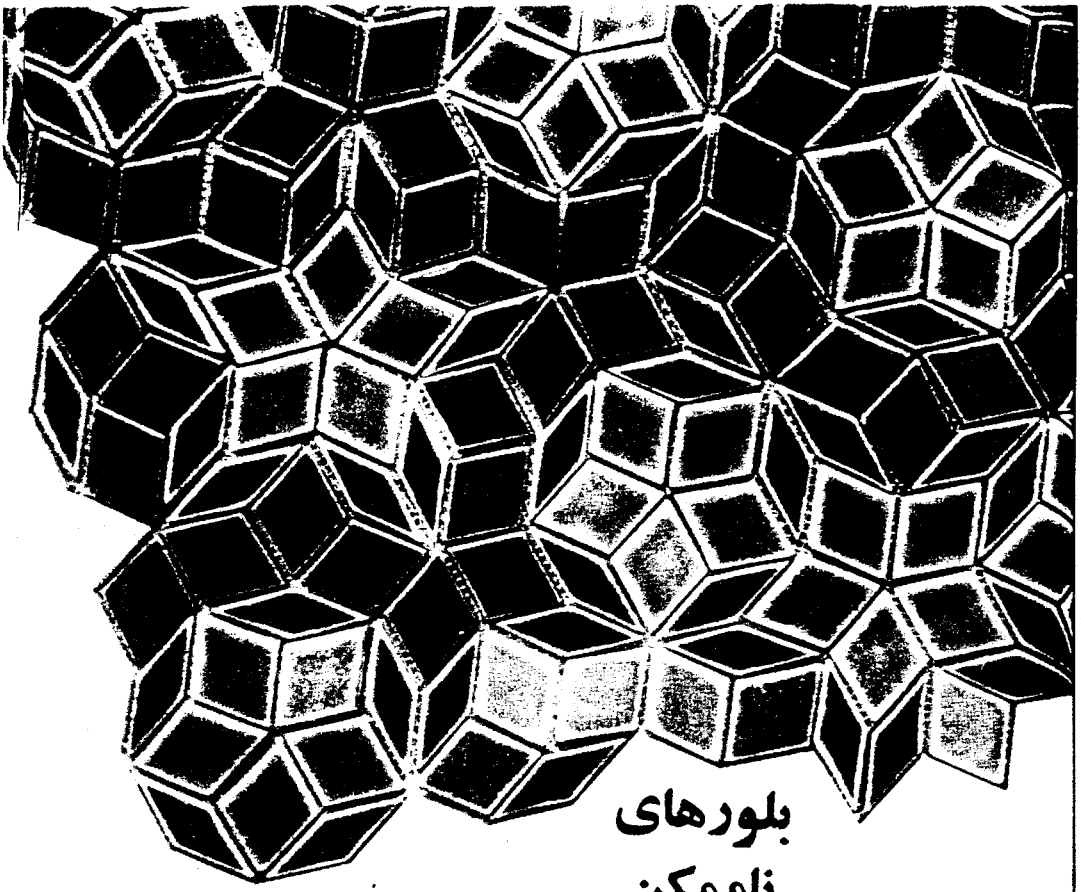
**بلورهای ناممکن**، هانس فون به یر، *دانشمند*، سال ۲۸، شمارهٔ ۵، مرداد ۱۳۶۹، ص ۵۷-۶۴



# بلورهای ناممکن

**شبه‌بلورها در آغاز به عنوان یک بازی ریاضی مطرح شدند. اما پس از چندی، این بازی رنگ واقعیت به خود گرفت**

نوشتهٔ هانس فون بەیر
ترجمهٔ گیلاندخت هاموني

"نمی‌دانم به چشم جهانیان چگونه‌ام، اما از دید خودم کودکی بیش نیستم که در کنارهٔ ساحل به بازی مشغولم". سر آیزاک نیوتون، بنیانگذار فیزیک در دوران جدید، با این عبارتها حاصل یک عمر تلاش خود را توصیف کرده است. او ضمنا با این کارش، حقیقتی را در مورد حرفهٔ خود آشکار ساخته که کمتر فرد غیردانشمندی از آن آگاه است. خیلی وقتها این کودک بازیگوش در این عرصه، با دیواری از نظریه‌های پیچیده و حتگل عبورناپذیری از تکنولوژی، از معرض دید پنهان می‌شود. اما، گاه چهرهٔ کودکی را می‌بینیم که از پشت صورتک پرابهامی که آن را پوشانده به بیرون می‌نگرد، و این نگاههای نادر خیلی بیشتر از چندین جلد توضیحات عالمانه، ما را به درک ماهیت راستین علم هدایت می‌کند.

نمونه‌ای زنده از نقش اساسی سرگرمیهای علمی، ماجرای کشف ردهٔ جدیدی از مواد به نام شبه‌بلورهاست. شبه‌بلورها ساختارهایی سه‌بعدی‌اند،

اما اسلاف آنها در دو بعد، یعنی در صفحه وجود دارند. ماجرا چنین آغاز شد که در ژانویه ۱۹۷۷، مارتین گاردنر، ستون بازیهای ریاضی مجلهٔ **ساینتیفیک آمریکن** را به این مسئله اختصاص داد که چگونه می‌توان صفحه‌ای را با انواع کاشیها پوشاند. قدمت این مسئله به کاشیکاریهای یونان باستان می‌رسد، ولی مقالهٔ گاردنر چنان جنب و جوشی در کار پژوهش ایجاد کرد که باعث شد موضوع کاشیکاری درصدر مباحث فیزیک نویسن جای بگیرد.

بررسی ریاضی کاشیکاری با ملاحظهٔ این نکته آغاز می‌شود که هر صفحه ــ مثلا، کف یک حمام ــ را می‌توان بدون باقی گذاشتن قسمتهای خالی، به وسیلهٔ کاشیهایی به شکل مستطیل، مثلث، یا شش ضلعی پوشاند، ولی انجام این کار با کاشیهای به شکل دایره، ستاره یا حتی، به‌عنوان مثال خاص، با کاشیهای به شکل پنج ضلعی منتظم، امکانپذیر نیست. هر طور هم که کاشیهای پنج ضلعی را کنار هم بچینید، باز همیشه جاهای خالی باقی خواهد ماند. برای اطمینان از این موضوع می‌توانید تعدادی پنج ضلعی منتظم متساوی‌الساقین از مقوا ببرید و آنها را روی میز کار خود به صورتهای مختلف کنار هم بچینید. بزودی از این پنج ضلعی‌های ناقلا، بدتان خواهد آمد.

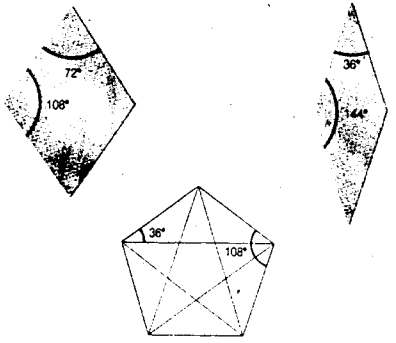
پنج‌ضلعی منتظم، تقارن پنج لایه دارد، یعنی اگر پنج ضلعی را حول مرکزش بچرخانید، پس از هر یک پنجم دور، همان شکل اولیه را خواهد یافت. به همین ترتیب، مربع تقارن چهار لایه دارد، شش ضلعی تقارن شش لایه دارد، و الی آخر. هر شکلی که صفحه را می‌پوشاند، می‌تواند تقارن خود را به سراسر نقش کاشیکاری تعمیم دهد: مثلا می‌توان هرکاشیکاری شش‌ضلعی را حول مرکز هر یک از شش‌ضلعی‌ها چرخاند و دید که سراسر این نقش، تقارن شش لایه دارد. اگر می‌توانستیم صفحه را با پنج ضلعی کاشیکاری کنیم، در این کاشیکاری هم تقارن پنج لایه مشاهده می‌شد. اما، البته این کار را با استفاده از پنج ضلعی، نمی‌توانیم بکنیم.

اما گاردنر با استفاده از دو شکل کاشی به جای یک شکل، نقشهای کاشیکاری فریبنده‌ای پدید آورد که واقعا تقارن پنج لایه داشتند: تمام نواحی را می‌شد طوری چرخاند که آرایش کاشیهای موجود، پس از هر یک پنجم دور، به همان صورت اولیه دیده شوند. مثلا، یکی از این نقشها شامل گروههایی از کاشیهای شبیه به ستارهٔ پنج‌پر بود. گویی پنج‌ضلعی‌ها بی‌آنکه خود حاضر باشند قوانین حاکم بر این نقشها را تعیین می‌کردند.

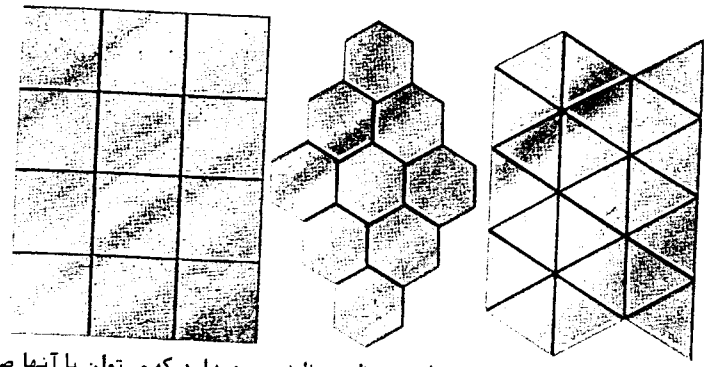
گاردنر راه ساختن این کاشیکاریهای تودرتو را از "راجر پن‌رُز" دانشمند انگلیسی در رشتهٔ فیزیک ریاضی، یاد گرفت. پن‌رُز در انجام تردستی‌های هندسی مهارت دارد. وی در ایام جوانی به همراه پدرش موضوع ناممکنی را ترسیم کرد که "پلکان پن‌رز" نام دارد و مارپیچ‌وار به دور خود می‌پیچد، بی‌آنکه بالاتر یا پایینتر برود. اِشر هنرمند معروف هلندی از این طرح گیج‌کننده در یکی از نقاشیهای معروفش به نام "صعودونزول" استفاده کرده است. در این اثر مردانی دیده می‌شوند که در یک زمان، هم از پله بالا می‌روند و هم پایین می‌آیند.

"کاشیهای پن‌رز" هم به‌همین منوال جالب‌اند. هیچ یک از دو شکل اساسی پنج ضلعی نیستند و در ترکیب با یکدیگر نیز پنج‌ضلعی نمی‌سازند. ولی در عین حال همچون فرزندان ناخلف پنج‌ضلعی هستند، چرا که دارای زاویه‌ها و نسبتهایی هستند که در هر پنج‌ضلعی و قطرهای آن یافت می‌شود و وقتی این دو شکل در صفحه کنار هم چیده شوند، با کمال افتخار تقارن پنج‌لایه‌ای را که از پدر به ارث برده‌اند جلوه‌گر می‌سازند.

در ساده‌ترین کاشیکاری "پن‌رز" دو شکل لوزی، یکی چاق و دیگری لاغر، به کار می‌رود. شکل چاق دارای زاویه‌های داخلی ۷۲ درجه و ۱۰۸ درجه، یعنی همان زاویهٔ داخلی پنج‌ضلعی منتظم است. شکل لاغر دارای زاویه‌های داخلی





**تنها چند شکل اساسی مثل مربع، شش‌ضلعی منتظم و مثلث وجود دارد که می‌توان با آنها صفحه را به طور کامل پوشاند، بی‌آنکه فاصله‌ای بین آنها خالی بماند**

۱۴۴ درجه و ۳۶ درجه است که زاویهٔ اخیر بین قطرهای پنج‌ضلعی منتظم تشکیل می‌شود. وقتی طول لبه‌های همهٔ کاشیها برابر باشد، نسبت مساحت کاشیهای چاق به کاشیهای لاغر $\frac{1}{2}(\sqrt{5}+1)$، یعنی تقریبا برابر با ۱/۶۱۸ است. این مقدار با نسبت طول قطر پنج‌ضلعی منتظم به طول هر ضلع آن برابر است. همچنین برابر است با "نسبت طلایی"، مقداری که هم یونانیان عهد باستان و هم بسیاری از نقاشان و معماران دوران نوزایی (رنسانس) به آن توجه داشته‌اند. چنان که خواهیم دید، نسبت طلایی و تقارن پنج‌ضلعی در طراحی کاشیکاریهای پن‌رز به صورتهای مختلف ظاهر می‌شوند.

هر یک از کاشیکاریهای پن‌رز را در بینهایت نقش مختلف می‌توان ساخت. همهٔ این نقشها غیرتناوبی‌اند و جذابیت آنها هم درهمین نکته نهفته است. برخلاف آجرهای دیوار یا میله‌های پرچین، در اینجا هیچ کاشی یا مجموعه‌ای از کاشیها را نمی‌توان به طور نامحدود تکرار کرد تا کل نقش پدید آید. در نگاه اول، شاید کاشیکاری پن‌رز تناوبی به نظر برسد. گروههایی از کاشیها، شکل نمونهٔ تکرار شونده‌ای به صورت ستارهٔ پنج‌پر به وجود می‌آورند. اما مشاهدهٔ دقیقتر نشان می‌دهد که آرایش هندسی این نمونه‌ها بی‌قاعده است و برخی از آنها نسبت به بقیه دوران یافته‌اند.

طبیعتا وقتی پژوهشگران دیدند که این نقشها تعادل جالب توجهی بین نظم و آشوب دارند، مثل کودکی که بازیچهٔ تازه‌ای یافته باشد به‌سوی آنها کشیده شدند. طی شش سال پس از آن، بسیاری از کاشیکاریهای پن‌رز با استفاده از چند وجهی‌هایی که فضا را بدون باقی گذاشتن شکاف پرمی‌کردند، تعمیم داده شدند. این کاشیکاریهای سه‌بعدی هم، مانند همتاهای دوبعدی‌شان در صفحه، غیرتناوبی بودند.

یکی از این بازیگران مسحور شده، پل اشتاینهارت، فیزیکدانی از دانشگاه پنسیلوانیاست که از ارزش تحقیقاتی بازیچه‌ها به‌خوبی آگاه است. دفتر کار اشتاینهارت پر از اسباب‌بازی است. درهز گوشه و کناری، لابلای کتابها و کامپیوترها که ابزار کار دانشمند است، هر نوع بازیچه‌ای که فکرش را بکنید یافت می‌شود، از ساده‌ترین قطعات بریده شدهٔ مقوا که بی‌هیچ ظرافتی به کمک نوار به هم وصل شده‌اند تا پرهزینه‌ترین شکلهای کامپیوتری. از هر چیزی که دم دست بوده استفاده شده است: جارختی، گلولهٔ اسفنجی، تاسهای بازی اژدها و سیاه‌چال، ورقه‌های فیلم، تکه‌های پازل تصویری، خلال دندان و کاغذ رسم. اشتاینهارت یکی از قربانیان طبیعی نوعی بازی است که با کاشیکاریهای غیر تناوبی سه‌بعدی انجام می‌شود.

در سال ۱۹۸۴ او و یکی از دانشجویان دورهٔ لیسانسش به نام داو لواین، چنان مجذوب این بازی شدند که کار تحلیل را یک گام جلوتر بردند: آنها برنامه‌ای برای کامپیوترشان نوشتند که نقشهای پراش (تفرق) حاصل از این ساختارها را محاسبه کند با این فرض که این عناصر پرکنندهٔ

فضا به جای کاشیهای تخیلی، اتمهای واقعی باشند.

نقشهای پراش پنجره‌هایی هستند که فیزیکدانان از طریق آنها به درون مواد مختلف "سرک می‌کشند". هرگاه دسته‌ای الکترون یا پرتو ایکس از درون جسم جامدی بگذرد، به وسیلهٔ اتمهای داخلی آن "پراشیده" یا متفرق می‌شود. از این دسته پرتو می‌توان از روبه‌رو عکس گرفت، و تصویری که روی فیلم پدید می‌آید مشخص کنندهٔ آرایش ساختمان اتمی آن جسم است. این نقشهای پراش به خودی خود، چیز چندانی برای دیدن ندارند و شامل آرایش اسرارآمیزی از نقاط و رگه‌ها هستند که شباهت چندانی به جسم عکسبرداری شده ندارند. اما برای دست‌اندرکاران، همین نقشها، مثل عکسهای خانوادگی گویا هستند.

مشخصترین نقشهای پراش، شامل نقطه‌های روشن پراکنده‌ای هستند. اینها عکسهای مربوط به بلورها هستند و وجود نقطه‌های کاملا مشخص در آنها ناشی از تناوبی بودن ساختاری است که از آن پدید آمده‌اند. وقتی پرتوها در یک بلور با اتمها برخورد می‌کنند، در همهٔ جهات پخش می‌شوند، اما در چند جهت خاص که به آرایش اتمها بستگی دارند، پرتوهای پراشیده یکدیگر را تقویت می‌کنند و نقطه‌های روشن را پدید می‌آورند. هر بلور تاحدی مثل باغی است که درختانش در شبکهٔ هندسی منظمی کاشته شده‌اند. اغلب خطهای دید به وسیلهٔ درختان مسدود می‌شود ولی در چند جهت معین راه دید تا آن سوی باغ باز است.

در دستهٔ دیگری از نقشهای پراش، نقطه‌ها روی حلقه‌ای نه‌چندان مشخص قرارگرفته‌اند یا بکلی از صحنه غایب‌اند. این تصویرها به وسیلهٔ مواد شیشه‌ای ایجاد می‌شوند. شیشه‌ها، برعکس بلورها، از اتمها یا مولکولهایی ساخته شده‌اند که به‌طور نامنظم به یکدیگر چسبیده‌اند، درواقع بیشتر به جنگلی خودرو شباهت دارند تا باغی که طبق نقشه احداث شده باشد. چون هیچ جهت خاصی برای پراش در آنها وجود ندارد، نقشهای حاصل از آنها هیچ نقطهٔ مشخصی ندارند.

پیش از کشف شبه بلورها، تصور می‌شد که تنها همین دو دسته مواد جامد، متناظر با این دو نوع نقشهای پراش وجود دارد. اگر نقش نقطه‌های متمایز داشت، مادهٔ مورد نظر بلور بود، اگر نقطه‌ها در هم یا غایب بودند، ماده نوعی شیشه بود. هر جسم خالص در طبیعت، از جواهر و فلزات گرفته تا مولکولهای دی ان آ (تشکیل دهندهٔ ژن‌ها) یا بلوری بودند یا شیشه‌ای. لواین و اشتاینهارت این تقسیم‌بندی قاطع را با شبیه سازی کامپیوتری تابش پرتو ایکس بر یکی از این اجسام فرضی خود، مورد سوال قرار دادند. نقش پراش محاسبه شده نکتهٔ عجیبی در خود داشت: نقطه‌های واضح کاملا مشخص. چون آرایش اتمی جسم آنها غیرتناوبی بود، قاعدتا باید نقش پراش غیرواضحی که مخصوص مواد شیشه‌ای است پدید می‌آورد.

این نتیجهٔ تناقض‌آمیز، بی‌شک نیاز به توضیح داشت و دو فیزیکدان فوق برای درک کم‌وکیف موضوع، به سراغ منشاء مدل کامپیوتری خود یعنی کاشیکاری دوبعدی پنرز رفتند. آنها با یک کارشناس ریاضیات تفننی به نام رابرت آمان نیز مشورت کردند. به کمک آمان موفق شدند کشف کنند که آرایش هندسی کاشیها در کنار یکدیگر، نه تناوبی است نه تصادفی، بلکه چیزی بین آنهاست، نوعی نظم که شبه‌تناوبی خوانده می‌شود.

آمان دریافت که این یک نوع نظم نهانی است که فقط براساس شبکهٔ پنج‌ضلعی قابل تبیین است. در این شبکه، خطکشی‌ها بر خلاف کاغذ نمودار معمولی، برهم عمود نیستند، بلکه با پنج ضلع یک پنج ضلعی موازی‌اند. این پنج دسته خطهای متقاطع که هر کدام ۷۲ درجه نسبت به قبلی چرخیده است، کاغذ نموداری با تقارن پنج لایه ایجاد می‌کنند.

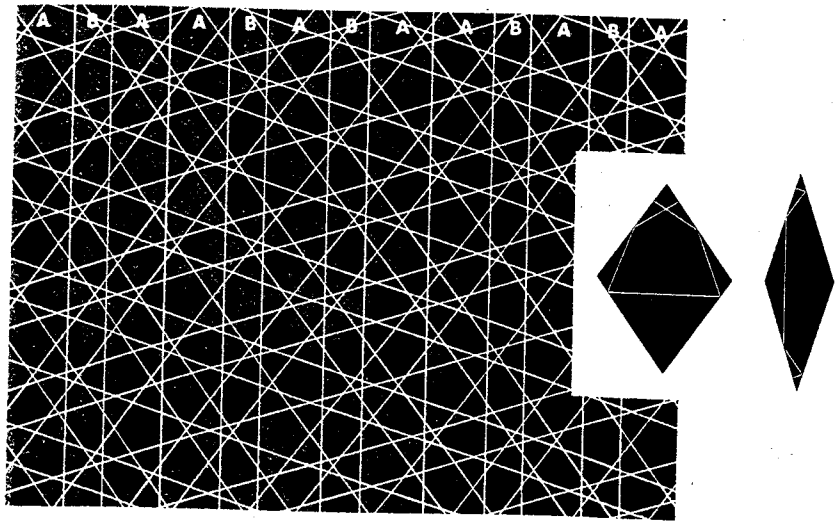
نکتهٔ زیرکانهٔ کار آمان این بود که یکی از این شبکه‌های پنج لایه را طوری روی یک کاشیکاری پنرز رسم کرد که از یکایک کاشیها، خطی متعلق به هر یک از پنج دسته خط عبور می‌کرد، انجام این کار روی کاشیکاری غیرتناوبی دشوار است. اما آمان طرز ترسیم چنین شبکه‌ای را با تنظیم فاصلهٔ بین خطوط موازی به دست آورد. این فاصله‌ها براساس نظمی که در ریاضیات ریشه‌ای قدیمی داشت مرتب شدند: فاصلهٔ بین "خطهای آمان"، یکی از دو طول متفاوتی است که طول بلندتر را a، وطول کوتاهتر را b می‌نامیم. نسبت طول بلندتر به کوتاهتر، همان "نسبت طلایی" است. ضمنا این دو طول طبق نظمی ثابت و قابل پیش‌بینی به دنبال هم قرار می‌گیرند، که همان دنبالهٔ بی‌پایان موسوم به دنبالهٔ فیبوناچی است.



درست همان طور که کاشیکاری پنرز شامل هیچ گروهی از کاشیها نیست که بتوان با تکرار آن، کل نقش را تولید کرد، دنبالهٔ فیبوناچی هم شامل هیچ ردیف کوتاهتری از a ها و b ها نیست که با تکرار آن بتوان کل دنباله را به‌دست آورد. اما این دنباله را می‌توان براساس دو دستور ساده به وجود آورد. لئوناردوفیبوناچی، ریاضیدان قرن سیزدهم میلادی، این دستورها را با ملاحظهٔ تکثیر فرضی خرگوشها تعیین کرد. دستور نخست این است: از یک خرگوش بالغ (a) آغاز می‌کنیم و فرض می‌کنیم که در پایان هر سال، هر خرگوش بالغ یک بچه (b) می‌زاید که بلافاصله پس از او ثبت می‌شود. دستور دوم: هر بچه خرگوش در سال بعد از سال تولدش بالغ می‌شود. (فیبوناچی با توجه به واقعیت، هر حرف را به نشانهٔ یک جفت خرگوش به کار برد. اشتاینهارت و بسیاری افراد دیگر کار را ساده می‌کنند و فرض را بر این می‌گذارند که هر خرگوش بالغ به‌تنهایی می‌تواند یک بچه بزاید، ما هم در اینجا بیان ساده‌تر را برگزیده‌ایم.) برای

**در کاشیکاری پنرز پنج دسته خطهای متوازی می‌توان رسم کرد چنان‌که از یکایک کاشیها خطی متعلق به هر یک از پنج دسته خط عبور کند. این خطها از نظمی پنهان که در مقالهٔ حاضر مورد بحث قرار گرفته، حکایت می‌کنند**

به دست آوردن اولین جملهٔ دنباله، کار را با یک خرگوش بالغ آغاز می‌کنیم: a. در سال دوم این خرگوش بالغ صاحب یک بچه می‌شود و دنباله به دو جمله می‌رسد: ab. در سال سوم، خرگوش بالغ اولیه صاحب بچهٔ دیگری می‌شود که بعد از خرگوش بالغ ثبت می‌شود، ضمنا بچهٔ اول بزرگ می‌شود و نتیجه به صورت aba درمی‌آید. در سال چهارم، بعد از هر خرگوش بالغ یک بچه افزوده می‌شود و بچه‌هایی که قبلا موجود بودند به بالغ تبدیل می‌شوند. نتیجه به صورت abaab درمی‌آید. اگر این کار را سال به سال دنبال کنید، نتیجه می‌شود abaababaabaab، abaababa، الی آخر. راه دیگری برای تشکیل دنباله این است که دنباله‌های دو سال اخیر را به یکدیگر بیفزاییم به طوری که دنبالهٔ سال قبل اول نوشته شود. به این ترتیب، دنباله از سالی به سال دیگر تغییر نمی‌کند، فقط درازتر می‌شود. اگر تعداد کل خرگوشها در هر سال را بنویسید (۱ برای سال اول، ۲ برای سال دوم، ۳ برای سال سوم، ۴ برای سال چهارم، الی آخر). رشته‌ای از اعداد حاصل می‌شود که دنبالهٔ معروف فیبوناچی را تشکیل می‌دهد (۱، ۱، ۲، ۳، ۵، ۸، ۱۳، ۲۱، ۳۴، ۵۵، ۸۹، ۱۴۴، ۲۲۳ و ...). در این دنباله، هر جمله مجموع دو جملهٔ قبلی است. در اینجا هم دوباره نسبت طلایی چهرهٔ زیبای خود را نشان می‌دهد. هر چه جلوتر برویم، نسبت دو



حملهٔ متوالی به ۱/۶۱۸ نزدیکتر می‌شود.

بی‌شک فیبوناچی به نکتهٔ باارزشی دست‌یافته بود. او حدود هشت قرن پیش، نوعی نقش پن‌رز یک بعدی ابداع کرده بود، دنباله‌ای که تناوبی نیست، در عین حال تصادفی هم نیست. دستورالعمل کاملا مشخصی برای تعیین هرجملهٔ بعدی دنباله وجود دارد. اشتاینهارت و لواین هم به برکت ریاضیات تفننی قرنهای میانه، به نکتهٔ باارزشی دست یافتند. آنان سرانجام توضیحی برای نقش پراش جسم فرضی خود پیدا کردند. کشف آنها منجر به اثبات این نکته شد که برخلاف تصور رایج، تناوبی بودن در سه بعد برای تولید نقطه‌های پراش ضروری نیست، شبه تناوبی بودن برای این منظور کافی است.

اما جسم شبه‌تناوبی آنها یک ویژگی نامطلوب داشت: نقطه‌های نقش پراش با تقارن پنج لایه چیده شده بودند. بلورشناس سنتی، بسادگی چنین نقشی را غیرقابل قبول می‌داند. در بلور شناسی این یک اصل است. بلورها نمی‌توانند نقش پراشی با تقارن پنج لایه ایجاد کنند زیرا ساختار اتمی پدید آورندهٔ آنها نمی‌تواند تقارن پنج ضلعی داشته باشد، همچنان که کف حمام را نمی‌توان با کاشیهای پنج‌ضلعی پوشاند.

به این ترتیب، اجسام فرضی اشتاینهارت هر چه بودند، بلور نبودند. اما وجود نقطه‌های متمایز در نقش پراش حاکی از آن بود که شیشه هم نیستند. ساختار درونی آنها ترکیبی از خواص بلورها و شیشه‌ها را در خود داشت، این مواد فرضی، درحکم پستاندارانی بودند که تخم هم بگذارند: اُرنی‌تورُنگ* فیزیک. اشتاینهارت بر آن شد که آنها را شبه‌بلور بنامد و به این ترتیب شبه‌بلورها را به فهرست فزایندهٔ موضوعهای سرگرم کننده‌ای که از ریاضیات تفننی پن‌رز سرچشمه می‌گیرند، افزود.

اما، حادثهٔ باورنکردنی رخ داد. در پاییز سال ۱۹۸۴، اشتاینهارت مرخصی خود را در مرکز پژوهشی آی‌بی‌ام، واقع در یورکتاون هایتس (نیویورک) می‌گذراند. روزی، یکی از همکارانش که فیزیکدانی به نام دیوید نلسون از دانشگاه هاروارد بود، با خبرهای هیجان‌انگیزی وارد دفتر شد. عکس کوچکی را روی میز گذاشت که تصویر پراش حاصل از یک آلیاژ واقعی آلومینیوم و منگنز بود. نلسون توضیح داد که گروهی از پژوهشگران موسسهٔ ملی استانداردها تصویر را فراهم کرده‌اند و به شکل غیر عادی نقش حاصل از نقطه‌ها اشاره کرد: تقارن پنج لایهٔ غیرقابل تردیدی در آن وجود داشت.

ضربان قلب اشتاینهارت بالا رفت. این تصویر به نحو شگفت‌انگیزی شبیه تصویری بود که او و لواین با شبیه‌سازی کامپیوتری به دست آورده و هنوز منتشر نکرده بودند. اتفاقا لواین همان روز از فیلادلفیا به آنجا آمده بود. سه دانشمند، همچون کودکانی که از بازی در ساحل به هیجان آیند، بلافاصله دست به کار شدند. فاصلهٔ بین نقطه‌ها را روی نسخهٔ بزرگ شدهٔ تصویر واقعی اندازه گرفتند و آن را با نتایجی که از چاپگر کامپیوتر گرفته بودند مقایسه کردند. اشتاینهارت به یاد دارد که جواب را حتی پیش از آنکه از راه اندازه‌گیری تایید شود می‌دانست. دو تصویر با یکدیگر مطابقت داشتند.

لحظهٔ کشف حقیقت در علم هنگامی فرامی‌رسد که یافته‌های نظری با شواهد تجربی روبه‌رو می‌شود. مطابقت بین این دو، داور نهایی اعتبار موضوع است. هیچ چیز دیگری، اهمیت ندارد. مقایسهٔ داده‌ها با نتایج محاسبه معمولا خرده خرده پیش می‌رود و حقیقت بتدریج از میان کلاف سردرگمی که کار خلاق را احاطه کرده عیان می‌شود. اما وقتی لحظهٔ کشف حقیقت، برق‌آسا فرا می‌رسد، مثل حادثهٔ آن روز در موسسهٔ آی‌بی‌ام، روشنی و نیروی لازم را برای جسارتهای علمی در سالهای آتی تامین می‌کند.

به این ترتیب، شاخهٔ تازه‌ای از فیزیک حالت جامد، یعنی علم شبه بلورها، زاده شد. این شاخه خیلی سریع رشد کرد. ظرف مدت کوتاهی، بیش از صد آلیاژ با تقارن پنج لایه کشف شد، معلوم شد که تقارنهای هفت لایه، نه لایه، یازده لایه و دیگر تقارنهایی که قبلا ناممکن به‌شمار می‌آمدند، امکانپذیرند. در این زمینه، گردهمایی‌های علمی برگزار شد و مقالات مفصلی انتشار یافت.

* اُرنی تورُنگ ( platy pus ) پستاندار نیمه‌آبی تخمگذار، حدواسط مابین پستانداران و خزندگان است. پوست آن پشمالو و خشن و دمش پهن است. پوزهٔ آن شبیه به‌نوک اردک و پاهایش پره‌دار است. ــ م.



اما در پستوی خانه، جسدی پنهان شده بود که می‌توانست همه چیز را نقش‌برآب کند: ایرادی که کل نتایج را در خطر ویرانی قرار می‌داد. ضمن اینکه پژوهشگران بتدریج با چگونگی آرایش کاشیکاریهای غیرتناوبی دو بعدی و سه بعدی آشنا می‌شدند، هیچ کس نمی‌توانست تجسم کند که میلیونها و میلیونها اتم واقعی بر چه اساسی به طور خودبه‌خودی در این نقشهای پیچیده کنار یکدیگر مرتب می‌شوند.

هر کسی که سعی کند کاشیکاری پن‌رز را جور کند، فورا متوجه می‌شود که این کار چندان آسان نیست. قبلا باید فکر مراحل بعدی را بکنید و هنگام افزودن هرکاشی باید کل نقش را در ذهن داشته باشید، وگرنه به دردسر دچار می‌شوید. اگر اشتباهی بکنید ناچارید مقدار زیادی از آنچه را قبلا انجام شده به هم بزنید. مسئله این است که اگر دستورها یا قواعد موضعی برای نشاندن یک کاشی در یک تورفتگی خاص وجود دارد، این دستورها برای ساختن کل نقش کافی نیست. به نظر می‌رسد که لازم است دستورهای سراسری هم به‌آنها افزوده شود. این دستورها برای آن است که مراحل بعدی در نظر گرفته شود و آرایش پذیری کاشیها در نقاط دوردست رعایت شود. بین سالهای ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۸ این اعتقاد رایج شد که کاشیکاریهای غیرتناوبی کامل را تنها به اتکای دستورهای موضعی نمی‌توان ساخت.

دستورهای موضعی برای کنار هم چیدن کاشیها، مشابه نیروهایی است که اتمها را جذب می‌کند و روی سطح شبه بلور در حال رشد نگاه می‌دارد، اینها اجزایی هستند که برای روند رشد مناسب هستند. دستورهای سراسری چنین نیستند. اتمهای واقع بر سطح رشد یابنده، دوراندیشی ندارند و در فکر تنظیم جهت اتمهای سطحهای دورتر نیستند. بلکه فقط پاسخگوی نیروی الکتریکی پیوند بین اتمی همسایگان دوروبر خود هستند. اگر نقشهای شبه تناوبی را می‌شد فقط با استفاده از دستورهای سراسری به‌وجود آورد، ساختن آنها با اتمهای واقعی در آلیاژهای واقعی ممکن نبود و شبه بلور در طبیعت وجود نداشت.

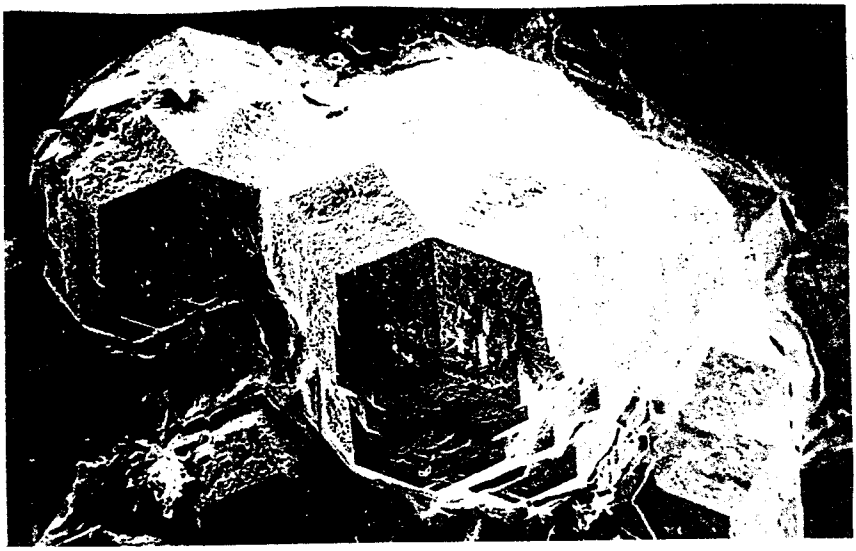
مسئله بقدری جدی بود که پژوهشگران بتدریج توجه خود را به توضیحهای متداولتر در مورد نقشهای پراش مشاهده شده معطوف کردند. مثلا، لینوس پائولینگ که دوبار برندهٔ جایزهٔ نوبل شد، طرفدار آرایشی از بلورهای

**اشتاینهارت در دفتر کار خود واقع در دانشگاه پنسیلوانیا، خویشاوند سه‌بعدی کاشیهای ناخلف پن‌رز را می‌سازد**

معمولی بود که دوقلو خوانده می‌شدند. بلورهای دوقلو از دو مبدا متمایز شروع به رشد می‌کنند و با زاویه‌های غیرمتعارف مثل ۷۲ درجه در یکدیگر رسوخ می‌کنند. این پدیده می‌تواند نقش پراشی با تقارن غیرطبیعی پنج لایه ایجاد کند، هرچند که ساختار مولد آن معمولی است. پژوهشگران دیگری، از جمله خود اشتاینهارت، ساختارهای شیشه‌ای را که تکه‌های کوچک بلور در آنها نشانده شده بود، بررسی کردند. تصور می‌شد که این تکه‌ها نقش پراشی ایجاد می‌کنند که به صورت نقطه‌هایی است کم‌وبیش بوضوح نقطه‌های حاصل از بلور، هر چند که ساختار کلی شیشه‌ای است.

اما در سال ۱۹۸۸، بازیگوشی نتیجهٔ تازه‌ای به بار آورد. جورج انودا، کارشناس سرامیک از آی‌بی‌ام، با ۲۰۰ نوع کاشی پن‌رز، سرگرم بازی بود. او که نظرات مربوط به امکان‌ناپذیری این کار را باور نداشت، بالاخره راهی یافت که بتواند کاشیکاریهای بی‌عیب در هر اندازه‌ای را صرفا با استفاده از دستورهای موضعی جفت‌وجور کند. او می‌گوید: "با این موضوع همچون یک معما برخورد کردم و سعی کردم ثابت کنم منفی‌بافها اشتباه می‌کنند."

انودا دستورالعملهای خود را به‌اشتاینهارت نشان داد و این دو تن دو ساعتی با کاشیها



**آلیاژی از آلومینیوم و لیتیوم که ضمن پژوهش برای یافتن مواد مورد نیاز در صنایع فضاپیمایی کشف شد، وجوهی به شکل آشنای لوزی که خاص شبه‌بلورهاست، دارد. اندازهٔ قطر بزرگترین بلورهایی که تاکنون ساخته شده، حدود شش میلیمتر است**

مشغول شدند. اشتاینهارت برداشتهای انودا را به صورت مجموعه‌ای از دستورها خلاصه کرد. این دستورها تعیین می‌کنند که راسهای هر کاشی باید در کدام یک از هشت ترکیب ممکنی که در کاشیکاری کامل پن‌رز یافت می‌شود، قرار گیرند. او همچنین با کمک دو پژوهشگر دیگر، اشباتی ریاضی برای این موضوع فراهم آورد که شبیه‌سازی کامپیوتری برای یک میلیون کاشی نیز آن را تایید کرد و معلوم شد که ساختارهای شبه تناوبی می‌توانند ــ دست‌کم در دو بعد ــ به طور طبیعی رشد کنند.

با استفاده از این دستورها می‌توان برای ساختن کاشیکاری پن‌رز، کاشیهایی به مرز شبه بلور رشد یابنده افزود. این دستورها معین می‌کنند که چه نوع جای خالی را اول باید پر کرد و اگر چند جای خالی هم‌ارز داشته باشیم که بتوانیم به دلخواه یکی را اختیار کنیم، در هر مورد کدام یک از دو نوع شکل را باید به کار برد، و آن را به چه صورت باید چرخاند. لازم نیست که هیچ نقطهٔ دور دستی را به هنگام جور کردن کاشیکاری خود در نظر بگیرید، همان‌طور که اتمی که می‌خواهد به صورت مناسب بچرخد و به همسایگانش بچسبد لازم نیست بداند که در جاهای دیگر چه خبر است.

برای دستیابی به نظریهٔ کاملی در مورد شبه بلورها باید دستورهای موضعی به سه بعد تعمیم یابد و نشان داده شود که این ساختارهای سه‌بعدی با نیروهای اتمی حقیقی متناظرند. هنوز هیچ یک از این کارها انجام نشده ولی کسانی چون اشتاینهارت معتقدند که بالاخره انجام خواهد شد.

در این میان، آزمایشگران نیز بیکار ننشسته‌اند. آنها همچنان گزارشهایی از شبه‌بلورهای بزرگتر و کاملتر عرضه می‌کنند و پیگیرانه خواص فیزیکی آنها را اندازه می‌گیرند. کسی نمی‌داند که باید منتظر چه چیزی باشد، زیرا هیچ یک از تجربیات گستردهٔ آنها در مورد بلورها و شیشه‌ها، امکان پیش‌بینی‌های قطعی در مورد شبه‌بلورها را فراهم نمی‌کند. امکان دارد که آلیاژهای شبه‌بلوری، به خاطر چفت و بستهای پیچیدهٔ اجزایشان سخت‌تر از بلورها باشند و بنابراین ممکن است به عنوان جایگزین الماسهای صنعتی به کار روند. شاید هم روزی از دل ابزارهای نوین الکترونیکی که هنوز فکرش را هم نمی‌کنیم سر در بیاورند. کسی چه می‌داند؟ پژوهشگران باید همچنان با آنها کلنجار بروند تا معلوم شود چه کاری از آنها ساخته است. □

Discover, Feb. 1990