

## فراکتالها و کاربرد آنها در طراحی آنتن

ناصر یوسف زاده، مهدی جلالی و مصطفی پیله وری

دانشکده تحصیلات تکمیلی واحد تهران جنوب

[naseryousefzadeh@yahoo.com](mailto:naseryousefzadeh@yahoo.com) , [Jalali.mahdi@gmail.com](mailto:Jalali.mahdi@gmail.com) , [mostafapilevari@yahoo.com](mailto:mostafapilevari@yahoo.com)

چکیده: در این بخش تئوری فراکتالها و هندسه و کاربرد آنها در طراحی آنتن بررسی خواهد شد. و سپس انواع هندسه‌های رایج فراکتال در طراحی آنتنها و المانهای فراکتال و کاربرد هر کدام از آنها در طراحی یک نوع آنتن با کاربرد ویژه معرفی و ارائه می‌شود. و سپس کاربرد فراکتالها در طراحی آنتنهای آرایه‌ای فازی برای کاهش کوپلینگ متقابل میان المانهای آرایه و همچنین بسته‌بندی کردن المانهای بیشتری به داخل آرایه برای افزایش بهره *Scanning* مطرح خواهد شد. و در انتها نیز با یک مثال ثابت خواهد شد که با به کار بردن المانهای فراکتالی در یک آرایه کوپلینگ متقابل بین المانها کاهش پیدا می‌کند.

کلید واژه: آنتن آرایه‌ای فازی، فراکتال، کوپلینگ متقابل، المانهای آنتن فراکتال

هندسی ناصاف و کج و کوله تعیین کرد که می‌تواند به قطعات کوچکتر تقسیم شود که هر کدام یک کپی در اندازه کوچکتر از کل است.

ویژگیهایی که باعث شده است فراکتالها در طراحی آنتنها مورد توجه قرار گیرند عبارتند از:

- 1- خاصیت خود تشابهی<sup>2</sup>
- 2- توانایی آنها در محصور کردن یک منحنی با طول بینهایت در یک محیط محدود است (داشتن طول الکتریکی بسیار زیاد).

### 2- آشنایی با هندسه‌های رایج در طراحی آنتنهای فراکتالی

در این بخش مرور مختصری بر هندسه‌های رایج فراکتال که در توسعه طرحهای جدید آنتنها بکار برده می‌شود، خواهیم داشت. اولین فراکتال، Sierpinski gasket است [3] و [5]. چند مرحله

### 1- مقدمه

عبارت فراکتال<sup>1</sup> در سال 1975 از کلمه لاتینی Fractus (چشموش، سرسخت) به معنی Broken (بریده بریده) گرفته شد [1]. Benoit B. Mandelbort رابطه میان فراکتالها و طبیعت را با استفاده از اکتشافات Gaston Julia و Pierre Fatou و Felix Hausdoff بررسی کرد. او نشان داد که فراکتالهای زیادی در طبیعت وجود دارند و آن فراکتالها می‌توانند بطور دقیقی پدیده‌های طبیعی را مدل کنند. او گونه‌های جدیدی از فراکتالها را برای مدل کردن ساختارهای بسیار پیچیده مانند درختان و کوهها معرفی کرد. کار او زمینه مطالعاتی فراکتالها را ایجاد کرد [2]. Mandelbort یک فراکتال را بعنوان یک شکل

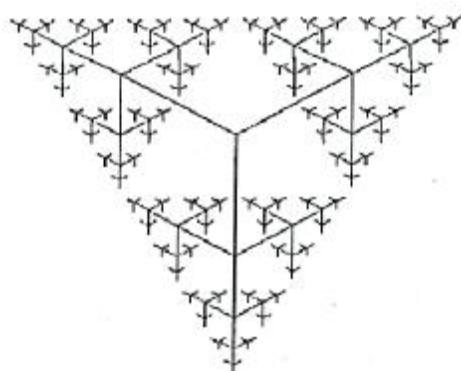
<sup>2</sup>Self-similar

<sup>1</sup> Fractal

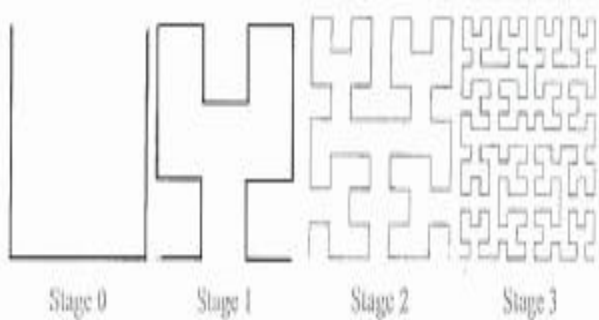
شکل 2: مراحل تشکیل فراکتال Koch Snowflake تا مرحله 3.

ساختار فراکتال Tree نیز در توسعه متدلوژی طراحی آنتنها و Frequency Selective Surface کاربرد زیادی دارد. یک مثال از فراکتال Tree سه شاخه در شکل زیر نشان داده شده است. این ساختار با نام Ternary-tree شناخته می‌شود که مشابه هندسه gasket می‌باشد. در حقیقت هندسه Ternary-tree نشان داده در شکل پایین می‌تواند بعنوان یک مدل سیمی برابر مرحله 3 Sierpinski gasket نشان داده شده در شکل 3 تعبیر شود.

همچنین خواص Space-filling فراکتال Hillbert آنها را برای استفاده در طراحی آنتنهای فراکتال مطرح ساخت. چهار مرحله اولیه در ساختار فراکتال Hillbert در شکل 4 نشان داده شده است [3] و [5]. فراکتال Hillbert مثالی از فراکتال با خواص Space-filling است که هیچ نقطه متقاطعی ندارد.

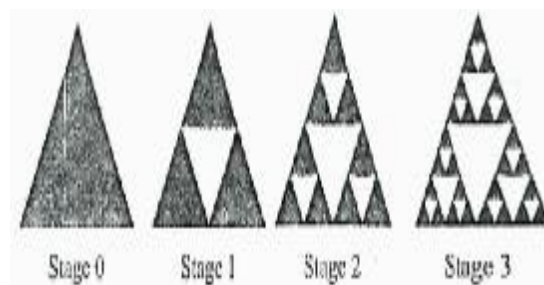


شکل 3: فراکتال Ternary-tree



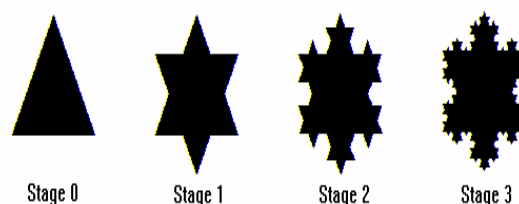
شکل 4: مراحل تشکیل فراکتال Hillbert

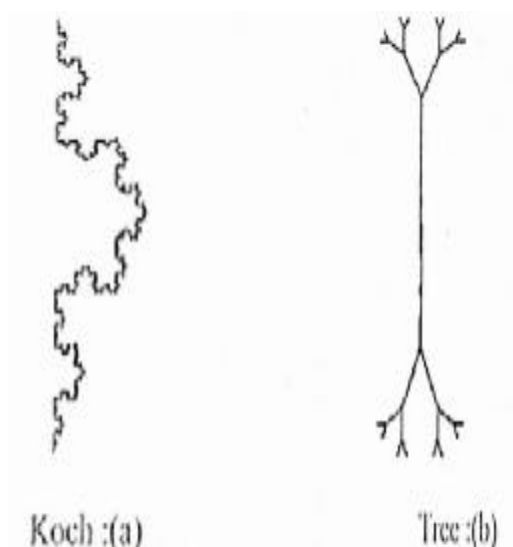
اولیه در ساختار Sierpinski gasket در شکل 1 نشان داده شده است. شیوه ساختن هندسی این فراکتال با یک مثلث متساوی‌الاضلاع در مرحله صفر شروع می‌شود. مرحله بعدی در ساختار، برداشتن مثلث مرکزی با نوکهایی که در نقطه میانی اضلاع مثلث اصلی نشان داده شده در شکل 6-7 است. این پروسه برای سه مثلث باقی مانده، همانگونه که در مرحله 2 شکل زیر مشخص شده است ادامه می‌یابد. فراکتال Sierpinski gasket بوسیله انجام دادن این پروسه تکرارپذیر به تعداد بینهایت بار ایجاد می‌شود. همانگونه که از شکل دیده می‌شود Sierpinski gasket یک مثال از فرکتال Self-similar است. از نقطه نظر طراحی آنتن، مثلثهای سیاه، هادی فلزی را نشان می‌دهند در حالیکه مثلثهای سفید نواحی که فلز آنها از بین برده شده است را نشان می‌دهد.



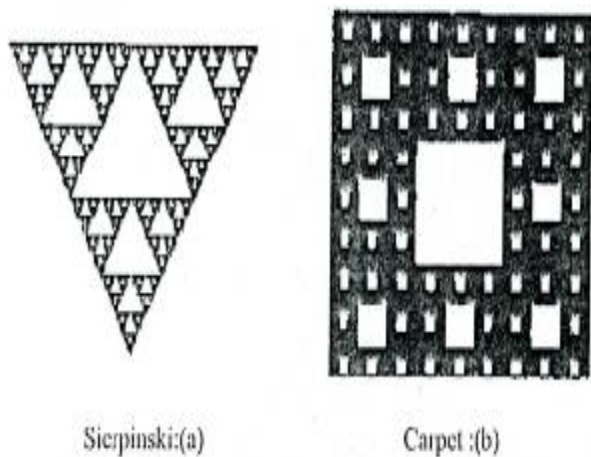
شکل 1: مراحل تشکیل فراکتال Sierpinski gasket تا مرحله 3

فراکتال رایج دیگر Koch Snowflake است [3] و [5]. همچنین همانگونه که در شکل 2 دیده می‌شود این فراکتال از یک مثلث متساوی‌الاضلاع آغاز می‌شود و بر عکس Sierpinski gasket، که بطور منظم با برداشتن مثلثهای کوچک و کوچکتر از ساختار اصلی ایجاد می‌شود، Koch Snowflake بوسیله اضافه کردن مثلثهای کوچک و کوچکتر به ساختار اصلی با یک روند تکرارپذیر ساخته می‌شود. این پروسه بطور مشخصی در شکل 2 نشان داده شده است.





شکل 6: فراکتال Koch و Tree بکار برده شده در طراحی آنتنهای دیپل. سرانجام ساختار Carpet Self-similar و Sierpinski برای گسترش المانهای آنتن چند بانده بهره‌گیری شده‌اند. شکل 7 این ساختارها را نشان می‌دهد.



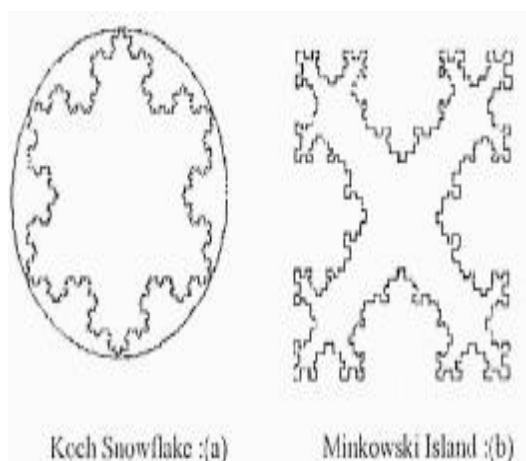
شکل 7: ساختار فراکتالهای Carpet و Sierpinski برای کاربردهای آنتنهای چند بانده

## 2-1- معرفی چند فراکتال بکار برده شده

برای بررسی اثرات اعمال هندسه فراکتال به مشخصات آنتن، چند فراکتال در این بخش معرفی می‌شود.

### الف - فراکتال Minkowski Island

بعضی هندسه‌های متداول فراکتال که کاربردهایی در طراحی آنتن‌ها پیدا کرده‌اند، در شکل 5 نشان داده شده است. Koch Snowflake و Minkowski Island عمدتاً برای توسعه و گسترش طرح‌های جدیدی برای حلقه‌های مینیاتوری شده و پیچ<sup>3</sup> و میکرواستریپ<sup>4</sup> استفاده شده‌اند.

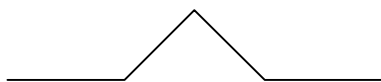


شکل 5: فراکتال Koch Snowflake و Minkowski Island

طرح‌های جدید دیپل مینیاتوری شده بر اساس گونه‌ای از منحنی‌های Koch و Tree گسترش داده شده‌اند که در شکل 6 نشان داده شده است.

<sup>3</sup> Patch

<sup>4</sup> Microstrip



شکل 9: مولد فراکتال Koch Snowflake

همانگونه که مشاهده می‌شود منحنی Koch بوسیله جانشینی ثلث وسطی هر بخش با یک مثلث متساوی‌الاضلاع حاصل می‌شود. منحنی منتهی از چهار بخش با طول برابر مقایسه می‌شوند. برای تعیین بعد فراکتال،  $k_1 = 2$  و  $h_1 = 3$  برای بخش افقی و  $k_2 = 2$  و  $h_2 = 3$  برای بخش مایل است.

$$2\left(\frac{1}{3}\right)^D + 2\left(\frac{1}{3}\right)^D = 1 \quad (3)$$

بنابراین بعد فراکتال Koch درجه یک برابر 1.2619 است. همچنین طول محیط این فراکتال از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Perimeter_n = \left(\frac{4}{3}\right)^n \cdot Perimeter_{Square Loop} \quad (4)$$

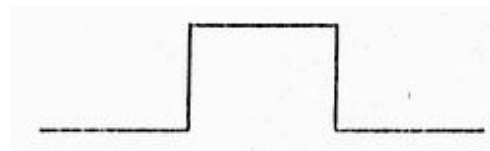
### 3- کاربرد فراکتالها

امروزه کاربرد فراکتالها در فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی، اقتصاد، زمین‌شناسی، پردازش تصویر، گرافیک کامپیوتری، طراحی آنتن ... گسترده شده است. استفاده از هندسه فراکتال در مسایل الکترومغناطیسی یک موضوع جدید و جالب شده است. تحقیق و بررسی برای بکارگیری این توابع ریاضی در مسایل scattering، تکنیکهای آرایه، کاهش دادن اندازه و آنتهای چند بانده می‌باشد. اخیراً سعی شده است از هندسه فراکتال در طراحی آنتنها بکار برده شود. استفاده از فراکتالها در طراحی آنتنها مزایایی دارد که طراحان را برای بکار بردن آنها ترغیب می‌کند.

هندسه فراکتال از نظر ریاضی پیچیدگی و ظرفتهای زیادی دارد. اما در اینجا سعی شده است با یک بررسی اجمالی، به کاربرد آن در طراحی آنتنها پرداخته شود [18].

### 3-1 مفهوم فراکتال بکاربرده شده در طراحی آنتنها

این فراکتال یک نوع فراکتال تکراری است که در طراحی آنتهای حلقوی کاربرد داشته و مولدی<sup>5</sup> به شکل زیر دارد:



شکل 8: مولد فراکتال Minkowski Island

این مولد که به هر مستقیم اعمال می‌شود آن خط را به سه قسمت مساوی تقسیم می‌کند و  $w$  که فاکتور عرض فرو رفتگی<sup>6</sup> نامیده می‌شود از 0 تا 1 می‌تواند تغییر کند. مثلاً اگر عرض فرو رفتگی را برابر 0.5 قرار دهیم به این معنی است که اندازه فرو رفتگی‌ها نصف اندازه هر یک از بخشهای مستقیم است یا به عبارت دیگر  $\frac{1}{6}$  اندازه خط مستقیم اولیه می‌باشد. ساختار حاصله پنج بخش برای هر یک از تکرارها دارد.

بعد فراکتال بوسیله استفاده از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$k_1\left(\frac{1}{h_1}\right)^D + k_2\left(\frac{1}{h_2}\right)^D = 1 \quad (1)$$

زیرنویسها برای تفاوت گذاشتن میان دو بخش حاضر در تکرارها مورد نیاز است. برای مثال  $k_1 = 3$  و  $h_1 = 3$  بخشهای افقی و  $k_2 = 2$  و  $h_2 = \frac{3}{w}$  بخشهای عمودی در مولد را نشان می‌دهند. بنابراین بعد فراکتال از نوع Minkowski به مقدار فاکتور عرض فرو رفتگی و تعداد تکرارها بستگی دارد. طول پیرامون این فراکتال بوسیله معادله زیر بدست می‌آید:

$$Perimeter_n = \left(1 + \frac{2}{3}w\right)^n \cdot Perimeter_{Square Loop} \quad (2)$$

که  $n$  تعداد تکرارهای تولید کردن است. از آنجا که جمله داخل پرانتز بزرگتر از 1 است، در نتیجه محیط فراکتال با افزایش تکرار، بطور نمایی زیاد می‌شود.

### ب- فراکتال Koch Snowflake

منحنی بوسیله مولد زیر حاصل می‌شود:

<sup>5</sup> Generator

<sup>6</sup> Indentation Width Scalling

چنین باند فرکانسی<sup>8</sup> کار می‌کنند، می‌باشد. کاربرد دیگر فرکتالها در آنتنهای کوچک<sup>9</sup> است.

تلاشهای بسیاری برای توسعه آنتنهای Wide- و Low-profile band انجام شده است که از آن جمله آنتنهای مستقل فرکانسی است [10]. یکی از خواص اصلی آنتنهای کلاسیک مستقل فرکانسی توانایی آنها برای بازگشت به همان شکل تحت اطلاعات قطعی مقیاس است که خاصیت خود تشابهی هندسه فراکتال است. چندین آنتن مستقل فرکانسی می‌تواند بعنوان آنتن فراکتال سازماندهی شود اگرچه آنها با فراکتالها ایجاد نشده‌اند. شکل 10 یک آنتن Log-periodic و آنتن Spiral را نشان می‌دهد که هر دوی آنها می‌توانند بعنوان آنتنهای فراکتال دسته‌بندی شوند.

فراکتالها برای مینیاتوری کردن آنتنها بوسیله بهره‌گیری از توانایی فاصله پر کردن، طول الکتریکی بزرگ در حجمهای فیزیکی کوچک می‌تواند استفاده شود [12] و [13]. همچنین از خاصیت خود تشابهی برای طراحی آنتنها استفاده می‌شود که خاصیت مشابه در باندهای فرکانسی مختلف وابسته به هندسه درجه‌بندی شده است. یک دسته از هندسه با خواص خیلی منحصر بفرد را ارائه می‌کنند که می‌توانند برای طراحیهای آنتن استفاده شوند.

فراکتالها نمای کرانی Space-filling هستند، به این معنی که اشکال الکتریکی بزرگ بطور موثری به داخل آرایه‌های کوچک بسته‌بندی می‌شوند. از آنجایی که طولهای الکتریکی نقش مهمی در طراحی آنتن بازی می‌کنند، این دسته‌بندی کردن کارا می‌تواند بعنوان یک تکنیک مینیاتوری خوب و عملی استفاده شود. مفهوم عمومی فراکتالها می‌تواند برای توسعه المانهای مختلف آنتن و آرایه‌ها بکار گرفته شود. بکارگیری فراکتالها برای المانهای آنتنهای رزونانسی کوچکتر، اجازه می‌دهد که Multi band/Broad band باشند. بکارگیری فراکتالها برای آنتنهای آرایه‌ای، آرایه‌های Multi band/Broad band را توسعه می‌دهد.

واقعیت اینست که اکثر فراکتالها پیچیدگی نامحدودی دارند و جزئیات می‌تواند برای کاهش اندازه آنتن و آرایه‌ها با مفهوم خودتشابهی برای اکثر فراکتالها طراحی شود. آنها

میان ابعاد آنتن و طول موج سیگنال ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. این امر معمولاً بعنوان یکی از قیود دست و پا گیر در طراحی آنتنها به شمار می‌آید.

هنگامیکه اندازه یک آنتن خیلی کوچکتر از طول موج عملکرد ساخته شود، راندمان آن آنتن به شدت کم می‌شود، مقاومت تشعشعی آن کاهش می‌یابد، در حالیکه بطور نسبی انرژی راکتیو ذخیره شده در مجاورت آنتن بشدت افزایش می‌یابد [7]. هر دو پدیده آنتن کوچک را برای تطبیق کردن با مدار تغذیه مشکل می‌سازد و هنگامیکه تطبیق شدند، آنها یک Q زیاد و یک عرض باند خیلی باریک را نشان می‌دهند. اصطلاحاً اینگونه از آنتنها را آنتنهای کوچک الکتریکی می‌نامند. Cohen بر اساس یک آنالیز روش عددی ممان، نشان داد که حلقه‌های فراکتال Minkowski یک فرکانس رزونانس پایین نسبت به اندازه الکتریکی آنها دارند [8] و [9].

آنتنها عموماً برای کار در یک بازه فرکانسی محدود (معمولاً 10 تا 40 درصد حول طول موج مرکزی) طرح می‌شوند. این امر اندازه آنتن را در حدود نصف یا ربع طول موج تحمیل می‌کند. این مسأله برای مدت زیادی بصورت یک محدودیت ذاتی بشمار می‌رفت تا اینکه در سال 1961 ایده آنتنهای مستقل از فرکانس (پهن باند) مطرح شد [10]. آنتنهای مارپیچی، آرایه‌های دو قطبی لگاریتمی متناوب و ... نمونه‌هایی از آنتنهای مستقل فرکانسی هستند. با طرح تئوری فراکتال توسط مندلبورت [2] ایده ساختار آنتنی مستقل از مقیاس<sup>7</sup> (و بنابراین مستقل از فرکانس) مورد توجه قرار گرفت. از ایده خود تشابهی در ساختارهای فراکتالی می‌توان برای طراحی آنتنها جهت بهبود نسبت اندازه آنتن به طول موج در آنها استفاده کرد. سال 1993 فراکتالها بعنوان کاندیدی برای طراحی آرایه‌هایی که در چند باند فرکانسی کار می‌کردند مطرح شدند. قبل از این Jaggard نشان داده بود که امواج الکترومغناطیسی در برخورد با سطوح فراکتالی دارای خواص ویژه‌ای می‌شوند [11]. امروزه مسأله مورد توجه در تحقیقات آنتنهای فراکتالی در زمینه آنتنهایی که در

<sup>8</sup> Multifrequency Antennas

<sup>9</sup> Scale Antennas

<sup>7</sup> Scale-Independent

مونوپل Sierpinski یک رفتار مشابه در چندین باند برای هر دو پترن تشعشعی و افت برگشتی<sup>13</sup> ورودی را توصیف می‌کند. فراکتالهای دیگر برای بدست آوردن آنتنهای چند باندهای UWB بررسی شده‌اند [17] و [18]. فایده عملی مهم یک آنتن فراکتال آن است که آن یک آنتن رزونانسی در فضای کوچکتر می‌باشد.

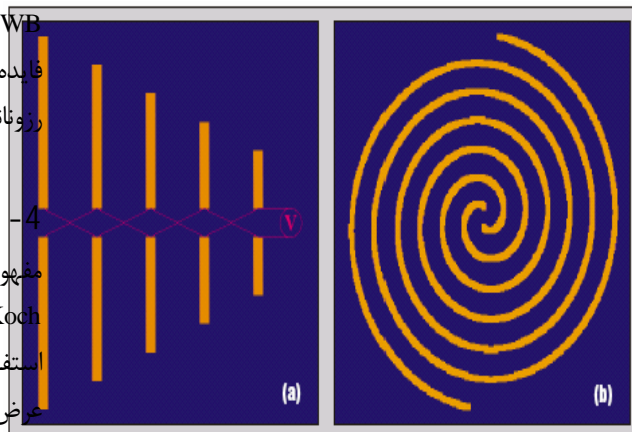
#### 4- المانهای آنتن فراکتال

مفهوم فراکتال می‌تواند برای کاهش اندازه آنتن از قبیل دای پل Koch، مونوپل Koch، حلقه Koch و حلقه Minkowski استفاده شود. همچنین مفهوم فراکتال می‌تواند برای رسیدن به عرض باند چندگانه و افزایش عرض باند هر باند تکی بواسطه خودتشابهی در هندسه از قبیل دای پل Sierpinski، پیچ و Conter Slot و دای پل درختی فراکتالی استفاده شود. در طرحهای دیگر، ساختار فراکتال برای رسیدن به پاسخ باند وسیع مانند Printed Circuit Fractal Loop استفاده‌شود. چند نمونه از المانهای آنتن فراکتال در شکل 11 نشان داده شده است.

همچنین مفهوم کلی فراکتال در طراحی و آنالیز آرایه‌ها بوسیله آنالیز کردن آرایه با استفاده از تئوری فراکتال با قرار دادن المانها در ترتیب فراکتال می‌تواند بکار برده شود. ترتیب فراکتال با المانهای آرایه یک آرایه نازک شده را می‌تواند ایجاد کند و به عملکرد چند باندهای می‌رسد.

آرایه خطی Cantor، آرایه حلقوی Cantor و آرایه صفحه‌ای Sierpinski Carpet در شکل 12 نشان داده شده‌اند.

می‌توانند به چندین باند فرکانسی برسند زیرا بخشهای مختلفی از آنتن مشابه با بقیه در مقیاسهای متفاوت هستند.



شکل 10: دو نمونه آنتن مستقل فرکانس. (a) آنتن Log-periodic و (b) آنتن Spiral

شکل 10: دو نمونه آنتن مستقل فرکانس.

خاصیت خودتشابهی فراکتالها، آنها را برای طراحی آنتنها با عملکرد باند خیلی وسیع<sup>10</sup> ممکن می‌سازد. اولین کاربرد فراکتالها برای طراحی آرایه‌های صفحه‌ای و خطی فراکتال، مرتب کردن المانها در یک پترن فراکتال برای کاهش تعداد المانها در آرایه و بدست آوردن آرایه‌های باند وسیع با عملکرد Multi band است. مزیت دیگر از این آرایه فراکتال همان خودتشابهی در ساختار هندسی آنها بمنظور توسعه الگوریتمها برای محاسبه سریع پترنهای تشعشعی آنها ممکن است بکار گرفته شود. این الگوریتمها بر اساس حاصلضرب مناسب نمونه‌ها برای فاکتورهای آرایه است و برای محاسبه، سریعتر از روش تبدیل گسسته فوریه<sup>11</sup> است [14].

Cohen اولین فردی بود که یک المان آنتن را با استفاده از مفهوم فراکتالها گسترش داد. او اثبات کرد که مفهوم فراکتال می‌تواند برای کاهش قابل چشمگیر اندازه آنتن بکار برده شود [15].

Puente توانایی چند باندهای<sup>12</sup> فراکتالها را بوسیله مطالعه رفتار مونوپل Sierpinski و دای پل اثبات کرد [16].

<sup>10</sup> Ultra Wide Band (UWB)

<sup>11</sup> Discrete Fourier Transform (DFT)

<sup>12</sup> Multi Band

<sup>13</sup> Return Loss

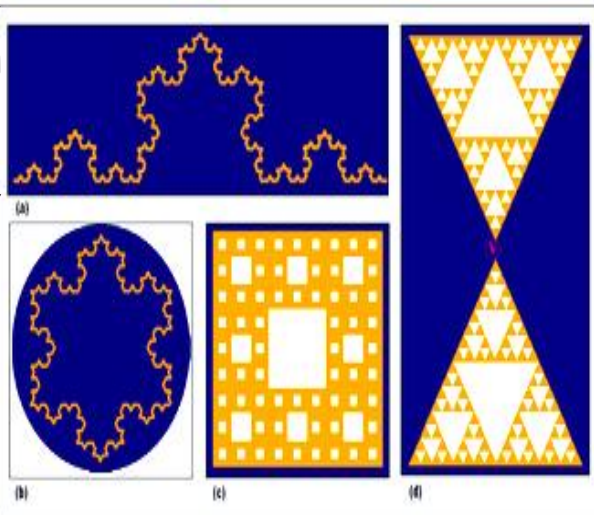


آرایه بسته‌بندی می‌کند. هر دوی این روشها منجر به زوایای اسکن عریض‌تر برای آرایه‌های فازی می‌شود. این برداشت با هر دو المانهای سیمی، حلقوی و المانهای پچ می‌تواند اثبات شود [1].

کوپلینگ متقابل میان المانهای یک آرایه خطی می‌تواند منجر به تنزل در پترنهای تشعشعی شود. که با بکار بردن فراکتالها می‌توان اثرات مربوط به کوپلینگ متقابل را کاهش داد [1].

#### 5-1- استفاده از المانهای آنتن فراکتال به منظور کاهش دادن کوپلینگ متقابل

کوپلینگ متقابل میان المانهای یک آرایه خطی می‌تواند منجر به تنزل در پترنهای تشعشعی شود. که با بکار بردن فراکتالها می‌توان اثرات مربوط به کوپلینگ متقابل را کاهش داد [1].



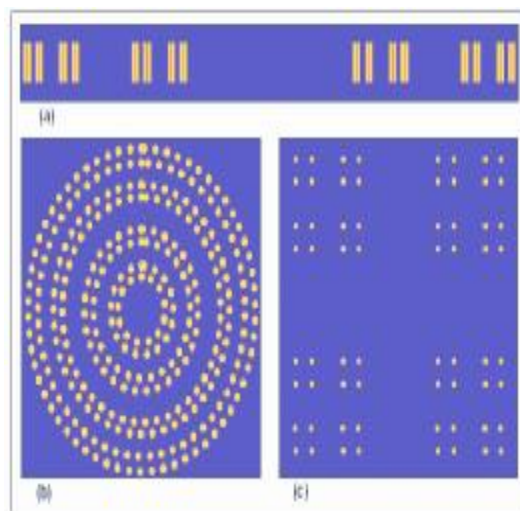
شکل 11: المانهای فراکتال.

#### 5-2- بسته‌بندی فشرده‌تر با المانهای مینیاتوری شده بمنظور بهره بیشتر Scan کردن

فراکتالها برای بسته‌بندی کردن المانهای رزونانسی بیشتر به داخل آرایه خطی می‌توانند استفاده شوند. اگر عرض سرتاسر یک آرایه ثابت باشد، بسته‌بندی کردن المانهای بیشتر به همان فاصله، که فاصله مرکز تا مرکز المانها کاهش می‌یابد این اجازه را می‌دهد که آرایه به زوایای کوچکتر اسکن شود. بعلاوه چون المانهای فراکتال در همان فرکانس رزونانس دارای ابعاد کوچکتر می‌باشند، فاصله لبه تا لبه المانها می‌تواند ثابت نگه داشته شود. نابراین این روش مقدار کوپلینگ متقابل میان المانها را افزایش نمی‌دهد.

مثال کاربردی که می‌تواند از این تکنیک بهره‌مند شود، یک آرایه خطی Flip-up است که به دیواره (پرده) متحرک یک کامپیوتر Lap Top وصل می‌شود. این نوع از آنتن Scanning فقط برای تشعشع اطراف یک اداره، با مینیمم کردن ارسال تشعشع به زمین و سقف می‌تواند استفاده شود. تکنک ارائه شده برای طراحی سیستم با بازدهی بالا می‌تواند بکار برده شود [1].

#### 6- فراکتال به عنوان المانهای سیمی آنتن

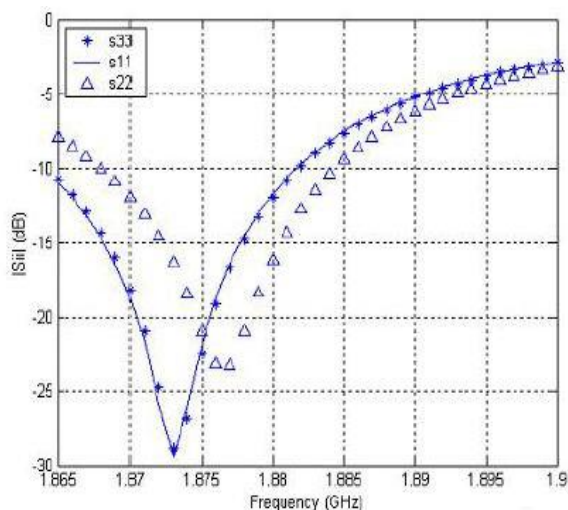


شکل 12: آرایه خطی Cantor، آرایه حلقوی Cantor و آرایه صفحه‌ای Sierpinski Carpt.

#### 5- کاربردهای جدید المانهای آنتن فراکتال در آرایه‌های خطی فازی

پیچیدگی خودمتشابه یک آنتن فراکتال، سرتاسر عرض المان آنتن در رزونانس را کاهش می‌دهد. دو روش برای استفاده کردن المانهای فراکتال برای بهبود دادن آرایه‌های خطی وجود دارد.

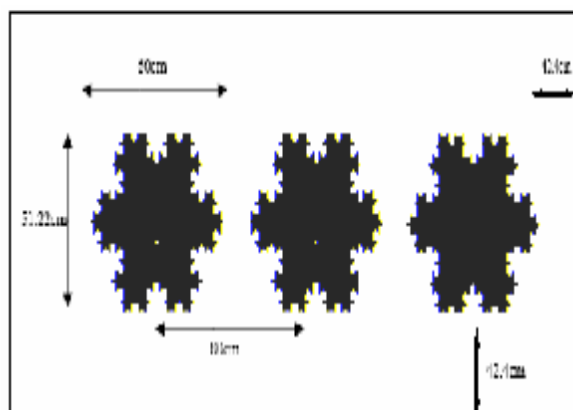
اولین روش بمنظور کاهش دادن کوپلینگ متقابل میان المانها می‌باشد. دومین روش المانهای بیشتری را به داخل



شکل 14: افت برگشتی آرایه 3 المانه با المانه‌های پچ مستطیلی.

با توجه به شکلهای 14 مشاهده می‌شود که افت برگشتی در حدود  $-26\text{dB}$  شده است.

طرح آرایه 3 المانه که در آن به جای المانه‌های مستطیلی از المانه‌های فراکتالی Koch استفاده شده است، در شکل 15 و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل 16 نشان داده شده است. با توجه به شکل 15 مشاهده می‌شود که با به کار بردن المانه‌های فراکتالی به جای المانه‌های مستطیلی افت برگشتی در حدود  $7\text{dB}$  کاهش یافته و به  $-33\text{dB}$  رسیده است و این نتیجه حاصل می‌شود که با به کار بردن المانه‌های فراکتالی کوپلینگ متقابل بین المانه‌ها نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

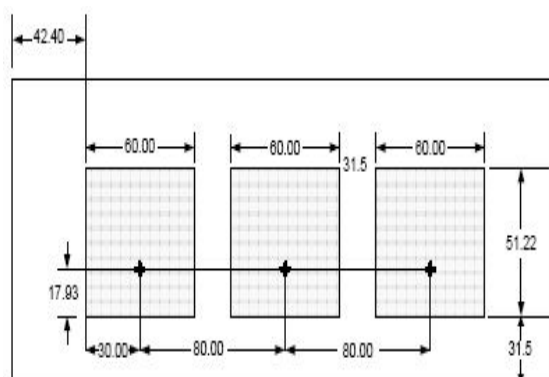


شکل 15: آرایه 3 المانه با المانه‌های پچ فراکتالی Koch.

یک فراکتال می‌تواند فضای اشغال شده بوسیله آنتن را بطور موثری پر کند. این منجر به کوپلینگ موثر انرژی از خطوط انتقال به فضای آزاد در حجم با افت می‌شود. هندسه فراکتال می‌تواند برای آنتنهای دای پل، مونوپل، حلقوی و پچ بکار برده شود. تشعشع کننده‌های حلقوی فراکتال با آنتنهای حلقوی خطی مقایسه می‌شوند.

## 7- نتایج حاصل از طراحی و شبیه‌سازی یک آنتن آرایه‌ای با المانه‌های فراکتالی و مقایسه نتایج با المانه‌های مستطیلی

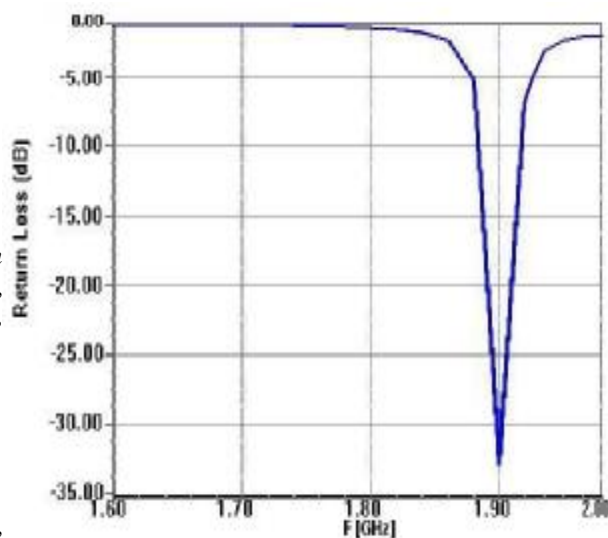
در این بخش یک آرایه پچ مستطیلی 3 المانه طراحی و شبیه‌سازی می‌شود و سپس به جای المانه‌های مستطیلی المانه‌های فراکتالی جایگزین خواهد شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنها با همدیگر مقایسه و ارائه می‌شود. طرح آرایه 3 المانه پچ مستطیلی در شکل 13 و نتیجه شبیه‌سازی آن در شکل 14 نشان داده شده است.



شکل 13: آرایه پچ مستطیلی 3 المانه.



- [2] Benoit B. Mandelbort, "The Fractal Geometry of Nature", New York, W. H. Freeman and Company, 1977.
- [3] H. O. Peitgen, H. Jurgens and D. Saupe, "Chaos and Fractals", New Frontiers of Science, New York, Springer-Verlag, 1992.
- [4] D. H. Werner and Raj Mittra, "Frontiers in Electromagnetics", IEEE press, 2000.
- [5] Douglas H. Werner and Suman Ganguly, "An Overview of Fractal Antenna Engineering Research", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 45, No. 1, Feb. 2003.
- [6] D. H. Werner, R. L. Haupt and L. Werner, "Fractal Antenna Engineering: The Theory and Design of Fractal Antenna Array", IEEE Antenna and Propagation Magazine, Vol. 41, No. 5, PP. 37-59, Oct. 1999.
- [7] C. Puente Baliarda, Jordi Romeu and A. Cardama, "The Koch Monopole: A Small Fractal Antenna", IEEE Transaction on Antenna and Propagation, Vol. 48, No. 11, PP. 1773-1781, Nov. 2000.
- [8] N. Cohen and R. G. Hohfeld, "Fractal Loops and Small Loop Approximation", Commun. Quart., PP. 25-36, Spring 1996.
- [9] N. Cohen, "Fractal Antenna: Part II", Commun. Quart., PP. 53-66, Summer 1996.
- [10] P. E. Mayes, "Frequency-Independent Antennas and Broad-Band Derivatives Thereof", Proc. Of The IEEE, Vol. 80, No. 1, Jan. 1992.
- [11] C. Puente and R. Pous, "Fractal Design of Multiband and Low Side-Lobe Arrays", IEEE Trans. Antenna and Propagation, Vol. 44, No. 5, PP. 1-10, May 1996.
- [12] C. Puente, C. J. Romeu, R. Pous, J. Ramis and Hijazo, "Small but Long Koch Fractal Monopole", IEEE electronics Letter, Vol. 34, No. 1, PP. 9-10, Jan. 1998.
- [13] John P. Gianvittorio, Yahya Rahmat-Samii and Jordi Romeu, "Fractal FSS: Various Self-Similar Geometries Used for Dual-band and Dual-Polarized FSS", Antenna and Propagation Society, Vol. 3, PP. 8-13, July 2001.
- [14] X. Yang, J. Chiochetti, D. Papadopoulos and L. Susman, "Fractal Antenna Elements and Array", Applied Microwave & Wireless, P. 34, Vol. 11.
- [15] N. Cohen, "Fractal Antenna Application in Wireless Telecommunications", Proceeding of Electronics Industries Forum of New England, PP. 43-49, 1997.
- [16] C. Puente-Baliarda, J. Romeu, R. Pous and A. Cardama, "On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna", IEEE Trans. On Antenna and Propagation, Vol. 46, PP. 517-524, April 1998.
- [17] M. Sindou, G. Ablart and C. Sourdois, "Multiband and Wideband Properties of Printed



شکل 16: افت برگشتی آرایه 3 المانه با المانه‌های پچ فراکتالی Koch

## 8- نتیجه

در این مقاله تئوری فراکتالها و هندسه و کاربرد آنها در طراحی آنتن بررسی شد. و سپس فراکتالها از نقطه نظر ریاضی و بعد آنها نیز مورد بررسی قرار گرفته و انواع هندسه‌های رایج فراکتال در طراحی آنتنهای و المانه‌های فراکتال و کاربرد هرکدام از آنها در طراحی یک نوع آنتن با کاربرد ویژه معرفی و ارائه شد. و سپس کاربرد فراکتالها در طراحی آنتنهای آرایه‌ای فازی برای کاهش کوپلینگ متقابل میان المانه‌های آرایه و همچنین بسته بندی کردن المانه‌های بیشتری به داخل آرایه برای افزایش بهره Scanning مطرح شد. و در انتها نیز یک آرایه پچ مستطیلی معرفی شد و به جای المانه‌های مستطیلی، المانه‌های فراکتالی به کار رفت و ثابت شد که افت برگشتی با به کار بردن المانه‌های فراکتالی کاهش یافته و در نتیجه کوپلینگ متقابل بین المانه‌ها نیز کاهش می‌یابد.

## 9- مراجع

- [1] John P. Gianvittorio and Yahya Rahmat-Samii, "Fractal Antennas: A Novel Antenna Miniaturization Technique and Application", IEEE Antennas and propagations magazine, Vol. 44, No. 1 Feb. 2002.



*Fractal Branched Antennas*", Electronics Letters, Vol. 35, No. 3, PP. 181-182, Feb. 1999.

[18] X. Yang and L. Susman, "*Wideband Printed Circuit Fractal Loop Antennas*", Digest of IEEE AP/URSI Symposium, 1999.