

به نام خدا

۱۰۲۰۲



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر  
گروه مهندسی برق و الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - الکترونیک

عنوان

شبیه سازی و طراحی دی ماکس تمام نوری توسط شبه کریستال های  
فوتونیک

استاد راهنما

دکتر علی رستمی

استاد مشاور

دکتر کاظم مروج فرشی

پژوهشگر

حامد پیشوای بازرگانی

شهریور ۸۷

۶۰۵۰۶  
۱

۸۷/۱/۱۱/۱۱/۱۱  
۱۱/۱۱/۸۷

موسسه تخصصی زبان  
موسسه تخصصی زبان

۰-۱۰۱-۱۱۱۱۱

نام خانوادگی دانشجو: پیشوای بازرگانی	نام: حامد
عنوان پایان نامه: طراحی و شبیه سازی دی ماکس تمام نوری توسط شبه کریستال های فوتونیک	
استاد راهنما: دکتر علی رستمی	
استاد مشاور: دکتر کاظم مروج فرشی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق گروه: الکترونیک دانشگاه: تبریز	
دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۷.۶.۳۰ تعداد صفحه: ۹۴	
کلید واژه‌ها: شبه کریستال های فوتونیک، شکاف انرژی، دی ماکس، خطوط آمان، پوشش پنبروز، موجبر.	
<p><b>چکیده</b></p> <p>هدف در این پایان نامه طراحی و شبیه سازی دی ماکس تمام نوری توسط شبه کریستال می باشد.</p> <p>طراحی ساختار شبه کریستال توسط نرم افزار MATLAB و با استفاده از اصولی که در متن پایان نامه توضیح داده شده انجام گرفت است و همچنین طراحی و شبیه سازی دی ماکس از روش FDTD توسط نرم افزار Opti-Wave انجام پذیرفته است.</p> <p>در این کار انواع ساختارهای شبه کریستال های فوتونیک با تقارن های ۵ سوئی، ۸ سوئی و همچنین ۱۲ سوئی توسط نرم افزار MATLAB طراحی گردیده اند سپس مختصات محل قرار گیری رئوس که همان محل قرارگیری میله ها در نرم افزار Opti-Wave بوده به صورت ماتریسی استخراج گردیدند. با طراحی ساختار در نرم افزار Opti-Wave و قرار دادن میله ها در مختصات های تعیین شده طراحی کل دی ماکس و تعیین چگونگی قرارگیری ناراستی ها<sup>۱</sup> و همچنین تعیین پارامترهای شبیه سازی توانستیم دی ماکس تمام نوری با قابلیت جداسازی ۴ طول موج با فواصل 3.6 nm، 7 nm و 7.3 nm را طراحی نماییم. پس از آن برای کاربردی بودن ساختار در مخابرات نوری یعنی برای جداسازی طول موج های حول و حوش 1.55 μm ساختار دیگری را با موجبری از جنس سیلیکون و تعداد میله های هوایی به مراتب بیشتر برای افزایش پراکندگی نور طراحی نمودیم و توسط این دی ماکس ۴ کانال با فاصله های 21 nm، 15.5 nm و 25.5 nm جدا سازی شدند.</p> <p>لازم به ذکر است که تاکنون از شبه کریستال های فوتونیک برای طراحی دی ماکس استفاده نشده بود و این اولین بار است که در این مورد بحث می شود.</p>	

## فصل اول : بررسی منابع

۱	۱-۱ کریستالها و شبه کریستالها
	۱-۱-۱ ساختار اتمی جامدات
۲	۱-۱-۱-۱ نظم چرخشی
۲	۱-۱-۱-۲ کمینه فاصله بین اتمها
۲	۱-۱-۱-۳ نظم انتقالی شبه متناوب
۳	۱-۱-۲ شبه ساختار
۴	۱-۲-۱-۱ شبه ساختار آمان
۸	۱-۱-۳ پک های سلولهای پایه
۹	۱-۳-۱-۱ بسته بندی سلولهای پایه در شبه کریستالها
۹	۱-۳-۱-۲ تعریف ها
۱۳	۱-۳-۱-۳ روش های ساخت پک های شبه متناوب
۱۳	۱-۳-۳-۱-۱ روش های اتصال و قانون انقباض
۱۴	۱-۳-۳-۱-۲ روش تصویر شبکه
۱۴	۱-۳-۳-۱-۳ روش تصویر سویی
۱۴	۱-۳-۳-۱-۴ روش دوگان تعمیم یافته ( GDM ) یا روش چندشبکه ای
۱۵	۱-۴-۱-۱ شبه کریستال های یک بعدی
۱۶	۱-۴-۱-۱-۱ شبه کریستال های یک بعدی و تشابه محلی ( LI )
۱۷	۱-۴-۱-۱-۲ روشهای ساخت شبه کریستال های یک بعدی
۱۸	۱-۴-۱-۱-۳ روش قانون انقباض
۲۰	۱-۴-۱-۱-۴ روش تصویر مستقیم
۲۳	۱-۴-۱-۱-۵ روش تصویر شبکه و دوگان کلی ( GDM )
۲۵	۱-۵-۱-۱ شبه کریستال های پنج ضلعی دو بعدی
۲۷	۱-۵-۱-۱-۱ تشابه محلی
۳۰	۱-۵-۱-۱-۲ تصویر شبکه و تصویر مستقیم و دوگان شبکه ۵ تایی متناوب

۳۳	۳-۵-۱-۱ دوگان شبکه های ۵ تایی شبه متناوب
۳۶	۴-۵-۱-۱ پوشش پنروز کلاس PLI پنج ضلعی دو بعدی
۳۹	۶-۱-۱ پروتوتایل ها و ساختار پنروز
۴۴	۱-۶-۱-۱ کایت ها و دارت های پنروز
۴۶	۷-۱-۱ دنباله موسیقیایی و خطوط تحمیل شده
۴۸	۱-۷-۱-۱ خطوط تحمیل شده
۵۰	۲-۷-۱-۱ یک الگوریتم با قاعده
۵۱	۸-۱-۱ خطوط آمان
۵۴	۱-۸-۱-۱ تایل های تحمیل شده
۵۴	۲-۸-۱-۱ تایل های منفرد
۵۶	۳-۸-۱-۱ الگوریتم کلی
۵۶	۹-۱-۱ انواع ترکیب بندی رئوس
۵۷	۱-۹-۱-۱ آس
۵۸	۲-۹-۱-۱ دولو
۶۱	۳-۹-۱-۱ ستاره
۶۳	۴-۹-۱-۱ خورشید
۶۴	۵-۹-۱-۱ سرباز
۶۵	۶-۹-۱-۱ ملکه
۶۶	۷-۹-۱-۱ شاه

## فصل دوم : مواد و روشها

۶۹	۱-۲ توصیف شماتیک چگونگی طراحی شبه کریستال ها توسط قوانین انقباض و انبساط
۶۹	۱-۱-۲ قانون انبساط برای ساختار پنروز
۷۲	۲-۱-۲ شبه کریستال ها با تقارن هشت سویی
۷۵	۳-۱-۲ شبه کریستال ها با تقارن دوازده سویی

## فصل سوم : نتایج و بحث

۷۷	۱-۳ مقدمه
۷۸	۲-۳ معرفی ساختار ها و پارامتر های مورد استفاده در طراحی
۸۴	۳-۳ نتایج شبیه سازی و مشخصه های کانال های جدا سازی شده

۹۴

۹۴

۳-۴ نتیجه گیری

۳-۵ پیشنهادات

منابع

- شکل ۱-۱- بخشی از پوشش پنروز با سلولهای پایه لوزی های چاق و لاغر. قانون انقباض برای دو سلول پایه در پایین شکل نشان داده شده است. ۵
- شکل ۱-۲- هر تایل در شکل (۱-۱) همانطور که در پایین شکل فوق مشاهده می کنید با چندین پاره خط مشخص شده است. این پاره خطها به هم متصل می شوند و پنج سری خط موازی با فواصل شبه متناوب تشکیل می دهند که مکان آنها توسط معادله مشخص شده است. برخورد این خطوط شبه ساختار آمان را در بر دارد. ۶
- شکل ۱-۳- خطوط موازی با فواصل متناوب عمود بر محورهای تقارن (a) شش ضلعی (b) پنج ضلعی. فقط چند خط از سه سری نمایش داده شده اند. توجه شود که فواصل بین محللهای برخورد سری های اول و دوم با سری سوم برای شش ضلعی یکسان بوده ولی برای پنج ضلعی متفاوت بوده و نسبت فواصل برابر نسبت طلائی می باشد. ۷
- شکل ۱-۴- انقباض اسکیل نشده شبکه فیبوناچی. شبکه اصلی بالای همه نمایش داده شده است. انقباض بر اساس معادله انجام شده است. ۱۹
- شکل ۱-۵- نمایش تکنیک بدست آوردن دنباله یک بعدی شبه متناوب توسط تصویر از ساختار دویعدی. ۲۱
- شکل ۱-۶- دو نوع پوشش پنروز. بالا: ترکیب حاصل از انقباض. پوشش اصلی (خطوط پر رنگ). طوری چیده شده اند که در سمت راست نوع دیگری از پوشش پنروز را تشکیل دهند (خطوط کم رنگ). پایین: ترکیبی که برای تحمیل قوانین اتصال به کار برده می شود. براساس قانون اتصال یک جفت تایل می توانند در امتداد یک ضلع به هم متصل شوند. اگر ترکیب بندی نوار در محل اتصال پیوسته باشد. ۲۶
- شکل ۱-۷- سه نوع پوشش شبه کریستال. هر سه نوع از پنج شبکه با خطوطی که از معادله پیروی می کنند تشکیل شده اند. شکل بالائی:  $\tau = \sigma = \ell$  و  $\alpha$  و  $\beta$  مقادیری دارند پنروز را بدست می دهد. شکل وسطی:  $\tau = \sigma = \ell$  و  $\alpha$  و  $\beta$  مقادیری رندوم دارند. شکل پائینی:  $\ell = 2^{(-2.5)}$  و  $\sigma = 3^{(1.5)}$  این دوگان شبکه پنج تائی شبه متناوب غیر فیبوناچی است. ۲۹
- شکل ۱-۸- اعمال GDM به یک شبکه متناوب پنج تائی را نشان می دهد. نکته اصلی خط عمود می باشد که متعلق به شبکه صفرم است. تایلهای علامت گذاری شده در سمت راست دوگان نقاط علامت گذاری شده در سمت چپ می باشند. دایره ها برای نشان دادن برخورد نوع اول و مربع ها برای نمایش برخورد نوع دوم آورده شده اند. مختصات  $\gamma$  رئوس تایلهای علامت گذاری شده یک دنباله شبه متناوب را بدست می دهد. ۳۱

- شکل ۹-۱- مثالی برای ساختار اتمی پوشش پنروز که معادل قانون اتصال می باشد. ۳۷
- شکل ۱۰-۱- ترکیب خطوط آمان یک پوشش پنروز. ۳۸
- شکل ۱۱-۱- پوشش غیرادواری صفحه توسط کایت ها و دارت های پنروز. ۴۰
- شکل ۱۲-۱- (a) و (b) و (c) چرخ و فلکهای مرتبه اول و دوم و سوم می باشند. ۴۳
- شکل ۱۳-۱- کایت ها و دارت های پنروز. قوانین اتصال توسط ساختار رئوس بیان شده اند. ۴۴
- شکل ۱۴-۱- هفت ترکیب مجاز رئوس از کایت و دارت پنروز. ۴۵
- شکل ۱۵-۱- چپ: یک ساختار دو بعدی شامل اعداد صحیح با یک خط که با شیب  $\tau$  از آن عبور می کند. راست: خطی که مقادیر  $\tau$  که به عدد صحیح گرد شده اند. پائین: مقادیر عدد صحیح به فواصل تبدیل شده اند. ۴۷
- شکل ۱۶-۱- خطوط آمانی که با دو خط موازی که با فاصله بلند جدا شده اند تحمیل گردیده اند. ۴۹
- شکل ۱۷-۱- الگوریتم بدست آوردن خطوط تحمیل شده. ۵۰
- شکل ۱۸-۱- شکل یک دارت به همراه خطوط آمان و بردارهای عمود از هر راس بر خطوطی که بواسطه وجود دارت ثابت شده اند. ۵۱
- شکل ۱۹-۱- شکل یک کایت به همراه خطوط آمان و بردارهای عمود از هر راس بر خطوطی که بواسطه وجود کایت ثابت شده اند. ۵۲
- شکل ۲۰-۱- بردارهای عمود از رئوس بر خطوط آمان. ۵۳
- شکل ۲۱-۱- یک کایت که با خطوط آمان علامت گذاری شده است. خطوط پر رنگ یک متساوی الساقین را مشخص می کنند که این بیان کننده این حقیقت است که یک کایت در پوشش تحمیل شده است. ۵۵
- شکل ۲۲-۱- یک آس که با خطوط آمان مشخص شده است. آس توسط دارت تحمیل می شود. ۵۵
- شکل ۲۳-۱- ترکیبهای آس و خورشید همراه خطوط آمان. هیچ خط تحمیلی موازی وجود ندارد بنابراین هیچ تکه ای از تایلها توسط تایلهای غیر مجاور تحمیل نمی شود. ۵۷
- شکل ۲۴-۱- پیکره اولیه ساختار آس. ۵۸
- شکل ۲۵-۱- پیکره اولیه ساختار دولو. ۵۹
- شکل ۲۶-۱- تایلهای تحمیل شده توسط ترکیب رئوس دولو سایه زده شده اند. ۶۰
- شکل ۲۷-۱- پیکره اولیه ساختار ستاره. ۶۲
- شکل ۲۸-۱- بخشی از ساختار رئوس ستاره. ۶۳
- شکل ۲۹-۱- پیکره اولیه ساختار خورشید. ۶۴
- شکل ۳۰-۱- پیکره اولیه ساختار سرباز. ۶۵
- شکل ۳۱-۱- پیکره اولیه ساختار ملکه. ۶۶
- شکل ۳۲-۱- پیکره اولیه ساختار شاه. ۶۷
- شکل ۳۳-۱- استخراج ترکیبهای مختلف از داخل خطوط آمان. ۶۸



- شکل ۱-۲- چگونگی به کار بردن قوانین انبساط برای ساختار های کایت و دارت پنروز  
 به صورت شماتیک نمایش داده شده است. ۶۹
- شکل ۲-۲- لوزی های چاق و لاغر در ساختار پنروز. ۷۰
- شکل ۳-۲- پیچ اصلی پوشش غیرادواری پنروز. ۷۱
- شکل ۴-۲- ساختار شبه متناوب با تقارن هشت سوئی. ۷۲
- شکل ۵-۲- قانون انبساط برای پوشش هشت ضلعی آمان بینکر. ۷۳
- شکل ۶-۲- تکرار گامهای انبساط برای پوشش هشت ضلعی. ۷۴
- شکل ۷-۲- قانون انبساط استمفلی برای پوشش توسط مربع-مثلث در کلاس LI. ۷۵
- شکل ۸-۲- پیچ نهایی یک شبه کریستال با تقارن ۱۲ سوئی در کلاس LI. ۷۶
- شکل ۱-۳- میدان گوسین مدوله شده در سمت چپ و ۲۰ نقطه مشاهده در سمت راست  
 ساختار قرار دارند. دی ماکس ساختار ۱. ۸۰
- شکل ۲-۳- پروفایل ۳ بعدی ضریب شکست شبه کریستال با تقارن ۱۲ سوئی.  
 میله های هوا ( $n=1$ ) در موجبر سیلیکون نیتريد ( $n=2.04$ ). (ساختار ۱). ۸۰
- شکل ۳-۳- پروفایل ۲ بعدی ضریب شکست شبه کریستال با تقارن ۱۲ سوئی.  
 میله های هوا ( $n=1$ ) در موجبر سیلیکون نیتريد ( $n=2.04$ ). (ساختار ۱). ۸۱
- شکل ۴-۳- شماتیک ساختار ۲. میله های هوا در موجبر سیلیکونی. برای افزایش  
 پراکندگی تعداد میله ها نسبت به ساختار ۱ افزایش داده شده اند. ۸۲
- شکل ۵-۳- میدان گوسین مدوله شده در سمت چپ و ۱۴ نقطه مشاهده در سمت راست  
 ساختار قرار دارند. دی ماکس ساختار ۲. ۸۳
- شکل ۶-۳- پروفایل ۲ بعدی ضریب شکست شبه کریستال با تقارن ۱۲ سوئی.  
 میله های هوا ( $n=1$ ) در موجبر سیلیکون ( $n=3.59$ ). (ساختار ۲) ۸۳
- شکل ۷-۳- پروفایل ۳ بعدی ضریب شکست شبه کریستال با تقارن ۱۲ سوئی.  
 میله های هوا ( $n=1$ ) در موجبر سیلیکون ( $n=3.59$ ). (ساختار ۲) ۸۴
- شکل ۸-۳- کانال ۱ در نقطه مشاهده شماره ۱۴ با طول موج مرکزی ۰.۵۹۲ میکرومتر و کانال ۲ در  
 نقطه مشاهده شماره ۷ با طول موج مرکزی ۰.۵۹۹ میکرومتر و کانال ۳ در نقطه مشاهده  
 شماره ۸ با طول موج مرکزی ۰.۶۰۳۹ میکرومتر و کانال ۴ در نقطه مشاهده شماره ۳ با  
 طول موج مرکزی ۰.۶۱۱۳ میکرومتر رخ می دهند. ۸۵

شکل ۳-۹- چهار کانال جدا شده توسط ساختار ۱ دی ماکس به این صورت هستند که کانال ۱ در نقطه مشاهده شماره ۷ با طول موج مرکزی ۰.۵۸۶ میکرومتر و کانال ۲ در نقطه مشاهده شماره ۴ با طول موج مرکزی ۰.۵۹۰۸ میکرومتر، کانال ۳ در نقطه مشاهده شماره ۱۵ با طول موج مرکزی ۰.۶۰۲۲ میکرومتر همچنین کانال ۴ در نقطه مشاهده شماره ۱۷ با طول موج مرکزی ۰.۶۰۹۵ میکرومتر رخ می دهند.

۸۶

شکل ۳-۱۰- تداخل بین کانال های ۱ و ۲ حدود ۸ dB- و تداخل بین کانال های ۲ و ۳ بیش از ۳ dB- و نیز تداخل بین کانال های ۳ و ۴ تقریباً ۶.۵ dB- می باشد. (شکل بزرگ نمایی شده) (ساختار ۱).

۸۹

شکل ۳-۱۱- تداخل بین کانال های ۱ و ۲ حدود ۸ dB- و تداخل بین کانال های ۲ و ۳ بیش از ۳ dB- و نیز تداخل بین کانال های ۳ و ۴ تقریباً ۶.۵ dB- می باشد. (شکل بزرگ نمایی شده) (ساختار ۱).

۹۰

شکل ۳-۱۲- چهار کانال جدا شده توسط ساختار ۲ دی ماکس) کانال ۱ در نقطه مشاهده شماره ۶ با طول موج مرکزی ۱.۵۴۸ میکرومتر و کانال ۲ در نقطه مشاهده شماره ۹ با طول موج مرکزی ۱.۵۶۹ میکرومتر و کانال ۳ در نقطه مشاهده شماره ۳ با طول موج مرکزی ۱.۵۸۴۵ میکرومتر و همچنین کانال ۴ در نقطه مشاهده شماره ۱۳ با طول موج مرکزی ۱.۶۱ میکرومتر رخ می دهند.

۹۱

شکل ۳-۱۳- شماتیک حوزه دسی بل کانال های خروجی برای ساختار ۲.

۹۳

## فهرست جدول ها

شماره صفحه	جدول
۵۳	جدول ۱-۱-۱-اطلاعات مربوط به شکل ۱-۱۹ .
۵۸	جدول ۱-۲ . فواصل تحمیل شده خطوط آمان برای ساختار آس .
۵۹	جدول ۱-۳ . فواصل تحمیل شده خطوط آمان برای ساختار آس .
۶۲	جدول ۱-۴ . فواصل تحمیل شده خطوط آمان برای ساختار ستاره .
۶۴	جدول ۱-۵ . فواصل تحمیل شده خطوط آمان برای ساختار خورشید .
۶۵	جدول ۱-۶ . فواصل تحمیل شده خطوط آمان برای ساختار سرباز .
۶۶	جدول ۱-۷ . فواصل تحمیل شده خطوط آمان برای ساختار ملکه .
۶۷	جدول ۱-۸ . فواصل تحمیل شده خطوط آمان برای ساختار خورشید .
۸۷	جدول ۱-۳-۱-مختصات تمام نقاط مشاهده برای ساختار ۱ .
۹۲	جدول ۱-۳-۲-مختصات تمام نقاط مشاهده برای ساختار ۲ .

یکی از اساسی ترین ادوات مورد استفاده در مخابرات نوری دی ماکس ها می باشند. از مهمترین نکات در طراحی و ساخت این ادوات کوچکی اندازه آنها برای استفاده در مدارات مجتمع نوری (OICها) است. از آنجاییکه تاکنون از شبه کریستال های فوتونیک برای طراحی دی ماکس ها استفاده نشده طراحی با این ساختارها کاری نو بوده و از اهمیت بسیاری برخوردار است. هدف ما در این کار علمی جداسازی طول موج ها با کمترین فاصله کانال ها از هم و همچنین کمترین Cross-talk و کوچکترین سایز ساختار می باشد. برای طراحی دی ماکس ها از روش های متعددی در فوتونیک استفاده می شود. از مهمترین و معمول ترین روش ها استفاده از فوتونیک کریستال ها می باشد که تا کنون در ساخت و طراحی بسیاری از دی ماکس ها از این ساختارها استفاده شده است. همانطور که می دانیم در کریستال های فوتونیک به دلیل تغییر متناوب ضریب شکست و پراکنده شدن چند تائی فوتون ها شکاف های انرژی به وجود می آید و این امر باعث می شود که طول موج های خاصی که در این شکاف ها قرار می گیرند نتوانند از ساختار عبور کنند. با استفاده از همین شکاف های انرژی و همچنین معرفی ناراستی ها توسط از بین بردن تناوب ساختار و یا حذف میله از نقاطی خاص می توان برخی از طول موج ها که در این شکاف ها قرار می گیرند را تحریک نمود. ایده اصلی ما در این کار برگرفته شده از همین ایده ناراستی و همچنین ایده اثر سوپر پریزم<sup>۲</sup> می باشد.

تا کنون از شبه کریستال های فوتونیک برای طراحی دی ماکس استفاده نشده است ولی ما با استفاده از ایده های فوق الذکر توانستیم دی ماکس تمام نوری توسط شبه کریستال فوتونیک با تقارن ۱۲ سویی طراحی نماییم.

---

<sup>2</sup> Super prism effect

فصل اول

بررسی منابع

۱-۱- کریستال ها و شبه کریستال ها

۱-۱-۱- ساختار اتمی جامدات

عموما ساختار اتمی جامد خالص به دو کلاس تقسیم می شود [۱]:

۱- ساختار کریستالی

۲- ساختار شیشه ای

ساختارهای کریستالی بصورت کاملا منظم چیده شده اند. این ساختارها دارای نظم انتقالی رنج بلند می باشند<sup>۱</sup>. این ساختارها همچنین دارای نظم چرخشی رنج بلند<sup>۲</sup> و نیز دارای تقارن نقطه ای دورانی<sup>۳</sup> می باشند. در حالی که ساختار شیشه ای هیچکدام از این تقارنهای رنج بلند را دارا نمی باشد. بعنوان مثال یک شیشه فلزی<sup>۴</sup> توسط کره هایی که بصورت رندوم ولی با تراکم زیاد با هم پک شده اند مدل می شود. ساختار جدید اتمی که نوع جدیدی از فاز جامد در طبیعت را مشخص می سازد ساختاری شبیه کریستال است که نظم انتقالی رنج بلند و همچنین نظم چرخشی رنج بلند را دارا می باشد. گرچه نظم انتقالی متناوب نیست و همچنین این ساختار تقارن نقطه ای چرخشی نیز ندارد ولی ساختاری شبه پرئودیک می باشد. چون این ساختار شباهت زیادی به کریستال دارد کریستال شبه متناوب یا شبه

---

Long-range translational order

Long-range orientational order

Rotational point symmetry

Metallc glass



تابع چگالی جرم<sup>۱۰</sup> یک شبه کریستال شبه متناوب می باشد. یک تابع شبه متناوب است اگر آنرا توسط مجموعی از توابع متناوب بیان نمود بصورتیکه حداقل بعضی از دوره های تناوب غیر یکسان باشند (بایستی نسبت آنها اصم باشد). برای مثال تابعی که توسط رابطه (۱-۱) معرفی شده شبه متناوب می باشد.

$$f(x) = \cos(x) + \cos(\pi x) \quad (1-1)$$

حال برای بحث در مورد ساختار شبه کریستالها چند مفهوم جدید را در زیر تعریف می کنیم:

یک شبکه<sup>۱۱</sup> به مجموعه ای از تعداد نامحدودی منحنی غیر متقاطع در ۲ یا ۳ بعد گفته می شود. در ۲ بعد یک N-شبکه<sup>۱۲</sup> مجموعه ای از N شبکه است بطوریکه هر منحنی در N-شبکه با N-شبکه برای هر  $i \neq j$  دقیقاً در یک نقطه برخورد کند.

### ۱-۱-۲- شبه ساختار

یک شبه ساختار<sup>۱۳</sup> مجموعه ای از نقاط است که در محل برخورد کلاس خاصی از N-شبکه قرار می گیرد بصورتیکه ۳ خاصیت زیر را داشته باشد.

۱- نظم انتقالی شبه متناوب

۲- تقارن چرخشی

<sup>10</sup> Mass density function

<sup>11</sup> grid

<sup>12</sup> N-grid

<sup>13</sup> quasilattice



۳- شامل تعداد معدودی از اشکال سلول ورونی<sup>۱۴</sup> باشد

برای یک  $N$ -شبکه دلخواه هر منحنی داخل شبکه را می توان توسط یک عدد صحیح که اشاره به مکان ترتیبی آن منحنی در شبکه دارد اندیس گذاری نمود (بردار ستاره  $e_i$  که برای هر شبکه وجود دارد جهت ترتیبی مثبت آنرا مشخص می کند). هر کدام از فواصل بین خطوط شبکه توسط  $N$  عدد صحیح مشخص می شود  $k_i$  برای هر  $i \leq N$  و یک ناحیه باز که بین منحنی های شبکه قرار دارد و با جهت  $e_i$  مشخص شده و با  $k_i$  و  $k_i + 1$  اندیس گذاری می شود. تبدیل دوگان<sup>۱۵</sup> هر کدام از فواصل بین خطوط شبکه را به یک نقطه در فضای دوگان تبدیل می کند.

$$t = \sum_{i=1}^N k_i e_i \quad (2-1)$$

سری نقاط  $t$  در رئوس یک پک شبه کریستال شامل سلولهای پایه لوزوی با تقارن چرخشی که مربوط به بردارهای ستاره  $e_i$  هستند قرار می گیرند. تعداد بردارهای ستاره دوتایی یا سه تایی حداکثر تعداد اشکال متفاوت سلولهای پایه در

یک پوشش را مشخص می کند که برای دو بعد  $\frac{N(N-1)}{2}$  و برای سه بعد  $\frac{N(N-1)(N-2)}{3!}$  می باشد.

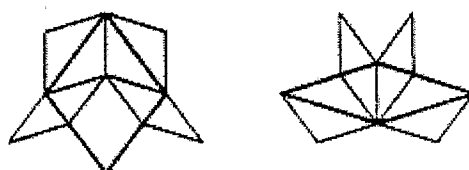
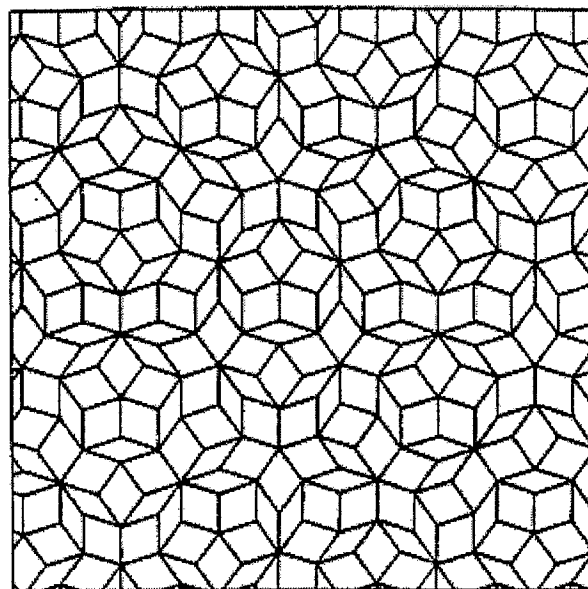
### ۱-۱-۲-۱- شبه ساختار آمان

القا و الهام مفهوم شبه کریستال ها از مطالعه مبسوط خواص پوشش دو بعدی پنروز<sup>۱۶</sup> حاصل می شود. ساختار پنروز در بخشهای بعدی بصورت کامل توضیح داده خواهد شد. شکل (۱-۱) یک ساختار پنروز را نشان می دهد.

<sup>14</sup> Voronoi cells

<sup>15</sup> Dual transformation

<sup>16</sup> Penrose 2D tiling



شکل ۱-۱- بخشی از پوشش پنروز با سلولهای پایه لوزی های چاق و لاغر. قانون انقباض برای دو سلول پایه در پایین شکل نشان داده شده است.

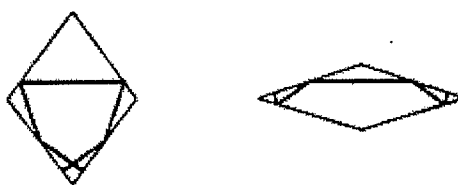
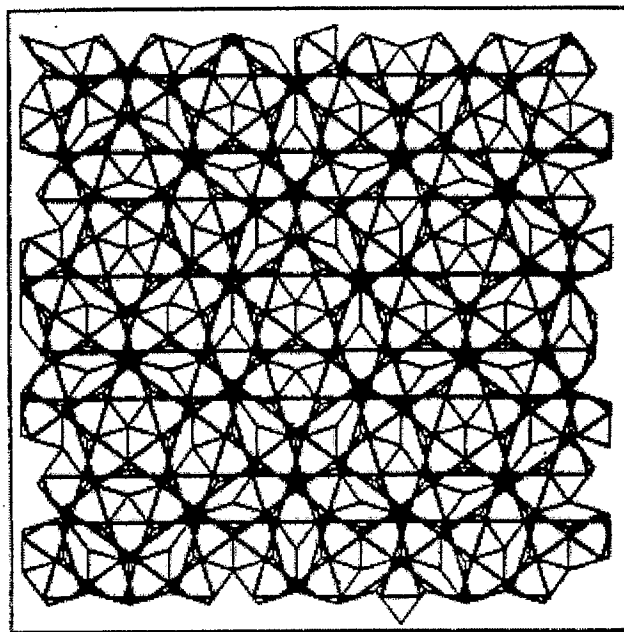
شبه متناوب بودن با مطالعه ترکیب بندی خاصی از تایلهای پنروز قابل مشاهده است. آمان نشان داد که اگر هر تایل مطابق شکل (۱-۲) توسط پاره خطهایی مشخص شوند سپس بر طبق قانون اتصال<sup>۱۷</sup> در یک ساختار پنروز قرار داده شوند این پاره خطها یک خط پیوسته که موازی با محورهای تقارن پنج ضلعی هست را تشکیل خواهند داد و این خطوط پیوسته یک N-شبکه را بوجود می آورند این N-شبکه بصورتی خواهد بود که یک شبه ساختار تشکیل

---

<sup>17</sup> Matching rule

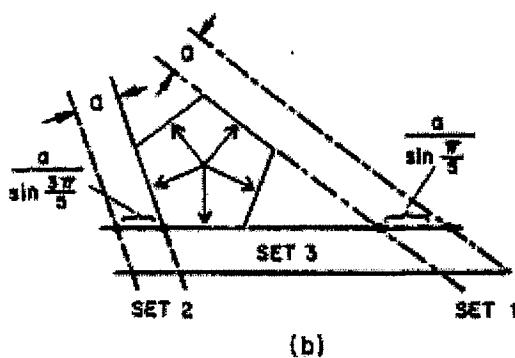
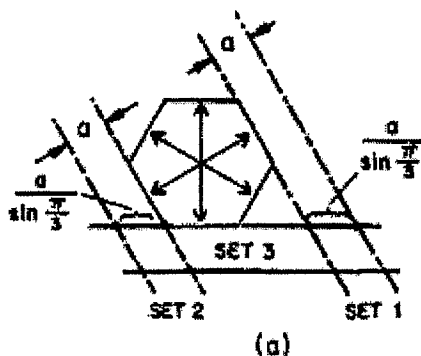
می دهد. برای تمیز این ساختار از شبه ساختارهای دیگر که ممکن است با هر نوع تقارن چرخشی یا انواع دیگر تقارن ها موجود باشند به آن شبه ساختار آمان گویند. مکان خط  $N$  ام شبکه از مبدا بصورت زیر بدست می آید.

$$x_N = N + \alpha + \frac{1}{\tau} \left[ \frac{N}{\tau} + \beta \right] \quad (3-1)$$



شکل ۱-۲- هر تایل در شکل (۱-۱) همانطور که در پایین شکل فوق مشاهده می کنید با چندین پاره خط مشخص شده است. این پاره خطها به هم متصل می شوند و پنج سری خط موازی با فواصل شبه متناوب تشکیل می دهند که مکان آنها توسط معادله مشخص شده است. برخورد این خطوط شبه ساختار آمان را در بر دارد.

حال ۵ سری خط موازی که به صورت متناوب عمود بر محورهای تقارن یک ۶ ضلعی و یک ۵ ضلعی قرار دارند را در نظر بگیرید در شکل (۱-۳) تعدادی از خطوط را برای موارد ۶ ضلعی و ۵ ضلعی نشان داده شده است.



شکل ۱-۳- خطوط موازی با فواصل متناوب عمود بر محورهای تقارن (a) شش ضلعی (b) پنج ضلعی. فقط چند خط از سه سری نمایش داده شده اند. توجه شود که فواصل بین محل‌های برخورد سری های اول و دوم با سری سوم برای شش ضلعی یکسان بوده ولی برای پنج ضلعی متفاوت بوده و نسبت فواصل برابر نسبت طلایی می باشد.

برخورد سری اول و دوم با سری سوم را در نظر بگیرید برای ۶ ضلعی فاصله بین نقاط برخورد برای هر سری یکسان است این نشان می دهد که ساختار متناوب با تقارن ۶ وجهی امکان پذیر است. در حقیقت نسبت فواصل بین نقاط