد.

رهبران اولیهٔ صنعت تلاش کردند که به سمت سخت‌افزار ایستگاه‌کـاری اسـتاندارد حرکـت کننـد و نقشـی فراتر از تجارت نرم‌افزار و خدمات ایفا کنند. مشکل اصلی این بود که حجم بالایی از سـرمایه‌گـذاری روی امکانات تولیدی و پرسنلی صورت گرفته بود ولی بازار آرام بود. بعضی‌ها ماننـد اتـوترول تـلاش کردنـد

---

38 Apollo computer
39 SunMicrosystems
40 Silicon Graphics
41 Entry cost
42 Cost per seat
43 Ethernet
44 Just Another Workstation System
45 MDM&E/Unigraphics

تمرکز تولید خود را بر روی بسته‌بندی مجدد ایستگاه‌های کاری خود (آپولو) با همان تنظیمات پایانه‌ای قبلی معطوف نمایند.

در همین شرایط گروه جدیدی از فروشندگان سهم قابل توجهی از بازار را به دست آوردند. کلید بین اینها *IBM* بود که ابتدا با شرکت لوکهید و بعداً با شرکت‌های داسُلت سیستمز و مک‌دونل داگلاس(که بعداً شرکت *UGS* شد)، *SDRC* و دو تازه وارد دیگر(اتودسک[۴۶] و *PTC*[۴۷]) تیم جدیدی تشکیل دادند. با افت قیمت سامانه‌های *CAD* نحوهٔ استفاده از آنها نیز شروع به تغییر کرد. درحالیکه خیلی از سازمان‌ها همچنان به کار بخش *CAD* ادامه می‌دادند دیگران شروع به توزیع این سامانه‌ها در سازمان‌های طراحی و ساخت خود کردند. بجای واگذاری کروکی‌ها به اپراتور حرفه‌ای*CAD*، مهندسین طراح آموزش‌دیدند که نقشه‌ها محصول دوم آنها در فرآیند طراحی باشند.

۱-۷ مدل‌سازی حجمی[۴۸] و طراحی پارامتری

اتفاق نرم‌افزاری بزرگی که در اوایل دههٔ هشتاد بوقوع پیوست معرفی تجاری نرم‌افزارهای مدل‌ساز حجمی بود. ازجمله این نرم‌افزارها می‌توان به *Uisolid*(۱۹۸۱) از شرکت یونی‌گرافیکس، *Romulus* (۱۹۸۲) از شرکت شِیپ‌دیتا[۴۹]، *CATIA-2* (۱۹۸۵) از داسُلت سیستمز، *Parasolid*(۱۹۸۸) از شرکت اوانز و ساترلند[۵۰] بودند. برای تبادل داده‌ها بین سامانه‌های *CAD* در ۱۹۸۰ استاندارد *IGES* تدوین شده بود. اما با ظهور و گسترش نرم‌افزارهای مدل‌ساز حجمی و لزوم تبادل مشخصاتی مانند خواص جرمی، صافی سطوح، تلرانس‌های مهندسی و نظایر این استاندارد جدیدی در ۱۹۸۴ به نام *PDES* در اروپا شروع بکار کرد.

شرکت فن‌آوری پارامتری[۵۱]*(PTC)* در اواخر سال ۱۹۸۷ با عرضه بسته نرم‌افزاری مدل‌ساز پارامتری ویژگی- مبنا[۵۲] معروف به *PRO/ENGINEER* صنعت*CAD* را شوکه کرد. این نرم‌افزارتماماً مبتنی بر مدل-های حجمی و ویژگی‌های تاریخچه- مبنا و قیود بود. این نرم‌افزار روی ایستگاه‌های کاری با سیستم عامل یونیکس نصب و اجرا می‌شد. *PTC* در تدوین این نرم‌افزار از*X-Window*های یونیکس استفاده زیادی کرد تا رابط گرافیکی قوی‌ای با منوها، جعبه ابزارها، ایکن‌ها و سایر ویژگی‌های کاربرپسند را فراهم آورد. در حالیکه برنامهٔ سایر عرضه‌کنندگان روی سیستم عامل خودشان و اکثراً به زبان فرترن و اسمبلی بود که کل سیستم را کُند و غیررقابتی می‌کرد. ابتدا عرضه‌کنندگان عمدهٔ هم دورهٔ *PTC* آن را جدی نگرفتند؛ اما هجده ماه بعد که یک رکورد فروش نرم‌افزاری را بدست آورد اکثر این عرضه کنندگان دچار آشفتگی شده بودند. *PRO/ENGINEER* انتظارات کاربران را از کارایی رابط گرافیکی، سهولت استفاده و بخصوص

---

46 Autodesk
47 Parametric Technology
48 Solid modeling
49 ShapeData
50 Evans and Sutherland
51 Parametric Technology Corporation
52 Feature-Based Parametric Design

تسریع مدل‌سازی حجمی بالا برد. عملکرد خوبی که این نرم‌افزار از خود نشان داد باعث شد که بسیاری از شرکت‌ها شروع به نصب آزمایشی آن برای مقایسهٔ این فن‌آوری جدید با سامانه‌های قدیمی موجود در آن زمان بکنند. به جز شرکت‌های داسُلت سیستمز و *SDRC* رقبای دیگر*PTC* که درگیر گذار دشواری از تولید یا بازاریابی سخت‌افزار رایانه‌ای بودند بطور غیرمنتظره‌ای برای حفظ مشتریان خود همزمان با یک تغییر عمدهٔ نرم‌افزاری هم مواجه شدند.

در ژاپن دکتر اچ. چیوکورا در۱۹۸۷ یک هستهٔ مدل‌ساز حجمی به نام *DesignBase* ارائه کرد که به سرعت بسیاری از عرضه کنندگان نرم‌افزارهای *CAD* در ژاپن و آمریکا آن را بکار گرفتند. ام.دی.ام.ایی/یونی-گرافیکس برای رقابت با *PTC* در ۱۹۸۸حق مالکیت شِیپ‌دیتا که *Parasolid* را داشت از اوانز و ساترلند خرید. این شرکت *Unisolids* را که براساس*PADL-2* و مدل‌سازی حجمی بود کنار گذاشت و مدل‌ساز حجمی جدیدی براساس *Parasolid* به نام *UG/Solids* در ۱۹۸۹ معرفی کرد. در عرض پنج یا شش سال، رقبای *PTC* قابلیت پارامتری را به بسته‌های نرم‌افزاری اصلی خود اضافه کردند.

اتوکد تا ۱۹۹۲ یک نرم‌افزار دوبُعدی بود که تا آن زمان یک میلیون نسخه از آن فروخته شده بود. منافع سال۹۲ این شرکت(۲۸۵ میلیون دلار)دو برابر سود یونی‌گرافیکس بود. در اولین نسخهٔ اتوکد سه‌بعدی از هستهٔ*ACIS* استفاده شد.

۱-۸ رایانهٔ شخصی برگ برنده شد

در سال ۱۹۸۷، فروشندگان سنتی سامانه‌های *CAD*، تقریباً صد هزار عدد از نرم‌افزارها و تجهیزات را برای پشتیبانی از کاربران خود فروخته بودند. آنها هفده سال مشغول این کار بودند. تنها در پنج سال، فروشندگان جدید نرم‌افزار*PC* به اندازهٔ هفده سال آنها سامانه نصب کردند. رایانه‌های شخصی در واقع جایگاه ایستگاه‌های کاری‌مهندسی را پیدا کردند. *PC*های اولیه بیشتر وسیله‌ای برای سرگرمی بودند تا ابزارهای فنی جدی؛ اما در ماه اوت ۱۹۸۱ که *IBM* اولین*PC* مدل ۵۱۵۰ را معرفی کرد وضع تغییر کرد. این دستگاه دارای ۱۶ کیلو بایت حافظه و یک صفحه نمایش الفبایی بود و هیچگونه دیسک سختی نداشت. ولی بسیار ارزان بود. تصمیم درست *IBM* استفاده از یک ریزپردازنده اینتل۴/۷ مگاهرتزی ۸۰۸۸ و سیستم عامل جدیدی از یک شرکت کوچک در سیاتل بنام میکروسافت بود.

مقداری طول کشید که دستگاه‌های سازگار با *PC* ساخت*IBM* کارایی و قابلیت‌های گرافیکی لازم برای اجرای نرم‌افزار*CAD* را داشته باشند. در ابتدا، چند شرکت از جمله تی.دبلیوسیستمز[۵۳] که نرم‌افزار*PC* می-نوشتند مشغول به کار با رایانه‌هایی با قیمت مشابه از جمله اَپل۲ یا رایانه‌های گران قیمت مانند *Terak8510* شدند. همچنین یکسری سامانه‌های سفارشی وجود داشتند که مشتری‌ها آنها را تجربه کرده بودند. قبل از شروع اتودسک، جی. واکر[۵۴]و دی. دریک[۵۵]رایانه‌های شخصی با استفاده از ریزپردازنده‌های

[53] *T&W Systems*
[54] *J. walker*
[55] *D. Draik*

Texas Instrumeuts' 9900 را ساختند و ام. ریدل[۵۶] نرم افزارهایی را برای این رایانه‌های شخصی با سیستم عامل *CP/M* از شرکت دیجیتال ارائه کرد.

طی چند سال بعد، اینتل یکسری ریزپردازنده‌های بسیار قوی و هم پردازنده‌های ریاضیاتی را عرضه کرد. فروشندگان لوازم جانبی هم شروع به عرضه کارت‌های شتاب‌دهندهٔ گرافیکی کردند که می‌توانستند توسط فروشنده و یا حتی کاربران خبره به *PC* متصل شوند. در سال ۱۹۸۳، اتودسک نزدیک به هزار نسخه از اتوکد به ارزش حدود یک میلیون دلار فروخت. از جمله نرم‌افزارهای دیگر از این نوع عبارت بودند از: *CADRA* (۱۹۸۳) از شرکت آدرا سیستمز[۵۷]، *Microstation* (۱۹۸۴) از شرکت بنتلی سیستمز[۵۸]، *CADKEY* (۱۹۸۵) از میکروکنترل‌سیستمز[۵۹] و *MiniCAD* (۱۹۸۵) از شرکت دایل‌گراف سُفت[۶۰].

به دلایل زیر بازار *PC CAD* از بازار فروشندگان عمده جدا شد؛ فروشندگانی که در میانهٔ مرحلهٔ گذار از تولید سامانه به فروشندگی ایستگاه‌های کاری استاندارد و نرم‌افزار بودند.

- مفهوم ۸۰ به ۲۰: نسخه‌های اولیه نرم‌افزارهایی مانند اتوکد و ورساکد[۶۱] حدوداً هشتاد درصد از قابلیت‌های سامانه‌های بزرگ مثل *CADDS4*، *IGDS* و یا اتوترول ۵۰۰۰ را تنها در ازای بیست درصد قیمت آنها ارائه می دادند.
- فروشندگان نرم‌افزار *PC* سعی نمی‌کردند که همهٔ کارها را خودشان انجام بدهند. فروشندگان نرم‌افزارهای جانبی[۶۲] که قابلیت‌های کاربردی به محصول اضافه می‌کردند هم درگیر کار تدوین شدند. درحالیکه فروشندگان عمده جرأت چنین کاری را نداشتند.
- این تنها یک کسب و کار نرم‌افزاری بود.
- نرم‌افزار از طریق نمایندگی‌هایی فروخته می‌شد که بیشتر پول خود را از فروش سخت‌افزار و ارائه خدمات آموزشی در می‌آوردند.
- کاربران برای گرفتن پشتیبانی فنی بجای فروشندهٔ نرم‌افزار به نمایندگی فروش ایشان مراجعه می‌کردند.

در خلال سال‌های میانی دههٔ هشتاد، فروشندگان عمده طوری با بازار نوظهور *PC* برخورد کردند که گویی این بازار به سادگی کنار می‌رود. عوامل فروش آنها قابلیت‌های *PC* را کوچک جلوه می‌دادند و «پسر بزرگ[۶۳]» خود را به عنوان راه حل ارائه می‌دادند.

فروشندگان بزرگتر در آن زمان دو رویکرد در پیش گرفتند. بعضی‌ها زیرمجموعه‌ای از نرم‌افزار خود را به *PC* منتقل کردند. دیگران نسخهٔ جایگزین خود برای اتودسک را با افزودن پردازندهٔ یونیکس به رایانه-های شخصی ایجاد نموده و سعی کردند از همان نرم‌افزاری که روی ایستگاه‌های کاری اجرا می‌شد

---

[56] *M. Riddle*
[57] *Adra systems*
[58] *Bentley systems*
[59] *Micro Control Systems*
[60] *Diehl Graphsoft*
[61] *VersaCAD*
[62] *Third-party software vendors*
[63] *Big boy*

استفاده کنند. در هر حالت این محصولات برای سامانه‌های اصلی شرکت‌ها محصولات ثانویه بشمار می‌رفتند.

دراین ایام بود که روند بازار(بخصوص ضرر پنج بیلیون دلاری سال۹۲ *IBM*) نشان داد که مشتری‌ها سامانه‌های ارزانتر و «باز» را می‌خواهند و دیگر حاضر به پرداخت وجوه سنگین نگهداری سخت‌افزار و سیستم‌های عامل اختصاصی نیستند. نقطهٔ عطف بزرگ در اواسط۱۹۹۳، ارائهٔ ویندوز*NT* توسط میکروسافت بود. این سیستم عامل باعث ساده‌تر شدن پشتیبانی یونیکس و ویندوز شد و در زمان نسبتاً کوتاهی تمام فروشندگان، نسخه‌های ویندوز *NT* خود را ارائه کردند. گرچه نرم‌افزارهایی که روی یک ایستگاه‌کاری یونیکس یا یک*PC* با ویندوز *NT* اجرا می‌شدند اکثراً شارژ یکسانی داشتند بخش سخت‌افزاری یک سامانهٔ نمونهٔ *PC* کمتر از نصف بخش مشابه از یک سامانهٔ ایستگاه کاری مهندسی بود.

رایانه‌های شخصی هنوز از نظر کارایی ضعف‌هایی داشتند اما فاصله به سرعت در حال کمتر شدن بود. بخصوص پس از اینکه اینتل خط ریزپردازندهٔ پنتیوم را در اواسط سال۱۹۹۵راه‌اندازی کرد. در طول یک دهه بعد، رایانه‌های شخصی برای اکثر کاربران *CAD* با ایستگاه‌های‌کاری یونیکس به پلت فرم[۶۴] اولیه تبدیل شدند. کارایی*PC* دیگر مشکلی نداشت. در عرض ۱۲ سال، سرعت ساعتی پنتیوم از ۱۳۳ مگاهرتز به حدود ۴ گیگاهرتز، حافظه معمولی از ۲۵۶ کیلوبایت به بیش از یک گیگا بایت و گرافیک آن به بالاتر از گرافیک ایستگاه‌های کاری صدهزار دلاری در سال ۱۹۹۵ ارتقاء یافت. در حالیکه قیمت کل سامانه بسیار نازل‌تر بود. کارایی بمراتب بالاتری را هم می‌توان در آینده انتظار داشت. در اواخر سال ۲۰۰۶ بعضی از رایانه‌های شخصی به دو یا چهار هسته مجهز شدند. انتظار می‌رود تراشه‌هایی با عناصر پردازش هشت‌تایی، شانزده‌تایی یا بیشترهم چند سال آینده به بازار عرضه شوند. البته نرم‌افزار *CAD* برای استفاده از این قابلیت پیشرفتهٔ پردازشی می‌تواند مناسب باشد.

۱-۹ ظهور سامانه‌های میان بُرد[۶۵]

تقریبا تا سال۱۹۹۳ همهٔ نرم‌افزارهای پیشروی *CAD* دارای قابلیت‌های یکسانی مانند امکانات نقشه‌کشی و کروکی، مدیریت قیود، مدل‌سازی حجمی ویژگی–مبنا، درخت‌های تاریخچه، سطوح نربز و ارتباط کاربری *X-Windows* و غیره بودند. در اواخر۱۹۹۴، میکروسافت اولین سیستم عامل سی و دو بیتی ویندوز*NT* را به بازار داد. اینتل هم اولین تراشهٔ پنتیوم پُروی سی و دو بیتی را تولید کرد. همزمان جنگ عرضه‌کنندگان هسته مدل‌سازی حجمی به شدت بالا گرفت بطوریکه ایی.دی.اس/یونی‌گرافیکس[۶۶]، *Parasolid* را روی ویندوز*NT*، تکنولوژی فضایی‌قابلیت‌های تکمیلی *3D Toolkit* برای *ACIS* روی ویندوز *NT* و ریکو[۶۷]، *DesignBase* را روی ویندوز به بازار دادند. با این امکانات تدوین نرم افزار*CAD*سه بعدی که قبلا سال‌ها زمان و میلیون‌ها دلار هزینه لازم داشت حالا با بودجه‌های خیلی کمتر در حد شروع و کمتر از یک سال

---

[64] *Platform*
[65] *Mid–range*
[66] *EDS/Unigraphics*
[67] *Richo*

طراحی و تدوین می‌شد و این کاری بود که یک شرکت نرم‌افزاری کوچک به نام سالیدورکس[۶۸] انجام داد. سالیدورکس باعث شد که دیگر عرضه‌کنندگان هم به سمت ویندوز و مزایایی همچون ابزارهای *MFC* و ویژال *C++* بروند. بطوریکه تا آخر۱۹۹۵تمام این شرکت‌ها نسخهٔ ویندوز *NT* خود را به بازار ارائه کردند. همین امر تولیدکنندگان سخت‌افزار را برآن داشت که پردازنده و کارت گرافیک خود را قویتر کنند.

موفقیت سالیدورکس به حدی بود که بعد از دو سال داسُلت سیستمز حق مالکیت آن را به۳۲۰ میلیون دلار خرید. از جمله سامانه‌های میان‌برد دیگر، *SolidEdge* (۱۹۹۶) از شرکت اینترگراف، *DesignWave* از شرکت کامپیوترویژن، *Mechnical Desktop* از اتودسک و *CADKEY* بودند.

سامانه‌های میان بُرد هم از نظر فن‌آوری مربوطه و هم از نظر نحوهٔ بازاریابی متفاوت بودند. این سامانه-ها به چند دلیل بر سامانه‌های قدیمی‌تر مزیت داشتند:

- این سامانه‌ها مخصوص اجرا روی *PC* در سیستم عامل ویندوز تدوین شدند؛
- در آنها از فن‌آوری نرم‌افزاری جز[۶۹] بخصوص برای مدل‌سازی هندسی و مدیریت قید[۷۰] استفاده شد؛
- این نرم‌افزارها روی طراحی متمرکز بوده و به نقشه‌کشی کمتر می‌پرداختند و سایر کاربردها مثل تولید برنامه‌های *NC* و تحلیل به شرکای دیگر سپرده شد؛
- مانند سامانه‌های مبتنی بر*PC*، سامانه‌های میان برد عمدتاً توسط نمایندگی‌ها فروخته شدند. با این تفاوت که فروشندگان پشتیبانی فنی بیشتری ارائه می‌کردند؛
- قیمت یک نمونه از این نرم‌افزارها بین سه تا شش هزار دلار به ازای هر صندلی یا حدود یک چهارم قیمتی بود که برای سامانه‌های کامل در اواسط دههٔ ۹۰ پرداخت می‌شد.

علاوه بر رواج سیستم‌های میان برد در دههٔ نود، بازار سیستم‌های «مدیریت اسناد محصول*PDM*» هم بسیار رونق گرفت. با تسریع طراحی و نقشه‌کشی و افزایش سرسام آور مدارک فنی و اسناد، به سیستمی نیاز بود که به این اسناد سازماندهی کند. سودآوری سیستم‌های *PDM* تا ۱۹۹۷ به یک بیلیون دلار رسید.

۱-۱۰ وضعیت حال حاضر سامانه‌های *CAD*

در اواخر دههٔ ۹۰ با توجه به جو حاکم بر بازار سه جریان عمده وجود داشت. اول خرید حق مالکیت‌ها و تقویت نسخه‌های اصلی، دوم هجوم برای بدست گرفتن بازار *PDM* و سوم افزودن قابلیت‌های اینترنتی نرم افزارها. داسُلت سیستمز بعد از خرید سالیدورکس، دِنِب روباتیک[۷۱]و مَترادیتاویژن[۷۲] را هم خرید. در ۱۹۹۹، *PTC* حق مالکیت کامپیوترویژن را گرفت.

گرچه نرم‌افزارهایی مانند نرم‌افزار شرکت آلیبرا[۷۳] که در۱۹۹۷ تاسیس شد قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی در وب را داشتند تمرکز اصلی فراهم‌کردن امکان دیدن مدل‌های سه‌بعدی در وب و ایجاد صندوق‌های ارتباط

---

[68] *SolidWork*
[69] *Component software technology*
[70] *Constraint management*
[71] *Deneb Robotics*
[72] *Matra Datavision*
[73] *Alibre*

اینترنتی برای سامانه‌های *PDM* بود. یکی از پیشگامان این امر داسُلت سیستمز است که در۱۹۹۶ با گروه ابزار کنفرانسی *CATIA* امکان بازدید و حاشیه‌نویسی[۷۴] بر مدل‌های *CATIA* را از طریق اینترنت فراهم کرد. در۱۹۹۷ داسلت نسخهٔ ناوبری *CATWEB* خود را عرضه کرد که بازدید از مدل‌های سه بعدی و مونتاژی-های *CATIA* را در وب ارتقا بخشید. در ۱۹۹۸ نرم‌افزارجانبی *ENOVIA* را برای توسعه سیستم *PDM II* خود ارائه کرد. کار مشابهی از طرف *PTC* به اتفاق *SupplierMarket.com* به نام نرم‌افزار *Windchill PDM* صورت گرفت. *CoCreate* هم که قبلا بخش نرم‌افزاری *HP* بود نرم‌افزار *OpenSpaceWeb* خود را به بازار ارائه کرد. *EDS* هم نرم‌افزار *iMAN PDM* را راه اندازی کرد.

در دههٔ اول قرن بیست و یک صنعت *CAD* به سمت مدل‌سازی سه‌بعدی در اینترنت بصورت کِلاینت–سرور[۷۵] پیشرفت. نسخهٔ اتوکد*2000i* در اواسط سال ۲۰۰۰ این قابلیت را داشت. نقشه‌های خروجی را می-شد در صندوق پستی الکترونیکی دید و با *Microsoft Net Meeting* تا اندازه‌ای قابل تشریک مساعی بود.

دراواخر۲۰۰۰شرکت فورد نشان داد که با نرم‌افزار *CAD*مجتمع با *PDM* چقدر می‌توان زمان چرخهٔ طراحی تا بازار را کاهش داد. این شرکت با استفاده از پِلت‌فرم *C3P* خود توانست زمان را تا یک سوم کاهش دهد. این موفقیت نشان داد که اجتماع نرم‌افزار *CAD*، *PDM* و اینترنت نه تنها زمان و هزینه را کم می‌کند بلکه جلوی خطاهای معمول در طراحی و ساخت محصولات پیچیده مثل خودرو ناشی از پراکندگی طراحان و سازندگان را می‌گیرد.

بوئینگ هم با «تدوین مجازی محصول[۷۶]» با یک مونتاژ سه‌بعدی مدل اجزا در نسخهٔ اصلی دیجیتالی بجای پروتایپ گلی، در کاهش زمان طراحی تا بازار موفق بود.

مفهوم *PLM* یا «مدیریت چرخهٔ عمرمحصول[۷۷]» که از تحقیقات دانشگاهی در اول دههٔ ۹۰ برآمده بود در اواخر دههٔ نود محبوبیت پیدا کرد و باعث شد پیشگامان صنعت *CAD* به سمت آن جلب شوند. چهار عرضه کننده پیشگام، داسلت سیستمز، *PTC*، یونی‌گرافیکس و *SDRC* بودند. *SDRC* که نرم‌افزار *Metaphase* خود را به فورد داده بود برای تقویتش رقیب دیرینه‌اش یعنی *Sherpa* را خرید. برای مدیریت قوی دیتابیس و شبکه، قابلیت نمایش سریع مجموعه‌های مونتاژی بزرگ در*PLM* ضروری است. به همین دلیل در اواخر ۲۰۰۰ یونی‌گرافیکس حق مالکیت شرکت *EAI* را که در این زمینه قوی بود خرید. اوایل ۲۰۰۱ یونی-گرافیکس به *UGS* تغییر نام داد و *SDRC* را خرید. همزمان *EDS* چهارده درصد از سهام *UGS* را که قبلا بصورت عمومی فروخته بود پس گرفت. فورد که از هستهٔ *SDRC* استفاده می‌کرد پس از دریافت پیام‌هایی منفی از*UGS*، نرم‌افزار *PLM* خود را به *CATIA* و *ENOVIA* تغییر داد.

روند تثبیت صنعت*CAD* از اواسط دههٔ نود شروع شد. فروشندگان عمده درحال حاضر خود را به عنوان بیش از یک عرضه‌کنندهٔ نرم‌افزار*CAD* و مدیریت اسناد می‌بینند. نحوهٔ آموزش‌های فنی و تا حد زیادی،

---

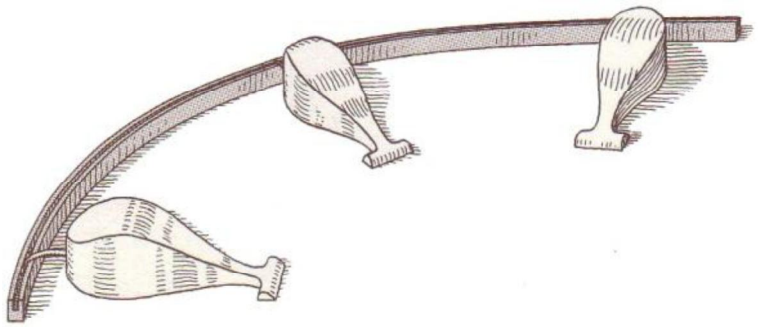
[74] *Annotation*
[75] *Client-Server*
[76] *Virtual product development*
[77] *Product Life cycle Management*

نحوهٔ پرداختن به حرفه‌های متعدد نیز تغییر کرده است. مهندسان طراح امروزی تجزیه و تحلیل‌هایی انجام می‌دهند که چند سال پیش تنها از عهدهٔ متخصصین حرفه‌ای برمی‌آمد. در طرف دیگر معادلات، نقشه‌کشی بواسطه نسل جدیدی از برنامه‌های طراحی به عنوان یک حرفه در حال کنار رفتن است و در خیلی از موارد طرح‌های جدید با تعداد کمی یا بدون هیچ نقشهٔ کاغذی به مرحله تولید می‌رسند و این همان گرایش به صنعت بدون کاغذ[۷۸] است.

۱-۱۱ تاریخچهٔ مدل‌سازی قاب سیمی و سطحی

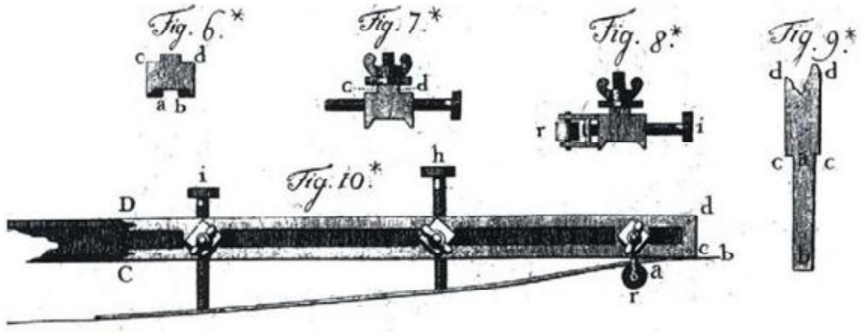
احتمالاً قدیمی‌ترین کاربرد به ثبت رسیده از منحنی‌ها در ساخت، به دوران رومی‌ها برای مصارف کشتی سازی برمی‌گردد. پشت‌بندهای کشتی[۷۹]– تخته‌های چوبی[۸۰] بیرون آمده از تیر ته کشتی[۸۱]– بر مبنای شابلن‌های چندبار مصرف تولید می‌شدند. به این ترتیب هندسهٔ پایهٔ شناور قابل ذخیره‌سازی بود و نیازی به بازسازی مجدد نداشت. این تکنیک‌ها توسط ونیزی‌ها در قرون سیزده تا شانزده تکمیل شدند. فُرم پشت‌بندها برحسب کمان‌های دایره‌ای دارای پیوستگی شیب تعریف می‌شد. بدنهٔ کشتی با تغییر شکل پشت‌بندها در طول تیر ته کشتی بدست می‌آمد (که این خواستگاه تعاریف امروزی سطوح بصورت حاصل‌ضرب تنسوری است).

نقشه‌کش‌ها قرن‌ها از منحنی‌ها استفاده می‌کرده‌اند. گرچه بیشتر، این منحنی‌ها دایره بوده‌اند گاهی هم از منحنی‌های غیرتحلیلی استفاده می‌شده است. این منحنی‌ها در مصارفی نظیر طراحی بدنهٔ کشتی کاربرد داشته‌اند. برای رسم دقیق این منحنی‌ها، معمولاً از شابلن‌هایی معروف به منحنی‌های فرانسوی استفاده می‌شده است. این شابلن‌های چوبی بدقت از قسمت‌هایی از مقاطع مخروطی و مارپیچ‌ها طراحی و ساخته می‌شدند. یک منحنی از این نوع بصورت تکه به تکه با تعقیب قسمت‌های مناسب شابلن رسم می‌شد.



شکل۱-۹. (آ) یک اسپلاین مکانیکی مربوط به دههٔ اول ۱۷۰۰،

[78] *Paperless industry*
[79] *Ship ribs*
[80] *Wooden planks*
[81] *Keel*



شکل۱-۹. (ب) اسپلاین به همراه سه دوک آن.

«اسپلاین[۸۲]» کلاسیک، بصورت یک تیرچوبی که برای رسم منحنی‌های هموار استفاده می‌شد، احتمالاً از سال ۱۶۰۰ به بعد ابداع شد(شکل۱-۹). به نظر می‌رسد نخستین یادداشت موجود در مورد اسپلاین مربوط به ۱۷۵۲ است. این وسیله تسمهٔ انعطاف‌پذیری بود که با استفاده از وزنه‌های فلزی به نام دوک[۸۳]، شکل داده می‌شد. یک اسپلاین تمایل دارد که به حداقل مقدار ممکن خم شود که در نتیجه شکل‌هایی را تولید می‌کند که از نظر ظاهری خوشایند و از نظر فیزیکی بهینه هستند. منحنی اسپلاین در *CAD* همتای ریاضیاتی اسپلاین مکانیکی یکی از بنیادی‌ترین شکل‌های منحنی پارامتری است.

هندسهٔ دیفرانسیلی منحنی‌های پارامتری، بعد از کار سرت/فرنت[۸۴] از اواخر دههٔ اول ۱۸۰۰ بخوبی شناخته شده بود. از طرف دیگر، تحقیقات در زمینهٔ تئوری تقریب و آنالیز عددی کاملاً روی توابع غیرپارامتری متمرکز بود. هر دوی این زمینه‌ها ضمن تشکیل عناصر ساختمانی مدل‌سازی هندسی یا طراحی هندسی به کمک رایانه *(CAGD*[۸۵]*)*، باهم تلفیق شدند.

حرکت دیگر در صنعت هوانوردی شکل گرفت. در ۱۹۴۴ آر. لیمینگ[۸۶] کتابی با عنوان «هندسهٔ تحلیلی با کاربرد برای هواپیما[۸۷]» نوشت. وی در جریان جنگ جهانی دوم برای کمپانی *NAA*[۸۸] کار می‌کرد. در این کتاب روش‌های نقشه‌کشی کلاسیک برای اولین بار با تکنیک‌های محاسباتی ترکیب شدند. مقاطع مخروطی ای که ابتدا درکشتی‌سازی و بعدها برای هواپیماسازی به کار می‌رفتند دراصل براساس مفاهیمی بودند که به پاسکال و مونژ منسوب‌اند.

بطور سنتی، این مفاهیم راهشان را به تختهٔ رسم نقشه‌کش‌ها و نقشه‌های «چاپ آبی»[۸۹] پیدا کردند. لیمینگ فهمید که جایگزین بهتری هم وجود دارد و آن ذخیرهٔ طرح درقالب اعداد به جای منحنی‌های تعقیب شوندهٔ

---

[82] *Spline*
[83] *Duck*
[84] *Serret/Frenet*
[85] *Computer-Aided Geometric Design*
[86] *R.liming*
[87] *Analytical Geometry With Application to Aircraft*
[88] *North American Ariation*
[89] *Blue prints*

دستی است. بنابراین او مفاهیم نقشه‌کشی کلاسیک را به الگوریتم‌های عددی ترجمه کرد. مزیت کار او این بود که اعداد را می‌توان در جداولی ذخیره کرد و جایی برای تفاسیر مختلف از نقشه‌ها باقی نگذاشت. کار لیمینگ در دههٔ پنجاه خیلی تأثیرگذار بود و بطور گسترده‌ای توسط کمپانی‌های هواپیماسازی آمریکایی به کار گرفته شد.

موضوع تأثیرگذار دیگر بر طراحی هندسی به کمک رایانه، پیشرفت کنترل عددی *(NC)* در دههٔ پنجاه بود. رایانه‌های اولیه قادر به ارسال دستورات عددی برای فرمان‌دهی به ماشین‌های فرز و تولید قالب‌های ورق‌کاری بودند. در *MIT* زبان برنامه‌نویسی *APT* برای این منظور تدوین شده بود. فقط یک مشکل باقی می‌ماند: تمام اطلاعات لازم بصورت نقشه‌های کاغذی بودند و طریقهٔ ارتباط این اطلاعات با رایانه برای راه انداختن ماشین فرز معلوم نبود. انتقال نقاط از نقشه به رایانه (رقومی‌گری[۹۰]) و برازش[۹۱] منحنی‌ها با استفاده از تکنیک‌هایی مثل میانیابی لاگرانژی در ابتدا شکست خورد. خواستهٔ اصلی طراح بجای کنترل دستگاه فرز، یک پلاتر بود که محصول طراحی او را به سرعت برایش چاپ کند. نقشه‌کشی و پلات گرفتن آنقدر مهم بودند که تقریباً تمام هدف از بکارگیری رایانه، تولید نقشه بود. در واقع اصطلاح *CAD* فقط برای بیان «نقشه‌کشی به کمک رایانه»[۹۲] استفاده می‌شد.

در اواخر دههٔ پنجاه و اوایل دههٔ شصت چند محقق در زمینهٔ گذار از نقشه‌های دستی به محاسباتی فعال بودند. اس. کونز[۹۳] در *MIT*، پی. اف. کاستلژو[۹۴]در سیتروئن، پی. بزییر[۹۵]در رنو، جی. فرگوسن[۹۶]در بوئینگ و سی. بور[۹۷] و دبلیو. گوردن[۹۸] درجنرال موتورز از جمله این محققان بودند. همانطوریکه قبلا اشاره شد اولین سیستم گرافیکی تعاملی به نام *Sketchpad* توسط ایوان ساترلند[۹۹]در۱۹۶۳ ابداع شد. رسالهٔ دکتری او بخشی از پروژهٔ *CAD* در *MIT* بود که کونز عضوی از کمیتهٔ دکتری وی بود.

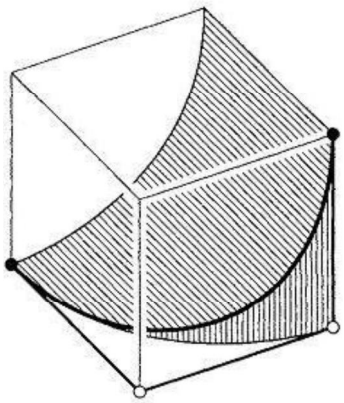
۱-۱۲ کاستلژو و بزییر

در۱۹۵۹، کمپانی خودروسازی سیتروئن یک ریاضی‌دان جوان را برای حل مسایل تئوری نقشه‌کشی رایانه‌ای به‌کار گرفت که اسمش پائول فاگت کاستلژو بود و بتازگی دکترای خود را تمام کرده بود. وی شروع به تدوین سیستمی کرد که هدفش در ابتدا بجای بازسازی نقشه‌های موجود، طراحی از صفر منحنی‌ها و سطوح بود. برای تعریف منحنی‌ها و سطوح از چند جمله‌ای‌های برنشتاین[۱۰۰]بهمراه الگوریتمی که امروز به الگوریتم کاستلژو معروف است استفاده کرد. پیشرفت غیرمنتظره، استفاده از چندضلعی‌های

---

[90] *Digitizing*
[91] *Fitting*
[92] *Computer Aided Drafting or Draughting*
[93] *S.Coons*
[94] *Paul de faget de casteljau*
[95] *P.Bezier*
[96] *J.Ferguson*
[97] *C. de boor*
[98] *W.Gordon*
[99] *I.Sutherland*
[100] *Bernstein polynomials*

کنترل بود؛ روشی که هرگز قبلاً بکار نرفته بود. در این روش بجای تعریف یک منحنی(سطح) از طریق نقاط روی آن، از یک چندضلعی(چند وجهی) کنترل از نقاط نزدیک به آن استفاده می‌شود.
همچنین بجای تغییر مستقیم منحنی(سطح)، کاربر چندضلعی(چند وجهی) کنترل را تغییر می‌دهد و شکل منحنی(سطح) بطور محسوس از این تغییر تبعیت می‌کند. در زمینهٔ هندسهٔ دیفرانسیلی، مفاهیم مشابه چند ضلعی‌های کنترل حتی از ۱۹۲۳ ابداع شده بودند ولی تاثیری در کاربردها نداشتند. کار کاستلژو توسط کمپانی سیتروئن برای مدت مدیدی سری نگهداشته شد. اولین افشای عمومی این الگوریتم (بدون ذکر نام مبدع آن)۱۹۷۱ صورت گرفت. دبلیو. بوئم[۱۰۱] اولین کسی بود که در کمیتهٔ تحقیقاتی به نام وی برای کارش اشاره کرد. او به گزارش‌های کاستلژو پی برد و اصطلاح الگوریتم کاستلژو را در اواخر دههٔ هفتاد به نام او ضرب زد. کاستلژو بعد از بازنشستگی در۱۹۸۵ طی مقاله‌ای مفهوم شکوفه دادن[۱۰۲]را معرفی کرد.
جای دیگری که می‌توان درباره تلاش‌های سیتروئن چیز یاد گرفت رقیب آن یعنی رنو بود. در اوایل دههٔ شصت بزییر مسئول دپارتمان طراحی رنو بود و لزوم نمایش رایانه‌ای قطعات مکانیکی را درک کرده بود. تلاش‌های بزییر ضمن متأثر بودن از کارهای مشابه در سیتروئن، بطور مستقل انجام می‌گرفت. طرح اولیهٔ بزییر این بود که یک منحنی پایه را به صورت تقاطع دو استوانهٔ بیضوی(شکل۱-۱۰) نشان بدهد. دو استوانه داخل یک منشور متوازی‌السطوح تعریف می‌شدند. تبدیلات آفینی[۱۰۳] این منشور می‌توانست منجر به تبدیلات آفینی منحنی گردد. بعدها، بزییر به سمت فرمول‌بندی چندجمله‌ای این مفهوم ابتدایی حرکت کرد و آن را به درجات بالاتری هم بسط داد. نتیجه همان منحنی‌های کاستلژو بود فقط ریاضیات مربوطه متفاوت بود.



شکل۱-۱۰. طرح بزییر برای مدل کردن منحنی

[101] *W.Boehem*
[102] *Blossoming*
[103] *Affin transformations*

کار بزییر بطور گسترده‌ای چاپ شد و بزودی مورد توجه قرار گرفت. سامانهٔ *CAD/CAM* رنو با عنوان *UNISURF* براساس منحنی‌ها و سطوح بزییر تدوین شد. این سامانه بر پیشرفت‌های کمپانی هواپیماسازی فرانسوی داسُلت سیستمز[۱۰۴] که سامانه‌ای به نام*EVE* را ایجاد کرده بود نیز تأثیر گذاشت. بعداً اسم این سامانه بنام *CATIA*[۱۰۵] تغییر یافت. بزییر روشی را هم برای تغییرشکل کل مجموعه‌های مونتاژ شدهٔ سطوح ابداع کرد که از قرار دادن آنها در یک مکعب و سپس تغییرشکل دادن مکعب بزییر حاصل می‌شد.

۱-۱۳ منحنی‌های پارامتری

از اواسط دههٔ پنجاه، کمپانی آمریکایی بوئینگ نرم‌افزاری مبتنی بر ساختماهای مخروطی لیمینگ را در طراحی بدنهٔ هواپیما بکار گرفت. در قسمت دیگری از کمپانی فرگوسن و دی. مک لارن[۱۰۶] نوع دیگری از منحنی‌ها را برای طراحی بال‌ها تدوین کردند. طرح آنها یک تکه کردن منحنی‌های فضایی درجهٔ سوم بود بطوریکه منحنی‌های مرکبی با دو بار مشتق‌پذیری بدست بیایند. این منحنی‌ها می‌توانستند به راحتی مجموعه‌ای از نقاط را میانیابی کنند. این منحنی‌ها به اسپلاین منتسب شدند زیرا یک تابعی شبیه خواص فیزیکی اسپلاین‌های مکانیکی را کمینه می‌کنند. معنی «منحنی اسپلاین»از آن موقع یک تغییر ظریف داشته است. بعوض ارجاع به منحنی‌هایی که تابعی‌های معینی را کمینه می‌کنند درحال حاضر منحنی‌های اسپلاین غالباً به عنوان منحنی‌های چندجمله‌ای تکه‌ای (یا چندجمله‌ایهای نسبتی) با خواص همواری معین قلمداد می‌شوند.

فرگوسن معادلات اسپلاین خود را با استفاده از شکل تک جمله‌ای تکه‌ای استخراج کرد. اما او نیز از شکل هرمیتی درجهٔ سوم (که بعداً به نام منحنی‌های *F*[۱۰۷]معروف شدند) استفاده کرد که یک منحنی مکعبی را بر حسب دو نقطهٔ انتهایی و دو مشتق انتهایی تعریف می‌کند. کونز این نوع منحنی را برای ایجاد سطوحی استفاده کرد که بعداً به نام خودش نامیده شدند. در دانشگاه کمبریج انگلستان ای.آر.فورست[۱۰۸] بعد از آشنایی با ایدهای کونز کارش را روی منحنی‌ها و سطوح شروع کرد. تز دکتری وی(۱۹۶۹) کار روی کلاس‌بندی شکلی منحنی‌های درجهٔ سوم، منحنی‌های درجهٔ سوم نسبتی[۱۰۹]و تعمیم سطوح کونز بود. وی منحنی‌های هرمیتی مکعبی را به مکعبی نسبتی بسط داد. همچنین پی برد که منحنی‌های بزییر را می‌توان برحسب چندجمله‌ای‌های برنشتاین یعنی به فرمی که کاستلژو از اواخر دههٔ پنجاه استفاده کرده بود بیان کرد. مقالهٔ فورست در مورد منحنی‌های بزییر خیلی تأثیرگذار بود و به جذابیت چشمگیر این منحنی‌ها

---

[104] *Dassault systems*
[105] *Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*
[106] *D.Maclaren*
[107] *F-Curves*
[108] *A.R.Forrest*
[109] *Rational cubics*

کمک کرد. یک سال بعد از فورست، لی[۱۱۰] در رسالهٔ دکتریش در دانشگاه هاروارد تحقیقات او را برای توصیف سطوح دومکعبی تعمیم داد.

بنیادی‌ترین فرم منحنی پارامتری، منحنی‌های بزییر هستند. بسیاری از خواص پایه‌ایی را می‌توان در مقالات بزییر، ورنت و فورست پیدا کرد. بعد از ایشان محققان دیگر به کارهای دیگری از جمله تعیین شرایط پیوستگی C^r بین منحنی‌های بزییر، اثبات پایداری بیشتر منحنی‌های بزییر نسبت به سایر منحنی‌ها، توسعهٔ الگوریتم«شکوفه دادن» و نمایش نمادی منحنی‌ها و سطوح بزییر پرداختند.

جایگزین قدیمی منحنی‌های پارامتری، پاره منحنی‌های صریح با سیستم‌های مختصات محلی مجزا بودند. این منحنی‌ها به اسپلاین‌های ویلسن– فولر[۱۱۱] مشهورند. بعد از پیشرفت منحنی‌های پارامتری، این منحنی-های صریح تکه‌ای رفته‌رفته منسوخ شدند.

۱-۱٤ منحنی‌های بی‌اسپلاین و نربز[۱۱۲]

بی‌اسپلاین‌ها[۱۱۳] روی گره‌های یکنواخت را به آی. شونبرگ[۱۱۴](۱۹۴۶) و در حالت گره‌های غیریکنواخت را به اچ. کوری[۱۱۵](۱۹۴۷) نسبت می‌دهند. در ۱۹۶۰، بور برای آزمایشگاه تحقیقاتی جنرال موتورز شروع بکار کرد. وی از بی‌اسپلاین‌ها بعنوان ابزار نمایش هندسی استفاده کرد و بعدها یکی از بانفوذترین طرفداران بی‌اسپلاین‌ها در تئوری تقریب شد. ارزیابی بازگشتی منحنی‌های بی‌اسپلاین بخاطر اوست و امروز به عنوان الگوریتم بور شناخته شده است. این خاصیت بازگشت بود که بی‌اسپلاین‌ها را به یک ابزار کاملا ماندگار در $CAGD$ تبدیل کرد. قبل از کشف این بازگشت(بطور مستقل از هم توسط بور، ال. منسفیلد[۱۱۶]و ام. کوکس[۱۱۷]، بی‌اسپلاین‌ها به روش سختی با تفاضل تقسیم‌شده[۱۱۸] تعریف می‌شدند که از نظر عددی بسیار ناپایدار بود. توابع اسپلاین در تئوری تقریب مهم هستند اما در $CAGD$ منحنی‌های اسپلاین پارامتری خیلی مهمترند. این منحنی‌ها در۱۹۷۴ توسط آر. ریزنفلد[۱۱۹]و گوردن معرفی شدند. ایشان فهمیدند که ارزیابی بی‌اسپلاین بازگشتی بور تعمیم طبیعی الگوریتم کاستلژو است.

کونز در۱۹۶۹ به دانشگاه سیراکوس[۱۲۰] نقل مکان کرد و در این دانشگاه استاد رسالهٔ ریزنفلد شد. ریزنفلد روش جدیدی برای توصیف بی‌اسپلاین‌ها ارائه کرد. یکی دیگر از کاندیداهای دکتری سیراکوس، کی.

---

[110] *Lee*
[111] *Wilson-Fowler*
[112] *Non-Uniform Rational B-Spline*
[113] *Basis Splines or B-spline*
[114] *I.Schoenberg*
[115] *H.Curry*
[116] *L.Mansfield*
[117] *M.Cox*
[118] *Divided difference*
[119] *R.Riesenfeld*
[120] *Syracuse*

ورس پریل[۱۲۱] بود که روی بی‌اسپلاین‌های نسبتی در فضای همگن کار می‌کرد. ایشان رساله دکتریش را در ۱۹۷۵ دفاع کرد. خیلی‌ها ورس‌پریل را به عنوان تدوین‌گر نربز (بی‌اسپلاین‌های نسبتی غیریکنواخت *NURBS*) می‌شناسند. گام بعدی در سیراکوس رسالهٔ دکتری ال. نپ[۱۲۲]بود که آن را در ۱۹۷۹ دفاع کرد و یک بلوک کلیدی در تکامل نربز به شمار می‌رود. منحنی‌های بی‌اسپلاین، که منحنی‌های بزییر را بعنوان یک حالت خاص در برمی‌گیرند بزودی هستهٔ مرکزی تقریباً تمام سامانه‌های*CAD* شدند. اولین تبدیل بی-اسپلاین به بزییر توسط بوئم پیدا شد. به زودی الگوریتم‌هایی برای‌ساده‌کردن عملیات ریاضیاتی منحنی-های بی‌اسپلاین تدوین گردید. این الگوریتم‌ها عبارت بودند از: الگوریتم درج گرهٔ بوئم، الگوریتم اسلو [۱۲۳]توسط ایی. کوهن[۱۲۴]، تی.لیچه[۱۲۵]و ریزنفلد و اصل شکوفه‌دادن توسط ال. رامشا[۱۲۶] و کاستلژو.

کار توسعه‌ای در کمپانی بوئینگ بر روی سامانه نربز ستودنی است. این کمپانی فهمید که دپارتمان‌های مختلف انواع مختلفی از نرم‌افزارهای هندسی را بکار می‌برند؛ بدتر اینکه هندسه‌ها با هم سازگارنبودند. نتایج نرم‌افزار مبتنی برمقاطع مخروطی لیمینگ قابل وارد کردن مستقیم در سامانه مبتنی براسپلاین فرگوسن و برعکس نبودند. بنابراین نربز بعنوان استاندارد پذیرفته شد زیرا قابلیت نمایش واحد هندسه-های مختلف را دارد. کمپانی‌هایی نظیر بوئینگ، *SDRC* و یونی‌گرافیکس[۱۲۷] بزودی شروع به ایجاد نرب به عنوان یک استاندارد*IGES* کردند.

۱-۱۵ تکه سطوح(پَچ‌های[۱۲۸]) مستطیلی و مثلثی

سطوح پارامتری بعد از کار اولی گوس[۱۲۹] و اولر[۱۳۰] بخوبی شناخته شده بودند. این سطوح بلافاصله در تدوین سامانه‌های *CAD/CAM* استفاده شدند. یک کاربرد استاندارد، تعقیب سطح برای پلات گرفتن است. جذاب‌ترین نوع سطوح، سطوح حاصل‌ضرب تنسوری بودند. اولین بار سی. بور این سطح را برای میانیابی اسپلاینی دومکعبی معرفی کرد.

مطالعات تئوری سطوح پارامتری برای تقریب و میانیابی به دهه ۱۹۲۰ برمی‌گردد اما این مطالعات تاثیر کمی روی توسعهٔ روش‌های صنعتی داشتند. اواخر دههٔ پنجاه، مطالعهٔ سطوح پارامتری در چند کمپانی در اروپا و آمریکا صورت گرفت. اولین نتیجه چاپ شده به فرگوسن در بوئینگ مربوط می‌شود. فرگوسن آرایه‌ای از پچ‌های دومکعبی[۱۳۱] را استفاده کرد که شبکه‌ای از نقاط داده‌ای را میانیابی می‌کردند. درحالیکه

---

[121] *K.resprille*
[122] *L. Napp*
[123] *Oslo*
[124] *E.cohen*
[125] *T.lyche*
[126] *L.Ramshaw*
[127] *UNIGRAPHICS*
[128] *Patches*
[129] *Gauss*
[130] *Euler*
[131] *Bicubic patches*

فرگوسن منحنی‌های اسپلاینی مکعبی C^2 را در مقاله خود تدوین کرد سطوحش فقط C^1 بودند. این امر باعث ایجاد پیچش‌های‌صفر[۱۳۲] در گوشهٔ هر پچ می‌شد. پچ‌های دومکعبی فرگوسن به «اف پچ‌ها[۱۳۳]» معروف شدند و به کونز هم منسوب می‌شدند.

کونز فرمول ساده‌ای را ارائه کرد که پچی را بین چهار منحنی مرزی دلخواه برازش می‌کرد و به پچ کونز مخلوط شده دوخطی[۱۳۴]معروف شد. از این نوع سطوح در دههٔ شصت در کمپانی فورد (که کونز مشاور آن بود) استفاده می‌شد. گوردن در جنرال موتورز، با یک تعمیم، قابلیت میانیابی یک شبکهٔ مستطیلی از منحنی‌ها را ارائه کرد. پچ اولیه کونز معطوف به ایجاد سطوح هموار مرکب نبود. اصلاح روش اولیه باعث ارائه پچ کونز مخلوط شدهٔ دومکعبی شد که تعمیمی از میانیابی منحنی هرمیتی مکعبی بوده و امکان تجویز داده‌های مماسی علاوه بر منحنی‌های مرزی را فراهم می‌کند. جی. گرگوری[۱۳۵] اولین کسی بود که به این مساله اشاره کرد و یک میانیاب با شرایط سازگاری اصلاح شده ارائه کرد. موقع اعمال به منحنی-های مرزی مکعبی و اطلاعات مشتقی درجه سوم، این میانیاب یک پچ نسبتی را در اختیار می‌گذارد. ترجمه‌ای از این رویکرد به فرمی شبیه بزییر را اچ. چیوکورا[۱۳۶]و اف. کی مورا[۱۳۷] انجام دادند که سامانه *CAD/CAM* ژاپنی *DESIGNBASE* شد.

پچ‌های مستطیلی، نگاشتی از یک دامنهٔ مستطیلی به سه‌بعدی هستند. بعنوان یک حالت خاص می‌شود دامنه را به سطح پارامتری دوبعدی نگاشت که به اعوجاج مستطیل دامنه منجر می‌شود. اگر یک منحنی را در این مستطیل قرار دهیم، یک منحنی تغییرشکل یافته بدست خواهد آمد. یک سطح سه بعدی را می‌توان داخل یک مکعب سه بعدی قرار داد. این مکعب را می‌توان با استفاده از چند جمله‌ای‌های سه متغیره معوج کرد که به ایجاد سطح تغییرشکل یافته منجر می‌شود. این چنین تغییر شکل‌هایی در صورت تمایل به تغییرشکل کلی سطح مفیدند درحالیکه توصیف آنها برحسب حرکت نقاط کنترل خیلی سخت می‌شود. ظاهراً اولین فردی که به این تغییر شکل‌های حجمی اشاره کرده فرگوسن بوده است. ولی کاربردی ارائه نداده است. اولین کاربرد عملی توسط بزییر بوده است که چگونگی استفاده از تغییر شکل‌های حجمی در طراحی خودرو را شرح داده است.

(حداقل) دو روش برای توصیف چندجمله‌ای دو متغیره وجود دارد. اولی بصورت یک ضرب تنسوری با استفاده از دامنهٔ مستطیلی و دومی نوشتن آن برحسب مختصات باری‌سنتریک نسبت به یک دامنهٔ مثلثی. درحالیکه سطوح حاصل‌ضرب تنسوری خیلی بیشتر به چشم می‌خورند، مثلثی‌ها هم برای مدت مدیدی کاربرد داشته‌اند. اولین کاربرد این نوع سطوح به روش اجزای محدود برمی‌گردد که به آنها المان گفته می‌شود. پچ‌های مثلثی به فرم برنشتاین (معروف به مثلث‌های بزییر، گرچه بزییر هرگز اشاره‌ای به آنها

---

[132] *Zero twists*
[133] *F-patches*
[134] *Bilinearly blended coons patch*
[135] *J-Gregory*
[136] *H.Chiyokura*
[137] *F.Kimura*

نکرده است) به همت کاستلژو بودند. مثلث‌های بزییر، که ابتدا توسط یک محقق خودروسازی درک شدند راهشان را در دههٔ هشتاد در تئوری تقریب پیدا کردند. فضاهای چندجمله‌ای‌های تکه‌ای روی مثلث‌بندی توسط ال. شوماخر[۱۳۸] و ای. فلد[۱۳۹] مطالعه شدند. پچ‌های مثلثی شبیه کونز در آمریکا در دهه‌های هفتاد و هشتاد مورد مطالعه قرار گرفتند.

۱-۱۶ سطوح زیربخشی[۱۴۰]

در۱۹۷۴در کنفرانس *CAGD* در دانشگاه یوتا یکی از سخنرانان، گرافیستی به نام جی. چایکین[۱۴۱] بود. وی روشی برای تولید منحنی ارائه کرد که با روش‌های دیگر ارائه شده در کنفرانس هم قالب نبود. با شروع از یک کثیرالاضلاع دوبعدی بسته و با استفاده از یک فرآیند «شکستن پیوستهٔ گوشه‌ها»، به منحنی حدی همواری دست می‌یافت. دراین کنفرانس، ریزنفلد و سابین[۱۴۲] استدلال کردند که چایکین یک روش تعاملی تولید منحنی‌های‌بی‌اسپلاین درجهٔ دوم را ابداع کرده است. بور در۱۹۸۷ کشف کرد که تعمیم «برش گوشه» الگوریتم چایکین نیز منحنی‌های پیوسته‌ای را تولید می‌کند. وی همچنین اشاره کرد که الگوریتم چایکین حالت خاصی از یک کلاس از الگوریتم‌های توصیف شده توسط جی. رام[۱۴۳] (۱۹۴۷و ۱۹۵۶)می-باشد. الگوریتم چایکین نقطهٔ شروعی برای کار مقدماتی روح سطوح زیربخشی(۱۹۷۸) بود. الگوریتم چایکین را بطور سرراستی می‌توان به سطوح حاصلضرب تنسوری تعمیم داد. این نوع سطوح یک مش کنترل مستقیم الخط دارند و بعد از تحلیل الگوریتم حاصلضرب تنسوری، دوو[۱۴۴] و سابین آن را طوری فرمول‌بندی مجدد کردند که بتواند برای مش‌های کنترلی با توپولوژی دلخواه نیز بکار برود.

کاتمول[۱۴۵] و کلارک[۱۴۶] ابتدا الگوریتم چایکین را به منحنی‌های بی‌اسپلاین مکعبی یکنواخت نظیر حاصل-ضرب تنسوریش تعمیم دادند. سپس آن را برای حالت مش‌های کنترلی با توپولوژی اختیاری فرمول‌بندی مجدد کردند. هر دوی طرح‌های سطحی، سطوح هموار (G^1) در اختیار می‌گذاشتند. سطوح دوو/سابین رنگ و بوی دو مجذوری تکه‌ای و سطوح کاتمول/کلارک رنگ و بوی دو مکعبی تکه‌ای دارند.

در۱۹۸۷ سی. لوپ[۱۴۷] سطح اسپلاینی مثلثی را به نوعی سطح زیربخشی G^1 تعمیم داد. چند ضلعی کنترل ورودی می‌توانست هر مش مثلثی باشد. الگوریتم لوپ براساس طرح زیربخشی معروف به اسپلاین‌های جعبه‌ای[۱۴۸] ارائه شده توسط بوئم و اچ . پروزیچ[۱۴۹] است.

---

138 *L. Schomaker*
139 *A.feld*
140 *Subdivision Surfaces*
141 *G.Chaikin*
142 *M. Sabin*
143 *G. Rham*
144 *Doo*
145 *Catmull*
146 *Clark*
147 *C.loop*
148 *Box-Splines*
149 *H.Prautzsch*

هرسه الگوریتم فوق‌الذکر سطوح C^1 (برای دوو/سابین و لوپ) یا C^2 (برای کاتمول/کلارک و لوپ) تولید می‌کنند. اگر مش‌های کنترلی منظم[۱۵۰]باشند. در غیراینصورت سطوح، نقاط تکینه خواهند داشت. نقاط تکینه تحلیل و کاربرد عملی سطوح زیربخشی را مختل می‌کنند. اولین تلاش برای بررسی این نقاط توسط دی. استوری[۱۵۱] و ای. بال[۱۵۲] در۱۹۸۶صورت گرفت. اگرچه تحلیل مقدار ویژه از فرآیند دوو/سابین در مقاله اصلی وجود دارد. متعاقباً سطوح زیربخشی محبوبیت بیشتری بخصوص در صنعت انیمیشن رایانه‌ای بدست آوردند. کار اولیه روی سطوح زیربخشی بر سطوح تقریبی متمرکز بود. در۱۹۸۷ ان. دین[۱۵۳]، جی. گرگوری[۱۵۴] و دی. لوین[۱۵۵] یک طرح زیربخشی میانیاب بنام طرح منحنی چهار نقطه‌ای کشف کردند. در۱۹۹۰ این روش برای سطوح توسط همین نویسندگان تعمیم داده شده که به الگوریتم باتر فلای[۱۵۶] معروف شد.

۱-۱۷ شکل

وقتی طراح، یک منحنی از نقشه به مقیاس کامل را مطالعه می‌کند ممکن است بتواند بطور چشمی عیوب شکلی مثل

«نقاط تخت[۱۵۷]»، خمیدگی ناخواسته و غیره را تشخیص بدهد. یک سیستم *CAD* خوب باید بتواند روش-هایی برای ارتقای شکل داده شده فراهم کند. همچنانکه فرآیند طراحی از تختهٔ رسم به سمت صفحهٔ نمایش پیش می‌رفت دیگر این بازرسی چشمی مقدور نبود چون دیگر از نقشهٔ دارای مقیاس کامل خبری نبود. نمایش کوچک روی نمایشگر اجازهٔ شناسایی نواقص شکلی را بطور مستقیم نمی‌داد؛ بنابراین باید برای ارزیابی شکل، روش‌های رایانه‌ای تدوین می‌شدند. اولین روش به چاپ رسیده (۱۹۶۶)، هدوگراف-های[۱۵۸]منحنی و یا منحنی‌های مشتق اول آن هستند. نواقص در هدوگراف بصورت بزرگنمایی شده ظاهر می‌شوند. هدوگراف‌ها به تنهایی هندسه منحنی را نشان نمی‌دهند. همچنین به نحوهٔ پارامتری کردن بستگی دارند. ابزار هندسی‌تر، پلات انحنا است که انحنای منحنی را نشان می‌دهد. همچنین ازآنجائیکه مستلزم مشتقات مرتبهٔ اول و دوم می‌باشد ابزار حساس‌تری است. یک مقاله قدیمی در مورد کاربرد پلات‌های انحنا مقاله ناتبورن[۱۵۹] و همکارانش(۱۹۷۲) است.

در یک کار غیرچاپی، اچ. بورچارت[۱۶۰] در جنرال موتورز از پلات‌های انحنا استفاده کرد. پس از اینکه بور این کمپانی را در ۱۹۶۴ ترک کرد منحنی‌های اسپلاینی میانیاب مکعبی و درجهٔ پنجم ابزار انتخاب شده

---

[150] *Regular*
[151] *D.storry*
[152] *A.Ball*
[153] *N.Dyn*
[154] *J.Gregary*
[155] *D.levin*
[156] *Butterfly*
[157] *Flat spots*
[158] *Hodograph*
[159] *Natbourne*
[160] *H.Burchardt*

بودند. بدلیل پیوستگی آنها، پیوستگی انحنا هم داشتند. با این‌حال این امر زیبایی شکل را گارانتی نمی‌کرد و به این خاطر بورچارت یک طرح اختصاصی برای بهینه‌سازی شکل تدوین کرد(۱۹۹۴). از آن به بعد بهینه‌سازی شکل جز مهمی در *CAGD* شد.

چون معروف بود که منحنی‌های میانیاب اسپلاینی، نوسان‌های ناخواسته‌ای نشان می‌دهند جایگزین‌های دیگری مورد مطالعه قرار گرفتند. یک رویکرد، گرفتن منحنی یا سطح موجود و بازرسی شکل آن بود. اگر معیوب بود پروسه صافکاری[۱۶۱] اعمال می‌شد. هدف این روش‌ها حذف نویزها از نقاط داده‌ای یا چند ضلعی کنترل است.

منحنی‌ای که دارای پیوستگی انحناست ممکن است دوبار مشتق‌پذیر نباشد. این واقعیت در صورت بهره برداری صحیح، منجر به تولید طرح‌هایی از منحنی می‌شود که درجات آزادی بیشتری از منحنی‌های اسپلاینی استاندارد دارند. درجات آزادی اضافه بعنوان پارامترهای شکل محسوب می‌شوند و منحنی‌های حاصل، پیوستهٔ هندسی یا G^2 نامیده می‌شوند. کار اولیه روی این موضوع را جی. جیس[۱۶۲](۱۹۶۲) انجام داد. طرح‌های میانیابی G^2 براساس پیوستگی بطور مستقل توسط جی. مانینگ[۱۶۳] (۱۹۷۴) و جی. نیلسون[۱۶۴] (۱۹۷۴) تدوین شدند. کارهای بعدی پیرامون این موضوع عبارتند از: بتا اسپلاین‌های بارسکی[۱۶۵] (۱۹۸۱)، گاما اسپلاین‌های بوئم[۱۶۶] (۱۹۸۶) و تاو اسپلاین‌های هاگن[۱۶۷] (۱۹۸۵).

برای منحنی‌ها، انحنا یک معیار قابلیت اعتماد شکل است. برای سطوح، چند نوع از این معیارها از جمله انحناهای گوسی و متوسط یا انحنای کل وجود دارند. فورست اولین کسی بود که گرافیک رایانه‌ای را برای بازرسی شکل سطح با استفاده از انحناها بعنوان نگاشت‌های بافتی[۱۶۸] استفاده کرد (۱۹۷۹). معیار مهم دیگر شکل سطوح از صنعت خودروسازی می‌آید. معمولا خودرو نمونه را در نمایشگاه در محیطی قرار می‌دهند که از سقف آن طبقات نور فلورسنت می‌تابد. قبل از پذیرش خودرو، بازتاب‌های نور از آن به دقت امتحان می‌شود. شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای قدیمی این فرآیند، گزارش شده‌اند.

۱-۱۸ از مدل‌سازی قاب سیمی و سطحی[۱۶۹] تا حجمی[۱۷۰]

همانطوریکه قبلا اشاره شد سامانه‌های *CAD* در دههٔ شصت سامانه‌های دوبعدی ساده‌ای برای طراحی مدارات چاپی و رقومی‌گری نقشه‌های مکانیکی بصورت نما به نما بودند. نمایش داخلی این سامانه‌ها که معمولا فهرست ساده‌ای از خطوط و کمان‌ها بودند برای برنامه‌های کاربردی‌ای مانند پلات نقشه و تهیه

---

[161] *Fairing*
[162] *G.Geise*
[163] *J.Manning*
[164] *G.Nielson*
[165] *B.Barkys β-spline*
[166] *W.Boehm's γ-splines*
[167] *Hagn's τ-splines*
[168] *Texture maps*
[169] *Wireframe modeling and surface modeling*
[170] *Solid modeling*

فوتوماسک‌های تولید مدارات و یا برای تولید کد*NC* نقطه به نقطه برای سوراخ‌کاری مورد استفاده قرار می‌گرفت. در دهۀ ۷۰ سامانه‌های دو بعدی به حالت سه بعدی با منحنی‌ها و سطوح فضایی تعمیم یافتند. این منحنی‌ها و سطوح را می‌توان بطور محاسباتی تصویرنمایی کرد تا نماهای ارتوگرافی، ایزومتری و پرسپکتیو به دست بیایند. اما سامانه‌های قاب سیمی سه‌بعدی هم چند نقص جدی داشتند. از جمله این نقایص می‌توان به ابهام این مدل‌ها، وجود اشیای بی‌معنی، فقدان خطوط پروفایلی لازم و اطالۀ کار مدل-سازی اشاره کرد[۵–۶]. این محدودیت‌ها بعلاوۀ تنگناهای دیگری مثل عدم امکان دریافت خواص جرمی یا مقاطع برشی مانع اتوماسیون فرآیند و محدود شدن حوزۀ سامانه‌های قاب سیمی شد. بعضی از عرضه کنندگان سامانه‌های*CAD* برای رفع این تنگناها به سمت افزودن تسهیلات سطوح مرزی به سامانه‌های خود رفتند بطوریکه تکنیک‌های نمایش مرزی[۱۷۱] *(B-rep)* در مدل‌سازی حجمی از اینجا نشات گرفت.

پروژۀ مدل‌سازی حجمی با شروع سه طرح مستقل در اوایل دهۀ ۱۹۶۰ کلید خورد. ال. جی. رُبرتس[۱۷۲] بدنبال حل مسایل آنالیز صحنه[۱۷۳] بود. در پروژۀ دیگر گوترمن[۱۷۴] درصدد تعریف احجام با استفاده از تئوری سنتی مجموعه‌ها و ترکیب نیم‌فضاهای نشان داده شده به فرمت *APT* بود. در *IBM* هم لو و کی-رولاک[۱۷۵] روی نمایش احجام به فرم محدودی از هندسۀ سازندۀ حجمی[۱۷۶]*(CSG)* کار می‌کردند. این پروژه‌ها فراتر از حد بضاعت گرافیک رایانه‌ای آن زمان بودند. لذا به نتیجه عملیاتی نرسیدند. اچ. لانگ[۱۷۷] که در سال ۱۹۶۰ از دانشگاه کمبریج فارغ التحصیل مهندسی شده بود ۱۹۶۳ در *MIT* ثبت نام کرد و بیش از ۱۸ ماه با دی. روس[۱۷۸]و کونز کار کرد. سپس به کمبریج بازگشت و با گروه *CAD* در تدوین نرم‌افزار مدل‌ساز حجمی روی یک سیستم *PDP-7* به زبان اسمبلی همکاری می‌کرد. لانگ می‌گوید: «متأسفانه هیچ-کس به ما نگفت که این کار غیرممکن است». تا اینکه با پیوستن آی. برید[۱۷۹] به این گروه در جریان رسالۀ دکترایش، با توجه خاص به ساختار داده‌ای و با استفاده از عملیات بولی[۱۸۰] و هندسۀ جامد ساده، موفق به ارائه *BUILD1* شدند.

اکثر سامانه‌های قاب‌سیمی فقط به هندسۀ تحلیلی ساده، تبدیلات هندسی[۱۸۱] و دانش نرم‌افزاری نیاز داشتند که به اندازۀ کافی موجود بود. سامانه‌های رندرینگ[۱۸۲] (طرح‌های کثیرالاضلاعی) علاوه براین پیشنیازها از الگوریتم‌های تجسم‌بخشی[۱۸۳]استفاده می‌کنند که جستجو و مرتب‌سازی[۱۸۴]را بطور کارآمد

---

[171] *Boundary representation*
[172] *L. J. Roberts*
[173] *Sene analysis*
[174] *Gutterman*
[175] *Luh and Krolak*
[176] *Constructive Solid Geometry*
[177] *H.Lang*
[178] *D.Ross*
[179] *I. Braid*
[180] *Boolean operations*
[181] *Geometrical transformations*
[182] *Rendering systemes*
[183] *Visualization*
[184] *Search and sorting*

انجام می‌دهند. مدل‌سازی سطحی سطوح تندیسی اساسا با میانیابی و تقریب سرکار داشته و ریشه‌های قوی‌ای در تئوری ریاضیاتی اسپلاین‌ها و تحلیل عددی دارند. اما مدل‌سازی حجمی در دههٔ ۶۰ با پشتوانهٔ نظری اندکی شروع شد. اینکه چگونه می‌توان یک حجم را با نمادها در رایانه نمایش داد؟ و یا حجم در اصطلاح ریاضی چیست؟ و نمایش[۱۸۵] یعنی چه و چه خواصی دارد؟ سوالات اساسی بودند. لذا موضوعات پژوهشی در دهه‌های شصت و هفتاد پیرامون مدل‌سازی حجمی عبارت بودند از:۱) نحوه نمایش یا مدل کردن یک حجم در رایانه؛ ۲) الگوریتم‌های بنیادین مورد نیاز؛ ۳) کاربردهای مدل‌سازی حجمی؛ ۴) معماری سامانه‌های مدل‌سازی حجمی؛ ۵) واحد ارتباط کاربری[۱۸۶] و ۶) تعیین دامنهٔ مساله.

نتایج پژوهش‌های دههٔ شصت و هفتاد نشان می‌داد که از نظر ریاضیاتی یک حجم باید دارای خواص صلبیت، یکپارچگی، محدود بودن، بسته بودن[۱۸۷] تحت عملیات منطقی، قابلیت توصیف محدود و معین بودن مرزی باشد. بهمین ترتیب خواص یک طرح نمایش ارائه شد. به عنوان مثال منظور از دامنه نمایش، احجامی است که می‌توان با آن نمایش داد. اعتبار نمایش این است که آیا یک طرح نمایش متناظر با چند(حداقل یک) حجم است؟ کامل بودن طرح یعنی اینکه آیا یک نمایش متناظر یک حجم منحصر بفرد است؟ و منحصر بفردی طرح یعنی اینکه هر حجمی تنها دارای یک نمایش باشد. در نیمهٔ دوم دههٔ شصت گزارش‌های ناچیزی در زمینهٔ مدل‌سازی حجمی وجود دارد. در مقابل مطالعات قابل ملاحظه‌ای روی سطوح تندیسی و رندرینگ گرافیک انجام گرفت. اواخر دههٔ شصت و اوایل هفتاد پروژه‌های جدیدی در زمینهٔ مدل‌سازی حجمی شکل گرفت. پروژه‌هایی مانند*Build-I* توسط ای. برید(۱۹۷۳) در دانشگاه کمبریج، *TIP-I* در دانشگاه هوکایدو(۱۹۷۳) و *Geomap* در دانشگاه توکیو، *Proren* در دانشگاه *Ruhr* آلمان، *Euclid* در فرانسه و سوئیس، *Synthavision* در اوایل ۱۹۷۰ در آمریکا و *Draper Lab's Shape System* از جملهٔ این موج جدید بودند. در فضای دانشگاهی آمریکا، گروه *Estman* در دانشگاه کارنگی– ملون، *Glide-I* را در اواسط دههٔ ۷۰ تولید کرد و از آن زمان بطور عمده جوانب مختلف پایگاه داده‌ای[۱۸۸] مدل‌سازی مورد توجه خاص قرارگرفت. بومگارت[۱۸۹] در استنفورد عملگرهای اولری و ساختار چند وجهی *Winged-edge* را برای *B-rep* معرفی کرد که تاثیر زیادی روی *Build-2*، نسخه‌های بعدی *Glide* و سامانه‌های مختلف دیگر گذاشت. پروژه اتوماسیون تولید نیز در دانشگاه روچستر در۱۹۷۲ پایه‌گذاری شد که در نهایت به سامانه-های *PADL-I* و *PADL-2* و غیرمستقیم *GMSolid* و سامانه‌های دیگر ختم شد. همهٔ این پروژه‌ها به اهمیت بالای عملیات منطقی رسیدند. با وجود این تحقیقات تا اواخر دههٔ ۱۹۷۰هیچ محصول قابل استفاده‌ای وجود نداشت و اواخر دههٔ ۸۰ مدل‌سازی حجمی جنبه تجاری پیدا کرد. نرم‌افزار*MAGI's Synthavision* را اولین محصول تجاری می‌دانند و به واسطهٔ استفاده از آن در ساخت فیلم پویانمایی *TRON* در۱۹۸۲توسط والت دیزنی معروف شد.

---

[185] *Representation*
[186] *User interface*
[187] *Rigidity, Solidity, Finiteness, Closuer*
[188] *Data base*
[189] *Baumgart*

تا سال۱۹۸۲ فقط از سه طرح *B-rep*، *CSG* و جاروبی[۱۹۰] استفاده می‌شد. ایدهٔ روش *CSG* از اینجا بود که خیلی از قطعات صنعتی از ترکیب احجام پایه مانند مکعب، استوانه، کره و مخروط شکل می‌گیرند. عملیاتی مانند چسباندن یا سوراخ‌کاری هم از طریق عملگرهای منطقی مانند اجتماع، اشتراک یا تفاضل قابل انجام بود. دستهٔ دیگری از محصولات حجیم نیز با جاروب یک سطح در امتداد یک منحنی مستقیم یا منحنی شکل می‌گیرند که این خواستگاه طرح سوم یعنی روش جاروبی است. بعضی از سامانه‌ها از طرح نمایش ترکیبی *B-rep* و *CSG* استفاده می‌کنند. تا نیمهٔ دههٔ نود که تقریبا اکثر برنامه‌ها به قابلیت‌های مدل‌سازی حجمی مجهز شده بودند از طرح‌های دیگری مانند تجزیهٔ سلولی[۱۹۱]، تمثیل اولیه[۱۹۲]، شمارش اشغال فضایی[۱۹۳]و کدگذاری هشت‌تایی[۱۹۴] استفاده شده بود ولی طرح‌های غالب همان سه روش اول هستند.

شکل۱-۱۱ تصویر چند تن از پیشگامان *CAGD*

[190] *Sweeping*
[191] *Cell decomposition*
[192] *Primitive instancing*
[193] *Spatial occupancy enumeration*
[194] *Octree Coding*

۱-۱۹ انواع سامانه‌های *CAD/CAM*

از نظر نوع رایانهٔ میزبان سامانه‌های *CAD/CAM* به سه نوع تقسیم می‌شوند:

۱-۱۹-۱ سامانه‌های کلان رایانه‌ای *(Mainframe-based systems)*

یکی از مشخصه‌های بارز این نوع میزبان‌ها، علاوه بر سرعت، دقت و حافظهٔ بالا، قابلیت اتصال تعداد زیادی کاربر به آن است. قیمت این رایانه‌ها نیز بسیار بالاست.

۱-۱۹-۲ سامانه‌های خُرد رایانه‌ای *(Minicomputer-based systems)*

سامانه‌های خُردرایانه‌ای شبیه کلان رایانه‌ای‌هاست با این تفاوت که رایانه‌اشان کوچک‌تر و ضعیف‌تر است. تعداد کاربران در شبکه با آن نیز کمتر است. خُردرایانه‌های دههٔ هفتاد از نوع شانزده بیتی، کُند و دارای محدودیت حافظه بودند مثل *DEC (Digital Equipment Corporation)* سری *PDP*. در اواخر دههٔ هفتاد خُردرایانه‌های بسیار قوی مثل *VAX II/780* بصورت سی و دو بیتی به بازار آمدند.

۱-۱۹-۳ سامانه‌های ریزرایانه‌ای *(Microcomputer-based systems)*

اکثر خبرگان صنعتی موافق قاعدهٔ ۸۰/۲۰ هستند؛ یعنی معتقدند رایانه‌های شخصی*CAD* هشتاد درصد عملکرد نمونه کلان‌رایانه را با بیست درصد هزینه آن در اختیار می‌گذارند. با گذشت زمان این نسبت تغییر می‌کند زیرا سخت افزارها ارزانتر می‌شوند. ویژگی‌های عمومی این سامانه‌ها عبارتند از:

- قابلیت مدل‌سازی و نقشه‌کشی؛
- راحتی استفاده؛
- انعطاف پذیری سامانه برای نرم افزارها و سخت افزارهای مختلف؛
- استانداردهای متنوع و مدولاریتی؛
- نگهداری مختصر و ارزان.

موقع استفاده از این سامانه‌ها باید نکات زیر را مد نظر داشت:

- کاربر سامانه باید پشتیبانی مدیریت را داشته باشد. مدیر باید به توانایی‌ها و محدودیت‌های سامانه آشنا باشد؛
- سخت افزار و نرم افزار به روز رسانی پیوسته می‌طلبند؛
- دوره‌های آموزشی کوتاه مدت ضرورند؛
- حضور یک سرکاربر وارد در جمع کاربران که نقش هماهنگ کننده و هادی داشته باشد الزامی است.

۱-۲۰ *Turnkey vendor*

معنی‌این اصطلاح را می‌توان در قالب یک مثال توضیح داد: مثلا هرگاه کارفرما بخواهد یک نیروگاه بسازد به تجهیزات مختلفی از جمله لوله‌کشی‌ها، ماشین‌آلات، مواد شیمیایی و تجهیزات اطفای حریق و غیره نیاز خواهد داشت. پیمانکار اصلی، بخشی از این تجهیزات یا فناوری را خود و مابقی را از طریق پیمانکاران فرعی تامین می‌کند. به این نوع پیمانکار می‌توان لقب *turnkey supplier* نسبت داد. *Turnkey* را بصورت *turn-key* هم می‌نویسند.

در دهۀ هفتاد و اوائل دهۀ هشتاد، اکثر سامانه‌های *CAD/CAM*، روی مینی کامپیوترهای کلمه‌ای شانزده بیتی کار می‌کردند. فروشنده‌هایی *(Turnkey vendors)* بودند که نرم افزارشان روی سخت افزارهای اختصاصی خودشان کار می‌کرد. به این ترتیب کاربران آنها با مشکلات مربوط به سامانه‌های عامل غیراستاندارد مواجه بودند که منجر به ایزوله شدن آنها می‌شد.

به سامانه‌ای *Bundled system* گفته می‌شود که در آن سخت افزار و نرم افزار بصورت سرهم فروخته شده و توسط یک فروشنده انحصاری نگهداری شود. در دهۀ هفتاد و اوائل دهۀ هشتاد این نوع سامانه‌ها رایج بودند. به این نوع سامانه‌ها *turnkey systems* هم گفته‌اند. به تدریج برای افزایش دقت و صحت محاسبات لازم برای روش المان محدود و یا مبحث مدل‌سازی حجمی، سامانه‌های *CAD/CAM* به سمت خُرد رایانه-های سی و دو بیتی رفتند. این سامانه‌ها *unbundled* بودند.

معماری باز سخت‌افزاری *(Open hardware architecture)* یعنی اینکه عرضه کنندۀ سامانه در کنار نرم افزار و سخت افزار خود از سخت افزارهای موجود در بازار هم در ایستگاه کاری‌اش استفاده کند؛ بطوریکه این سامانه مشکل شبکه سازی و سازگاری با سایر سخت افزارها و نرم افزارها را نداشته باشد. با این امکانات قابلیت اجرای نرم افزارهای ثالث *(third party softwares)* را هم خواهد داشت.

۱-۲۱ مدیر سامانه‌های *CAD/CAM*

وظائف مدیر سامانه عبارتند از:

۱) عملیات روزانه نگهداری سامانه: تدوین طرح شروع بکار *(sign-up)* کاربران به شبکه بدلیل کمبود یا محدودیت پایانه‌ها، گزارش مشکلات سخت‌افزاری و نقائص نرم‌افزاری به فروشنده، پاسخگویی به کاربران، ثبت رکورد مربوط به استفاده از سامانه، وضع روال تهیه پشتیبان‌ها و نسخه‌های پشتیبان *(backup)* ، نصب آخرین نسخۀ نرم‌افزارها بدون وقفه در کارها، تعیین سامانه نام‌گذاری پروژه‌ها؛

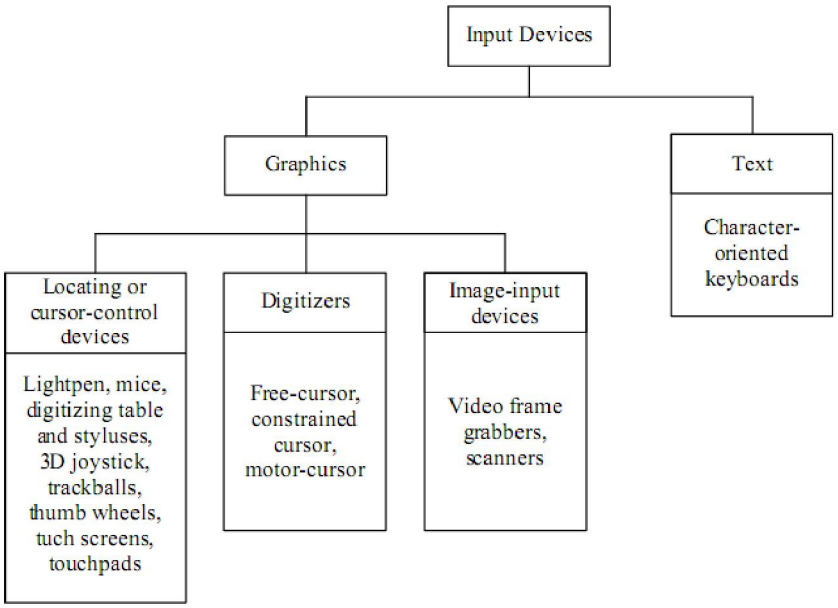
۲) ترتیب دادن دوره‌های آموزشی کوتاه مدت برای کاربران؛

۳) آگاهی دادن نسبت به آخرین سمت و سوهای سخت افزاری و نرم افزاری با شرکت در دوره‌ها و همایش‌های برگزارشده توسط فروشندگان، نمایشگاه‌ها و کنفرانس‌ها.

۱-۲۲ وسایل ورودی/خروجی *(I/O devices)*

ارتباط کاربر با سامانه از طریق وسایل ورودی/خروجی صورت می‌گیرد. کاربر اطلاعات، داده‌ها و دستورات خود را توسط وسایل ورودی به سامانه وارد می‌نماید و حاصل پردازش رایانه‌ای را توسط وسایل خروجی دریافت و ملاحظه می‌کند. در شکل‌های۱-۱۲و۱-۱۳فهرست بعضی از این وسایل آمده است.

وسایل ورودی و خروجی برای برقراری ارتباط با سامانه به یک نرم‌افزار راه‌انداز نیاز دارند. درگذشته این نرم‌افزارها برای هر وسیله، مخصوص همان وسیله نوشته می‌شد. بعدها استانداردهای گرافیکی مانند *GKS*وضع شدند تا راه‌اندازها را از وسایل آنها مستقل کنند. به راه‌انداز وسیله ورودی اصطلاحا « *Device handler*» و به راه‌انداز وسیله خروجی«*Device driver*» می‌گویند.



شکل ۱-۱۲ فهرست بعضی از وسایل ورودی رایج *CAD/CAM*.

از استانداردهای گرافیکی برای ایجاد قابلیت تبادل داده‌های گرافیکی و متنی بین سامانه‌های مختلف *CAD/CAM* و همچنین استقلال نرم افزار از سخت افزار استفاده می‌شود. اگر نرم افزار برای اجرا روی یک سخت افزار خاص طراحی شده باشد نمی‌توان آن را از سخت افزار مذکور به سخت افزار دیگر منتقل کرد. همینطور داده‌های عکسی و متنی را باید بتوان براحتی روی هر وسیله استاندارد خروجی ملاحظه نمود. تبادل داده‌های انباره داده‌ها با سایر نرم افزارها نیز باید براحتی امکان‌پذیر باشد. تدوین استانداردهای گرافیکی از ۱۹۷۴ با استاندارد *GSPC* شروع شد. از جملهٔ این استانداردها می‌توان به استانداردهای *GKS*، *VDI*، *PHIGS*، *VDM*، *IGES*، *NAPLPS*، *STEP*، *SLA* و *DXF* اشاره کرد.

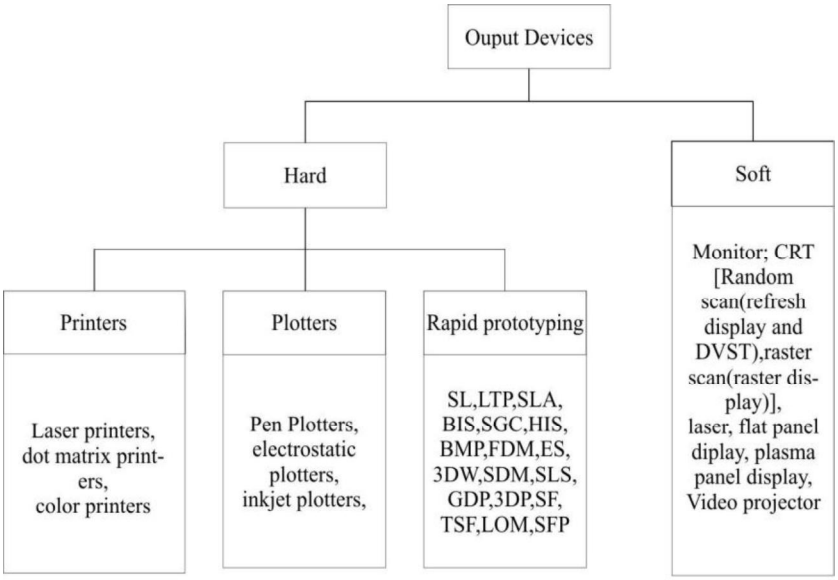
۱-۲۳ انواع کاربران

کاربران نرم افزار *CAD/CAM* را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

الف) اپراتورها که اکثریت کاربران را تشکیل می‌دهند؛

ب) برنامه نویسان برنامه‌های کاربردی که وظیفه‌اشان نوشتن برنامه‌های جدید و اتصال آنها به نرم افزار اصلی است و حق دسترسی و تغییر کدهای اصلی را ندارند؛

ج) برنامه‌نویسان سامانه‌ای که اجازهٔ تغییر کدهای اصلی برنامه را دارند. در واقع این دسته از کاربران از تدوین‌کنندگان نرم‌افزار خودشان هستند. اینها با سازمان داخلی نرم‌افزار، ساختار و سامانه مدیریت انبارهٔ داده‌های آن آشنا هستند. همچنین می‌دانند که چطور ارتباط کاربری را اصلاح کنند و دارای زمینه-هایی از حیطهٔ گرافیک رایانه‌ای، آنالیز مهندسی و علوم رایانه‌ای هستند.



شکل۱-۱۳فهرست بعضی از وسایل خروجی رایج *CAD/CAM*.

۱-۲٤ انبارهٔ داده‌ها *(Database)*

بطور عامیانه، انبارهٔ داده‌ها را «فایل» یا «مجموعه‌ای از فایل‌ها» تعبیر می‌کنند؛ اما بطور رسمی، انبارهٔ داده‌ها به مجموعهٔ سازمان یافته‌ای از داده‌های گرافیکی و غیرگرافیکی گفته می‌شود که در حافظهٔ ثانویهٔ رایانه ذخیره می‌شوند. هدف از ایجاد انبارهٔ داده‌ها جمع آوری و نگهداری داده‌ها و اطلاعات در یک جای متمرکز است؛ بطوریکه دسترسی به آنها برای عملیات مختلف و تصمیم‌گیری راحت باشد. از مزایای یک انبار داده‌ای متمرکز عبارتند از:

الف) حذف داده‌های اضافی؛

ب) تاکید بر استانداردهای ملی و بین‌المللی؛

ج) اعمال محدودیت‌های امنیتی؛

د) حفظ سلامت انباره با جلوگیری از ورود داده‌های ناسازگار با فرمت انباره داده‌ها؛

ه) ایجاد توازن بین داده‌های مغایر یا ناسازگار مثل داده‌های طراحی با داده‌های ساختی.

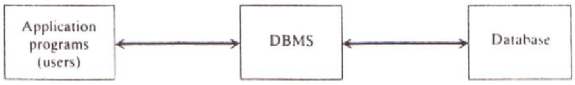
انواع مدل‌های انباره داده‌ها عبارتند از:

۱) انبارهٔ داده‌های نسبی (شکل۱-۱۴)؛

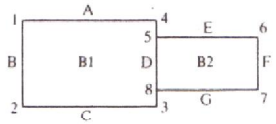
۲) انبارهٔ سلسله مراتبی (شکل۱-۱۵)؛

۳) انبارهٔ شبکه‌ای؛

۴) انبارهٔ شی‌گرا.



شکل۱-۱۴ *DBMS* ساده شده.



(*a*) Object

Point	x	y
1	x_1	y_1
2	x_2	y_2
3	x_3	y_3
4	x_4	y_4
5	x_5	y_5
6	x_6	y_6
7	x_7	y_7
8	x_8	y_8

Relation POINT

Line	Start point	End point
A	1	4
B	1	2
C	2	3
D	3	4
E	5	6
F	6	7
G	7	8

Relation LINE/CURVE

Surface	Line/ curve	Type
1	A	Line
	B	Line
	C	Line
	D	Line
2	E	Line
	F	Line
	G	Line
	D	Line

Relation SURFACE

شکل۱-۱۵مونه‌ای از انباره داده‌های نسبی.

انتظارات عملکردی از انبارهٔ داده‌های *CAD/CAM*:

۱) پشتیبانی از کاربردهای متعدد مهندسی؛

۲) امکان اصلاح و گسترش پویا؛

۳) پشتیبانی از ماهیت تکراری طراحی؛

۴) رعایت ملاحظات مربوط به نسخه‌های مختلف و سطوح متفاوت از جزئیات؛

۵) امکان دسترسی کاربران متعدد و همزمان؛

۶) پشتیبانی موقت انباره داده‌ها؛

۷) دسترسی آسان.

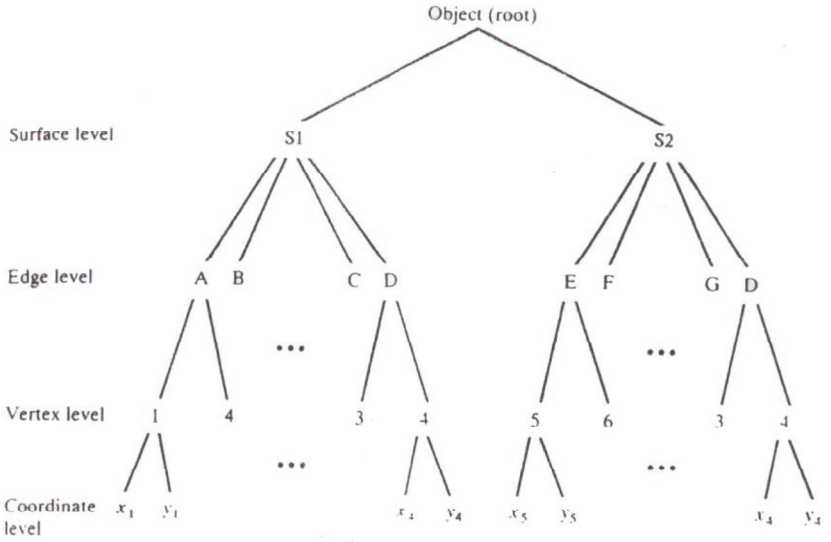
چهار مشخصهٔ بارز یک انباره داده‌ای نرم افزار *CAD/CAM* عبارتند از:

۱) *Fully three dimensionality*: کاملا سه بعدی است؛

۲) *Associativity*: قابلیت بازیابی ورودی‌ها به فرم‌های مختلف. مثلا با ارائهٔ دو نقطهٔ انتهایی یک خط می‌توان طولش را گرفت؛

۳) *Centralized*: اگر تغییری در مدل در یک نما ایجاد شود در نماهای دیگر بطور اتوماتیک اعمال خواهد گردید؛

۴) *Integrated*: یک مدل هندسی از جسم را می‌توان در فازهای مختلف سیکل طراحی و تولید آن استفاده نمود.



شکل۱-۱۶ نمونه‌ای از انباره داده‌های سلسله مراتبی شکل ۱-۱۵

۱-۲۵ سامانه مدیریت انباره داده‌ها

سامانه مدیریت انبارهٔ داده‌ها (*DBMS*)، نرم‌افزاری است که امکان دسترسی برای اصلاح و استفاده از داده‌های ذخیره شده در یک انبارهٔ داده‌ای را فراهم می‌کند(شکل۱-۱۶). *DBMS* مسئولیت کلیه فعالیت‌های مربوط به انباره داده‌ها مثل ایجاد فایل‌ها، پایش کاربران غیرقانونی و یا دسترسی همزمان کاربران را برعهده دارد. با توجه به حجم داده‌ها و تنوع متنی-گرافیکی آنها *DBMS*های معمولی مطلوب نیستند بلکه انباره داده‌های شی‌گرا و *DBMS*های مربوطه برای سامانه‌های *CAD/CAM* مناسبند.

۱-۲۶ مدل‌سازی هندسی

مدل‌سازی هندسی برای*CAD/CAM* دارای اهمیتی همچون اهمیت معادلات تعادل حاکم بر حوزه‌های مهندسی کلاسیک مثل مکانیک است. از جمله دلایل نیاز به مطالعه مبانی ریاضیاتی مدل‌سازی هندسی عبارتند از:

۱) آشنایی و فهم خوب واژه‌های مربوط به حوزه *CAD/CAM* و مستندات آن؛

۲) دادن قدرت تصمیم‌گیری هوشمند به کاربر در مورد نوع اشیای مناسب برای استفاده در مدل بطوری که الزامات هندسی خاص مثل شیب یا انحنا را ارضا کنند؛

۳) دادن قدرت تفسیر هرگونه نتایج غیرمنتظره موقع کار با سامانه؛

۴) ارائهٔ معیارهای ارزیابی بهتر موقع تصمیم‌گیری و ارزیابی سامانه‌های *CAD/CAM*؛

۵) آشنایی طراحان و مهندسین با توانائیها و محدودیت‌های هر یک از مدل‌سازی‌ها ضمن مطالعه مدل-های هندسی موجود.

۱-۲۶-۱ مدل‌سازی قاب سیمی *(Wireframe modeling= stick figure = edge representation)*

واژهٔ قاب سیمی از اینجا گرفته شده است که می‌توان این نوع مدل را بصورت سیمی فرض کرد که در امتداد لبه‌های (یال‌های) جسم خم شده است. بطور نمونه یک مدل قاب سیمی از یکسری نقاط، خطوط، کانالها و دوایر، مقاطع مخروطی و منحنی‌ها تشکیل می‌شود.

در ابتدا کاربر باید هندسهٔ مورد نظرش را در نماهای مختلف بطور مجزا از هم رسم می‌کرد زیرا انبارهٔ داده‌های منتجه، متمرکز(*centralize*) و بهم مرتبط(*associative*) نبود. در دهه۷۰ مفهوم انبارهٔ متمرکز مرتبط(*associative database centralized*) امکان مدل‌سازی اشیای سه بعدی را به صورت قاب سیمی فراهم کرد؛ بطوریکه بتوان آنها را تحت تبدیلات سه بعدی قرار داد.

ورود مختصات به نرم افزار می‌تواند صریح یا ضمنی انجام شود: ورود صریح، یعنی وارد کردن مختصات کارتزینی، استوانه‌ای یا کروی نقاط به صورت مطلق یا نسبی. ورود ضمنی، مثل وارد کردن مختصات از طریق رقومی‌گری با *CMM* ،دیجیتایزر یا اسکنر و همچنین ورود مختصات با استفاده از *geometric modifiers* است.

مزایای مدل‌سازی قاب سیمی عبارتند از:

۱) سادگی ایجاد؛
۲) عدم نیاز به ظرفیت حافظه بالا؛
۳) زمان مدل‌سازی، بازیابی و اصلاح کم: اگر مدل پیچیده و یا سه بعدی باشد زمان و پیچیدگی به طور تصاعدی بالا می‌رود؛
۴) آموزش سریع؛
۵) سادگی واژه‌های بکار رفته در مدل‌سازی بر خلاف مدل‌سازی‌های سطحی و حجمی؛
۶) مدل‌سازی قاب سیمی پایه‌ای برای مدل‌سازی‌های سطحی و حجمی است.

معایب مدل‌های قاب سیمی عبارتند از:

۱) ابهام این نوع مدل‌ها(مثل تفاسیر مختلف در مورد شکل مکعب): راه حل، حذف خطوط ندید و یا خط-چین کردن آنهاست. رفع ابهام فوق بصورت دستی بسیار مشکل و مستعد خطا و وقت‌گیر است. البته الگوریتم‌های اتوماتیک هم وجود دارند؛
۲) نمایش تقاطع سطوح مسطح با استوانه‌ها، استوانه‌ها با استوانه‌ها و سطوح مماس بطورکلی در قاب سیمی مشکل است(شکل۱-۱۷)؛
۳) مدل‌سازی قاب سیمی در حالت مدل‌های حجیم، طولانی و پر زحمت است. مثلا مدل‌سازی مکعب در قاب سیمی با مدل‌سازی حجمی کاملا متمایز است. در قاب سیمی علاوه بر اطلاعات هندسی به ورود داده‌های توپولوژی هم نیاز است در حالیکه در مدل‌سازی حجمی فقط به داده‌های هندسی نیاز داریم.

کاربرد محدودی برای مدل‌های قاب سیمی وجود دارد. اگر حجم دو و نیم بعدی نباشد، امکان استفاده از این نوع مدل برای محاسبات حجمی و جرمی، تولید مسیر ابزار *NC*، برش و شناسایی تداخل وجود ندارد.

۱-۲۶-۲ مدل‌سازی سطحی *(Surface modeling)*

مدل‌های سطحی علاوه بر رئوس و یال‌های جسم، سطح آن را نیز معرفی می‌کنند.

۱-۲۶-۳ مدل‌سازی حجمی *(Solid modeling)*

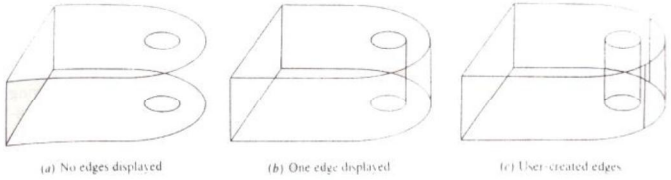
مدل‌های حجمی علاوه بر رئوس، یال‌ها و سطوح، حجم جسم را نیز می‌شناسند و لذا کامل‌ترین مدل‌ها هستند. مزایای مدل‌های حجمی عبارتند از:

الف) مدل‌های حجمی شکل قطعه را بطور کامل تعریف می‌کنند و به اصطلاح این مدل‌ها « کامل» *(Complete)* هستند. همچنین اساس این مدل‌ها بگونه‌ای طرح شده که قابلیت تفکیک نقاط در فضا به سه ناحیهٔ داخل، روی و خارج جسم را دارند. به این خصوصیات مدل‌های حجمی «وضوح» *(Unambiguity)* گفته می‌شود. مدل‌های دارای کمال و وضوح از دیدگاه تکنیک مدل‌سازی حجمی «معتبر» *(Valid)* هستند . کمال و وضوح یک مدل حجمی به اطلاعات ذخیره شده در انبارهٔداده‌های آن مربوط می‌شود. این اطلاعات به دو دسته تقسیم می‌شوند: اطلاعات «هندسی»*(Geometric)* و اطلاعات «توپولوژی»*(Topology)*؛ اطلاعات هندسی، اندازه‌های خطی و زاویه‌ای جسم و توپولوژی، نحوهٔ اتصال و ارتباط اجزای آن را بیان می‌کنند. هندسه برای کاربر، قابل مشاهده و توپولوژی از نظر وی مخفی است. در شکل۱-۱۷اختلاف هندسه و توپولوژی نشان داده شده است.

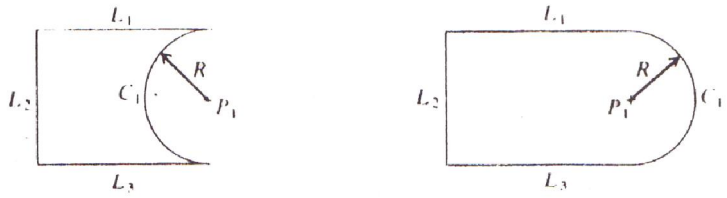
ب) مدل‌سازی حجمی در به تصویرکشیدن هرچه واقعی‌تر مدل‌ها بسیار موفق عمل کرده است. قابلیت‌های سایه‌زنی *(shading)* [*Ray tracing ,Ray casting*],*(translucency)*و ... تجسم بخشی *(visualization)* بهتر جسم را برای کاربران ممکن می‌سازد. از طرف دیگر این انعطاف‌پذیری را هم دارد که سطوح مش‌بندی، بصورت سیمی *(Wire display)* نمایش داده شوند. در مدل‌های قاب سیمی تنها حذف خطوط و سطوح ندید امکان‌پذیر بوده و اجسام بصورت سیمی نمایش داده می‌شوند.

ج) در خیلی از موارد تعریف و ایجاد یک جسم با مدل حجمی ساده‌ترین روش است. همچنین می‌توان به این روش فصل مشترک اجسام متقاطع را بدست آورد. حال آنکه این کار در روش‌های دیگر مشکل و گاهی غیرممکن است. مثلاً برای پیدا کردن فصل مشترک دو استوانهٔ متقاطع در مدل‌سازی قاب سیمی باید ابتدا نقاط واقع بر منحنی فصل مشترک ارزیابی شده و سپس بوسیله یک منحنی *B-Spline* بهم وصل شوند.

د)مدل‌های حجمی اطلاعات مربوط به حجم جسم از جمله حجم، جرم و مرکز ثقل مدل را در صورت نیاز در اختیار قرار می‌دهند. این اطلاعات داده‌های اولیه مورد نیاز الگوریتم‌های کاربردی هستند. روش‌های مدل‌سازی قاب سیمی و سطحی حجم جسم را نمی‌شناسند و اطلاعات حجمی جسم را نمی‌دهند.



شکل۱-۱۷ نمایش سوراخ‌ها و لبه‌های منحنی در مدل‌های قاب سیمی.



(a) Same geometry but different topology

(b) Same topology but different geometry

شکل۱-۱۷ هندسه و توپولوژی.

از جمله محدودیت‌های مدل‌سازی حجمی، کُندتر بودن آن نسبت به مدل‌سازی قاب سیمی و سطحی و همچنین لزوم در اختیار داشتن سخت افزار و حافظه کامپیوتری قویتر است چرا که در آن حجم عملیات و محاسبات بسیار زیاد است و باید سرعت انجام این محاسبات هم بالا باشد .

۱-۲۷ سمانتیکس *(semantics)* و سینتکس *(syntax)*

در مورد هر سامانه *CAD/CAD* دو اصطلاح سمانتیکس و سینتکس مطرحند. سمانتیکس نحوهٔ عملکرد نرم افزار را مشخص می‌کند و اینکه چه اطلاعاتی برای هر عملیات روی اشیا لازمند. بعنوان مثال برای ایجاد یک مکعب، به سه طول و یک جهت‌گیری نیاز است. سینتکس، فرمت اطلاعات ورودی و خروجی را تعریف می‌کند. سینتکس به گرامر نرم افزار تشبیه می‌شود. بعنوان مثال در نرم افزار انوکد برای رسم یک خط به مختصات بترتیب x و y نقطه شروع و سپس x و y نقطهٔ انتها نیاز است. اگر بجای x و y و z نقاط فقط x و y آنها مشخص شود خود نرم افزار مختصهٔ z را صفر در نظر می‌گیرد.

۱-۲۸ سامانه‌های مختصات

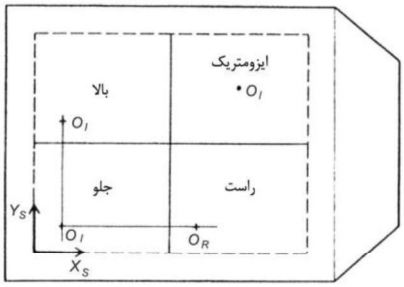
در *CAD* سامانه‌های مختصات مختلفی وجود دارند که کاربر می‌تواند بر اساس آنها مختصات نقاط مختلف نقشه را وارد نماید. در مراحل مختلف از جمله ترسیم و تصحیح به ورود مختصات نقاط نیاز می‌باشد. رایج‌ترین سامانه‌های مختصات مصرفی سامانه‌های کارتزینی و قطبی هستند. در سامانه مختصات کارتزین، از سه محور متعامد راستگرد X، Y و Z استفاده می‌شود. در این سامانه مبدا مختصات در موقعیت صفر قرار می‌گیرد و مقادیر مثبت و منفی مختصات روی محورهای مختصات نشانگر سمت واقع شدن نقاط نسبت به مبدا هستند. در سامانه مختصات قطبی که نمونه دو بعدی سامانه مختصات استوانه-

ای است مختصات هر نقطه از مبدا مختصات با یک شعاع و زاویه آن نسبت به محور مرجع قطبی تعیین می‌گردد.

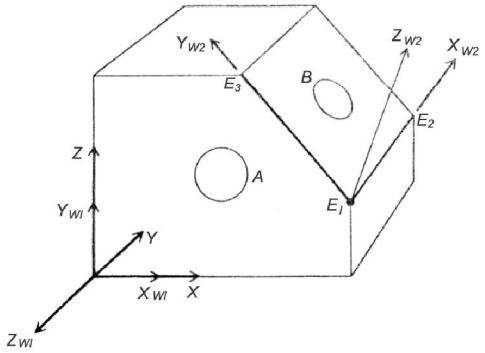
از نگاه دیگر سامانه‌های مختصات را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: سامانه مختصات مدل *(MCS)*، سامانه مختصات کاری *(WCS)* و سامانه مختصات صفحه نمایش *(SCS)*. سامانه مختصات مدل غالباً به صورت یک سامانه کارتزین است که پس از ترسیم اجزا، مختصات شاخص آنها بر اساس این سامانه ذخیره می‌گردد. گاهی برای ساده شدن رسم اجزای مختلف یک سامانه مختصات محلی نیاز می‌شود که وارد کردن و ترسیم اجزا را راحت‌تر کند. به این سامانه، سامانه مختصات کاری یا محلی گفته می‌شود و اطلاعات اجزا پس از تبدیل مختصات از *WCS* به *MCS* در انباره داده‌های مدل ذخیره می‌شوند. برای نمایش اشیا در صفحه نمایش داده‌های هندسی مدل باید از *MCS* به سامانه

مختصات دو بعدی صفحه نمایش در *SCS* تبدیل گردد(شکل ۱-۱۸). چون در *SCS* مختصات*X* و *Y* همان تعداد پیکسل‌ها روی محورهای افقی و عمودی هستند پس از تبدیل مختصات از *MCS* به *SCS*، کمی گرد می‌شوند. هر چه رزولوشن صفحه نمایش بالاتر باشد کیفیت تصویر نیز بالاتر خواهد بود.

برای تعریف یک *WCS* باید نقطه مبدا آن و جهات محورهای *X* و *Y* وارد شود(شکل۱-۱۹). برنامه بر مبنای *WCS* جاری کار می‌کند مگر اینکه سامانه مختصات جاری به حالت قبل برگردانده شود. سامانه *WCS* در حالت سه بعدی و کار با مدل‌های سطحی و حجمی بسیار مفید است.



شکل۱-۱۸یک سامانهٔ مختصات صفحهٔ نمایش نمونه.



شکل۱-۱۹دو نمونه سامانه مختصات کاری *W1* و *W2*.