

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında, değerli bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, yüksek gerilim konularına olan ilgimi arttıran Sayın Hocam ***Doç. Dr. Mukden UĞUR' a*** teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu çalışmanın ortaya çıkmasında gerekli birikime sahip olmamda büyük katkıları olan Sayın Hocam ***Prof. Dr. Ayten KUNTMAN' a***; öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hep yanımda bulduğum aileme ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

HAZİRAN 2005

Cengiz Polat UZUNOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ	VI
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ	VI
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. YÜKSEK GERİLİM YALITIM MALZEMELERİ	3
2.1.1. Gazlar	3
2.1.2. Vakum	3
2.1.3. Sıvılar	5
2.1.4. Kompozitler	5
2.1.5. Katılar	6
2.2. YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİNDE KULLANILAN SENTETİK POLİMERLER	8
2.2.1. Polietilen (PE).....	9
2.2.2. Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE)	10
2.2.3. Polivinilklorür (PVC)	10
2.2.4. Elastomerler	10
2.2.5. Epoksi Reçineler	12
2.2.6. Alliller	12
2.2.7. Polyesterler	14
2.3. KATI YALITKANLARDA DELİNME	15
2.3.1. Yaşlanma	15
2.3.2. Kısmi Boşalma (Korona)	16
2.3.3. Kanal Oluşumu	17
2.3.4. Termik Delinme	17
2.3.5. Elektromekaniksel Delinme	21
2.3.6. Erozyon	22
2.3.7. Yüzeysel İz Oluşumu (Surface Tracking)	23
3. MALZEME VE YÖNTEM	26
3.1. FRAKTAL GEOMETRİ VE BOYUT	26

3.1.1. Fraktal Şekiller	27
3.1.2. Fraktal Boyut	29
3.2. BROWN HAREKETİ	35
3.2.1. Einstein matematiksel modeli.....	36
3.2.2. Fraktal ve Brown Hareketi.....	39
3.2.3. Brown Hareketi Modeli	40
3.2.4. Brown Hareketi ve olasılık teorisi	41
3.3. ÖRNEKLERİN YAPISI VE AŞINDIRMA SİSTEMİ	44
3.3.1. Eğik Düzlem Testi (Inclined Plane Test).....	45
3.3.2. Test Örneği	46
4. BULGULAR	49
4.1. TEST ÖRNEKLERİN FRAKTAL BOYUT AÇISINDAN İNCELENMESİ.....	49
4.1.1. Herhangi Bir Dış Etki Olmaksızın Elde Edilen Örnekler	50
4.1.2. Nem Etkisi Altında Elde Edilen Örnekler	51
4.1.3. Titreşim Etkisi Altında Elde Edilen Örnekler.....	54
4.2. BROWN HAREKETİ İLE MODELLEME	57
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	66
EK-A.....	66
EK-B.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Katı yalıtkanlarda delinme	15
Şekil 2.2: Isı giriş çıkışını bulmada kullanılan blok diagram	18
Şekil 2.3: Katı yalıtkanın sabit sıcaklık ısı delinme durumu düzeneği	20
Şekil 2.4: İçinde disk şeklinde bir boşluk bulunan yalıtkan malzeme.....	23
Şekil 2.5: Yüzey aşınımına etkiyen olaylar	24
Şekil 2.6: Yüzey aşınımı oluşmuş polimer örnekleri.....	25
Şekil 3.1: İterasyonla elde edilmiş şekil.	26
Şekil 3.2: Cantor Kümesi.....	28
Şekil 3.3: Koch Eğrisi.....	29
Şekil 3.4: Sierpinski Üçgeni	29
Şekil 3.5: Fraktal boyut hesaplama eğrisi.....	34
Şekil 3.6: Mikroskopik parçacığın Brown hareketi.....	35
Şekil 3.7: Parçacıkların Brown hareketi	39
Şekil 3.8: Parçacığın $\alpha=1$ verilerek elde edilen Brown hareketi.....	43
Şekil 3.9: Deney düzeneği	45
Şekil 3.10: Deney düzeneğinin şematik gösterilimi	46
Şekil 3.11: Deneylerde kullanılan test örneğinin boyutları	47
Şekil 4.1: Programın sonuç yapısı	49
Şekil 4.2: Herhangi bir dış etki olmaksızın elde edilen örnekler.....	50
Şekil 4.3: %40 nem etkisi altındaki örnekler.....	51
Şekil 4.4: %60 nem etkisi altındaki örnekler.....	52
Şekil 4.5: %80 nem etkisi altındaki örnekler.....	52
Şekil 4.6: %99 nem etkisi altındaki örnekler.....	53
Şekil 4.7: Nem etkisi altındaki örneklerin fraktal boyutları	54
Şekil 4.8: Düşük titreşime maruz kalan örnekler.....	55
Şekil 4.9: Orta titreşime maruz kalan örnekler.....	55
Şekil 4.10: Yüksek titreşime maruz kalan örnekler.....	56
Şekil 4.12: Katsayı değeri üç olan şekil	58

Şekil 4.13: Katsayı değeri yirmi olan şekil.....	58
Şekil 4.14: Katsayı değeri ondört olan şekil.....	59
Şekil 4.15: Katsayı değeri bir olan şekil.....	59
Şekil 4.16: Katsayı değeri dokuz olan şekil.....	60

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Katı yalıtkanların sınıflandırılması.	6
Tablo 3.1: Eukleides ve fraktal geometrilerinin karşılaştırılmaları.....	31
Tablo 3.2: Polyester örneklerin hazırlanmasında kullanılan farklı formüller	47
Tablo 4.1: Herhangi bir dış etki olmaksızın elde edilen örneklerin fraktal boyutları	51
Tablo 4.2: Nem etkisi altındaki örneklerin fraktal boyutları.....	53
Tablo 4.3: Nem etkisi altındaki örneklerin ortalama fraktal boyutları.....	53
Tablo 4.4: Nem etkisi altındaki örneklerin yüzeyde (yatayda) kapladığı genişlikler	54
Tablo 4.5: Yatay titreşim etkisi altındaki örneklerin fraktal boyutları.....	56
Tablo 4.6: Yatay titreşim etkisi altındaki örneklerin ortalama fraktal boyutları.....	56
Tablo 4.7: Titreşim etkisi altındaki örneklerin yüzeyde(yatayda) kapladığı genişlikler	57
Tablo 4.8: Nem etkisine göre bilgisayarda oluşturulan örnekler	60
Tablo 4.9: Yatay Titreşim etkisine göre bilgisayarda oluşturulan örnekler.....	60

ÖZET**POLİMERİK YALITKANLARDAKİ KAOTİK YÜZEYSEL AŞINIMLARIN
BROWN HAREKETİ İLE MODELLENMESİ**

Bu çalışmada elektrik endüstrisinde kullanılan polimerik yalıtkanlardaki kaotik yüzeysel aşınımın incelenmiş ve modellenmiştir. IEC 587 standartlarına uygun olarak eğik düzlem test düzeneğinde daha önceden elde edilmiş polimerik örnekler kullanılmıştır. Bu örnekler nem etkisini ve titreşim etkisini incelemek ve modellemek için kullanılmıştır. Bu örnekler fraktal boyut kavramıyla incelenip yorumlanmıştır. Daha sonra bu aşınımın Brown Hareketi ile modellenerek gerçekte oluşan şekillere benzer şekiller elde edilmiştir ve ortam şartlarının etkisi göz önüne alınmıştır.

SUMMARY

MODELLING OF CHAOTIC SURFACE TRACKING ON THE POLYMERIC INSULATORS WITH BROWNIAN MOTION

In this study, chaotic surface tracking on polymeric outdoor insulation materials of electrical industry were investigated and simulated. The polymeric samples according to the IEC 587 Inclined Plane Tracking Test Standard, which were processed before were used. These samples were used to examine moisture effect and vibration effect. Polymer samples were investigated by their fractal dimension. Last part of this study was about computer simulation of surface tracking patterns with Brownian motion just as original samples.

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacının artması ve teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler, elektrik endüstrisinde ihtiyaçların her bir durum için özelleşmesine yol açmıştır. Malzeme biliminde kaydedilen ilerlemeler sayesinde enerji sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin çeşitliliği de artmıştır. Bu durum, enerji sektöründe karşılaşılabilecek her durum için analiz yapma gereğini ortaya çıkarmıştır.

Bir yıldırım boşalması gerçekleştiğinde ortaya çıkan şekil, bir elektriksel boşalma izi, doğadaki doğal yapı şekilleri ve daha birçok yapı, bildiğimiz klasik matematikle incelenemez. Polimerik yalıtkanlardaki yüzey aşınımları da bu kategoriye dahildir. Hangi şartlar altında ne gibi yüzey izlerinin ortaya çıktığını incelemek için olasılık yasalarından yararlanılır.

Elektrik endüstrisinde kullanılan yalıtkan malzemeler beş grupta incelenirler. Bunlar gazlar, vakum, sıvılar, katılar ve kompozitlerdir. Katı yalıtkan malzemeler elektrik güç sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yüzyılın başından beri geniş bir şekilde kullanılan izolatörler; cam, seramik ve porselenden oluşmakta iken günümüzde bu katı yalıtkanlara polimerik katı yalıtkanlar da eklenerek elektriksel yalıtım endüstrisindeki yerini almıştır. Polimerik yalıtkanlar esnek, mekanik dayanımı yüksek ve hafif olmaları nedeniyle diğer katı yalıtkanlara göre daha çok tercih edilirler. Oldukça hafif bir malzemeden yapılmasına rağmen uzun süreli gerilimler altında kaldığında polimerik yalıtım malzemelerinde kanal oluşumu ve yüzey aşınımının meydana gelmesi hızlanmaktadır.

Yüzey aşınımı ve iz oluşumu yalıtkanın tamamında bozulmalara neden olabilen etkilere birisidir, bu sebeple yüzey aşınımını inceleyen birçok standart ve test yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada deneyler Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu Test standardına (IEC 587) uygun olarak daha önceden elde edilmiş örnekler kullanılmıştır. Örneğinin iz oluşum sürecine nem etkisi altında, titreşim etkisi altında polimerik

yalıtkan örneğın yüzey bozulmaları incelenmiştir. Daha sonra simölasyon yolu ile bu şekiller bilgisayar ortamında elde edilmiştir.

Yüzey aşınımları gibi rasgele olan şekilleri bildiğımız klasik boyut kavramıyla incelememiz mümkün değildir. Burada fraktal boyut kavramından yararlanılır. Fraktal geometri doğadaki kendi kendine benzeme özelliğine sahip yapılar için ortaya konulmuştur. Bu yapılar bulutlar, ağaclar, dağlar vb. yapılardır. Fraktal boyut bildiğımız boyut kavramının tersine tamsayı değerleri almaz. Yüzey aşınımlarını, incelemek için fraktal boyutlar kullanılmaktadır.

Rasgele bir yol izleyen şekillerin modellenmesi için Brown Hareketi etkili bir metottur. Brown hareketi, olasılık kanunlarını baz alarak ve belli yaklaşımlar yaparak bize yüzey aşınımlarına çok benzer izleri elde etmemizi sağlar. Brown Hareketi ile elde edilen şekiller fraktal geometrisine uyar.

Çalışmalar iki ana başlık altında yürütölmüştür. Bunlardan ilkinde, çeşitli ortam şartlarında elde edilmiş test örnekleri kullanılmıştır. Bu örnekler tarayıcıdan taratılıp aşınma şekilleri elde edilmiştir. Bu şekiller fraktal boyut hesaplayan bilgisayar programı sayesinde boyutlarına göre incelenmiştir. Çevre koşullarının etkisi fraktal boyutları ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmaların ikinci basamağında ise örnek şekilleri Brown Hareketi modeli kullanılarak bilgisayar programı sayesinde modellenmiştir. Bu şekiller fraktal boyut kavramıyla incelenmiştir. Gerçekte oluşan şekillerle Brown hareketi ile modellenen şekiller ilişkilendirilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. YÜKSEK GERİLİM YALITIM MALZEMELERİ

Elektrik endüstrisinde çok çeşitli yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Yalıtkan malzemelerde delinme dayanımı çok önemlidir. İyi bir katı yalıtkan malzemenin yüksek delinme dayanımının yanı sıra düşük dielektrik kayıp, yüksek mekanik dayanım ve sertliğe sahip olması, gaz katkıları ve nem içermemesi, ısı ve kimyasal etkileşimlere dayanıklı olması istenir. Bunların yanı sıra kullanıldığı bölgedeki ortam koşullarından etkilenmemeli, ozona, düşük su emilimine sahip olmalı, radyasyona karşı dayanıklı olmalı, higroskopik (nem tutucu) özelliğe sahip olmalı ve sıvı sızdırmamalıdır. Yalıtım malzemeleri gaz, vakum, sıvı, kompozit ve katı olmak üzere beş kategoride toplanabilir.

2.1.1. Gazlar

Normalde gazların çoğu iyi yalıtıcıdır. Bunun sonucu olarak hava ile yalıtım yüksek gerilim hatlarında ve açık hava devre kesicilerinde elektriksel güç endüstrisinin ilk yıllarından bu yana kullanılmaktadır. Yakın zamanda ise daha çok SF₆ gazı ve bu gazın diğer gazlarla (N₂, O₂, hava ve N₂O) olan karışımlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. İdeal gaz yalıtım malzemesi ucuz olmalıdır, kimyasal ve ısı olarak kararlı olmalıdır ve elektriksel baskı altında zehirli aşındırıcı veya yanıcı ürünler oluşturmamalıdır. İyi ısı transfer oranına ve ark söndürme özelliklerine sahip olmalıdır [1].

2.1.2. Vakum

Diğer dielektrik malzemelerle karşılaştırıldığında, ideal bir vakum, en yüksek olası dielektrik dayanımına sahip olması beklenir. Vakumda ortamında 10⁻² molekül/cm³'den daha az molekül bulunmalı ve serbest yolun uzunluğu metreler mertebesinde olmalıdır. Böyle bir vakumda elektrotlar arasındaki bir elektron hiçbir çarpışma yaşamadan birkaç

cm ilerleyebilir. Çarpışma işlemi gerçekleşmediği için vakum ideal bir yalıtkan gibi davranır. Buna karşın pratikte vakumda bulunan metalik ve yalıtkan yüzeyler ve tutulan gaz ve yağ buharları vakumu kirletir. Vakumun bir delinme eşiği mevcuttur, çünkü elektrotlardan kopan ve kirlilik nedeni ile oluşan taşıyıcılar, elektrik alanla hızla artarlar ve vakumu delerler. Buna karşın iyi bir tasarım yapılarak vakumun delinme dayanımı diğer dielektrikler arasında yine de oldukça yüksek noktalarda tutulabilir. Bu nedenle vakum hala daha çok yüksek elektrik alanların yer aldığı uygulamalarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Vakumun yalıtkan olarak uygulamada kullanıldığı yerler arasında elektron mikroskopları, X ışını tüpleri ve parçacık hızlandırıcıları bulunmaktadır. En önemli ve yaygın kullanım alanı güç sistemlerindeki vakumlu devre kesicilerdir.

Vakumdaki elektron emisyonu ile öncül delinme çok küçük bir aralıkta gerçekleşir ($<2\text{mm}$). Vakuma sürekli şekilde uygulanan gerilim arttırılırsa, ortamdaki elektronların hareketi ile küçük bir akım akmaya başlar. Daha büyük aralıklarda ($>10\text{mm}$) bu küçük akımların yanı sıra microcoulomb (μC) seviyesinde yüke sahip darbe akımları da görülür. Gerilim seviyesi biraz daha arttırılırsa bu mikro boşalmalar kaybolur ve sürekli bir akım akmaya başlar. Hem küçük hem de büyük aralıklarda gerilimde sonradan oluşan bir artma vakumun delinmesine neden olur. 2-10 mm aralığında hem öncül delinme hem de darbe akımlarının etkisi birlikte görülür ve delinmeye ayrı ayrı etkir.

Uzun yıllar yapılan çalışmaların sonucunda öncül delinmenin elektrot yüzeyinde yer alan metalik sivri uçlardan başladığı ve akım belli bir değeri aştıktan sonra da delinmeye neden olduğu görülmüştür.

Fakat son yıllardaki deneysel çalışmalar bu sivri uçların yanı sıra, elektrot yüzeyine yapışmış kirlilik veya yalıtkan-yarı iletken yüzey oksitlerinin oluşturduğu elektron emisyonun da delinmeye neden olduğu gözlenmiştir. Burada aynı şekilde öncül delinmeyi açıklamak için bir metal olmayan emisyon mekanizması da kullanılmaktadır.

2.1.3. Sıvılar

İdeal sıvı yalıtım malzemeleri yüksek dielektrik dayanım, ısıl dayanım ve termal iletkenlik değerlerine sahip olmalıdır. Aynı zamanda düşük oranda kayıp faktörü, viskozite ve yoğunluk değerleri de beklenen önemli karakteristik özelliklerdendir. Yalıtkan sıvı bozulmamalı, yanıcı olmamalı, zehirli olmamalı ve kimyasal olarak kararlı olmalıdır, gazlarda olduğu gibi ark söndürme yeteneğine sahip olmalıdır. Bütün bu özellikleri barındıran sıvı yoktur. Alkenler, sikloalkenler ve aromatikler geçen yüzyılda en çok kullanılan sıvı yalıtım malzemeleri olmuştur. Bir başka sıvı sınıfı ise transformatörlerde ve kondansatörlerde kullanılan PCB denilen sıvılardır. Bunlar mükemmel alev direncine ve iyi elektriksel özellikler sahiptirler. Bunlar benzen veya bipenil türevleridir. 1970'lerde bu sıvıların sağlık üzerinde olumsuz etkileri ortaya çıkmış ve birçok yerde kullanımı ve üretimi yasaklanmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarla aynı özelliklere sahip ama ekolojik dengeyi bozmayan sıvılar (silikon yağlar ve sentetik hidrokarbonlar) geliştirilmiştir [1-2].

2.1.4. Kompozitler

Birçok mühendislik uygulamasında tek bir sınıf yalıtım malzemesi yerine birden fazla malzeme birlikte kullanılır ve buna da kompozit (hibrid) tipte yalıtım sistemi denir. Böyle sistemlere örnek olarak katı-gaz yalıtımlı iletim hatları verilebilir. Bu tür katı-gaz sistemlerinde sistemi belirleyen sistemin en zayıf noktası olduğu için sistem dizaynı önemlidir. Katı-sıvı kompozit yalıtımlı sistemlere örnek olarak yüksek gerilim kablolarında, transformatörlerde ve kondansatörlerde kullanılan yağ emdirilmiş kağıt bantlar verilebilir. Ayrıca güç kondansatörlerindeki yağ emdirilmiş metal katkılı plastik filmler de bu kategoriye aittir. Kompozit uygulamalarında önemli olan mekanik, termal ve elektriksel baskı altında bütün bileşenlerin kimyasal olarak kararlı olması ve birbiri ile reaksiyona girmemesidir. Kompozit yalıtım sistemini oluşturan bileşenlerin yaklaşık aynı dielektrik sabitlerine sahip olması istenen bir durumdur. Bunun sebebi elektrik alan altında kompozitin dielektrik davranışını her değer için kararlı kılmaktır. Sıvı yalıtkan, katı yalıtkan malzemeden yabancı maddeleri emerse direnç değerinde, dielektrik dayanımında, kayıp faktöründe ve diğer özelliklerinde bozulmalar oluşabilir [1-2].

2.1.5. Katılar

Katı yalıtkan malzemeler elektrik güç sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Katı dielektriklerin delinme dayanımı sıvı ve gazlara oranla daha yüksektir. İdeal bir katı yalıtkan gazlar veya sıvılar için bahsedilen özellikleri sağlamalıdır. Bunların yanı sıra kullanıldığı bölgedeki ortam koşullarından etkilenmemeli, ozona, düşük su emilimine ve radyasyona karşı dayanıklı olmalı, higroskopik esnekliğe sahip olmalı ve sıvı sızdırmamalıdır. Katı yalıtkanlar organik, inorganik ve sentetik polimerler olarak kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılabilir.

Tablo 2.1: Katı yalıtkanların sınıflandırılması.

İnorganik	Organik	Sentetik Polimerler	
		Termoplastik	Termoset
Seramik	Kehribar	Perspeks	Epoksi Reçine
Cam	Kağıt	Polietilen	Fenolikler
Mika	Mukavva	Polipropilen	Melamin
Fiberglass	Kauçuk	Polisitren	Ürefermaldehid
Emaye	Tahta	Polivinilklorür (PVC)	XLPE
Porselen	Reçine	Poliamid	Elastomerler
		Polikarbonat	Aliller

2.1.5.1. İnorganik Katı Yalıtkan Malzemeler

İnorganik malzemelerin 250°C ye kadar elektriksel ve mekanik özelliklerini koruyabilmeleri mümkündür. Kompakt yapıları nedeniyle yağ ve verniği emmezler. İnorganik katı yalıtkanların üretimi çok güç olmasına karşın genelde oldukça iyi yalıtım sağlarlar. Elektrik endüstrisinde kullanılan ilk yalıtkan seramik malzemeden imal edilen izolatörler olmuşlardır.

Seramik inorganik malzemeler, yüksek sıcaklıkta monolitik yapılara mineral katılması ile gerçekleştirilir. Dielektrik sabitlerine göre iki gruba ayrılırlar, $\epsilon_r < 12$ olanlar düşük bağıl dielektrik sabitli seramiklerdir ve genelde yalıtım amaçlı kullanılırlar. $\epsilon_r > 12$ olanlar ise yüksek bağıl dielektrik sabitli seramiklerdir, kapasitelerde ve algılayıcılarda kullanılırlar [1-2].

Porselenler, içinde gaz habbecikleri bulundurmama özelliği, korozyona dayanıklılık ve tüm alkalilere ve asitlerin pek çoğuna karşı kimyasal olarak reaksiyona girmemeleri ve çevresel kirliliklere karşı dayanıklılıkları ile bilinirler [1,4].

Cam bilinen en eski yalıtım malzemesidir. Katılaştırma sırasında kristalleşmez. Yüzey akımları düşüktür ve yüksek sıcaklıklarda güneş ışığını geçirdiği için ısıya karşı dayanıklıdır. Camın bağıl dielektrik sabiti 3.7 ile 10 arasında ve yoğunluğu 2.2 ile 6 gr/cm³ arasında değişir. Havai hat izolatörlerinde, transformatörlerde, kapasite ve devre kesicilerinde kullanılmaktadır [1, 2, 4].

Mika kristal yapısı itibarıyla ince tabakalar haline dönüştürülebilmektedir. Üst üste getirilen bu tabakalar hava boşluklarını ve dolayısıyla kısmi boşalmaları önlerler. Mika oda sıcaklığında 1000 kV/mm'ye kadar yüksek dielektrik dayanıma sahiptir. Düşük dielektrik kayıp (0.001), yüksek sıcaklıklara dayanım (650°C) ve iyi mekanik dayanıklılık gibi özellikleri vardır. Döner makinelerde stator yalıtımında, transformatör sargılarında, devre kesicilerde, anahtarlarda, ark bariyerlerinde ve fincanlarda kullanılırlar [1, 4].

2.1.5.2. Organik Katı Yalıtkan Malzemeler

Organik katı yalıtkan malzemeler bitkisel veya hayvansal kökenli malzemelerdir. İyi yalıtım özelliklerine sahip olmalarına karşın 100°C'nin üzerindeki çalışma sıcaklıklarında bu özelliklerini yitirirler. Yağ emdirilmiş kağıt yalıtkan ve mukavvalar kablolar, kapasiteler, transformatörler ve panellerde kullanılırlar. Tahta, kağıt, mukavva önemli organik katı yalıtkan malzemelerdir.

Yalıtım amaçlı kullanılan kağıtlar, genelde Kraft kağıdı olarak tanımlanmaktadır. Kalınlığı ve yoğunluğu uygulanacak yere göre farklılık gösterir. Düşük yoğunluklu kağıtlar ($0,8 \text{ gr/cm}^3$) yüksek frekans kapasite ve kablolarında kullanılırlar. Orta yoğunluklu kağıtlar güç kapasitelerinde, yüksek yoğunluklu kağıtlar ise enerji depolama kapasitelerinde ve doğru akım makinelerin yalıtımında kullanılmaktadırlar.

Kağıt sıvı emme özelliğine sahip bir malzemedir. Bu nedenle kurutulmalı ve mineral yağ, sentetik yağ veya bitkisel yağlar emdirilerek kullanılmalıdır. Kağıtlar sert kağıtlar ve yumuşak kağıtlar olarak üretilirler. Sert kağıtlar, kağıdın epoksi ve fenolik reçinelerle kompres yapılmasıyla elde edilirler. Malzemeyi desteklemek veya yalıtkan bariyer olarak kullanılırlar. Yumuşak kağıtlar, emdirme işleminden sonra trafolar ve fincanlarda kullanılırlar [1].

Tahta kolay işlenebilen ve mekanik dayanımı yüksek olan bir yalıtkan maddedir. Kurutulmuş, laklanmış ve yağ emdirilmiş olarak kullanılırlar [1].

2.2. YÜKSEK GERİLİM TEKİNİĞİNDE KULLANILAN SENTETİK POLİMERLER

Polimerler; çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. “Poli” Latince bir sözcük olup çok sayıda anlamına gelir. Polimerler “monomer” denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Polimerler genelde iki grupta incelenirler, termoplastikler ve termosetler. Termoplastiklerin erime sıcaklıkları düşüktür ($100\text{--}120^\circ\text{C}$) buna karşın esnek olmaları sebebi ile erime sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda kalıplanabilir ve işlenebilirler. Bu özellikleri nedeniyle termoplastikler yüksek gerilim kablolarının yalıtımında kullanılırlar. Termoset polimerler ise ısı ile bir kez şekil alırlar ve şekil aldıktan sonra işlenemezler. Mekanik dayanımları ve sertlikleri termoplastiklere göre daha iyidir. Epoksi 1947 de yalıtkan olarak kullanılmaya başlanmıştır. Fenoliklerle kombinasyonları epoksileri daha kullanışlı termoset bileşikleri haline getirmiştir. 1950’de mükemmel dielektrik özellikleri ve korona dayanımı ile polikarbonat kullanılmaya başlanmıştır. 1973 yılında polietersülfon reçineler 180°C ye kadar olan çalışma sıcaklığı ile yalıtımda

kullanılan dielektrik malzemeler arasına girmiştir. 1980 yılında poliakrilat ve polietereeterketon (PEEK) içeren 200°C ye kadar olan çalışma sıcaklığı ve su geçirgenliğine karşı yüksek dayanımları ile özel reçineler kullanılmaya başlanmıştır [1, 6].

2.2.1. Polietilen (PE)

Polietilen kablo endüstrisinde yaygın olarak kullanılan termoplastik polimerdir. Etilenin (C_2H_4) polimerizasyonu ile elde edilirler. Uzun zincir halindeki polietilen molekülleri birbirleri ile kimyasal olarak bağlı değildirler. Bu nedenle oda sıcaklığında sert, fakat daha yüksek sıcaklıklarda akışkan sıvı haldedirler. %95 kristallenmeye sahip amorf katıdırlar. Kristallenmenin artması ile çekme dayanımları, rijitlikleri ve kimyasal dayanımları artar. Polietilenin özellikleri çeşitli katkılayıcılar ve dolgu malzemeleri kullanılarak değiştirilebilir. Bunlar aminler, fenoller ve fosfitlerdir. Kablolarda kullanılan polietilenler kabloda yer alan iletken kısım ile temas halinde olduğu için polietilenin metalle reaksiyona girmesini önleyen katkı maddeleri içerirler. Böylece bakır iletken ve ekranla temas halindeki polietilenin reaksiyona girmesi önlenir. Alev önleyici özelliklerini arttırmak amacı ile antimonoksit, alüminyumtrihidrat ve halojen bileşikler katkı maddesi olarak kullanılır. Reaksiyon işlemlerine bağlı olarak polietilenler düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) veya yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) olarak üretilirler. LDPE nin tipik kristallenmesi %45 – 55 arasında gerçekleşirken bu değer HDPE için %70-80 arasındadır. HDPE nin delinme dayanımı ve dielektrik sabiti LDPE den daha yüksektir. İnce film halindeki HDPE için delinme dayanımı seviyesi 200 kV/mm den daha fazladır.

PE polar gruplar içermediği için dielektrik sabiti düşüktür ve kayıp faktörü de oldukça düşüktür. Özdirenci $10^{14} \Omega m$ dir ve çalışma sıcaklığı -50°C ve 75°C arasındadır [1, 3, 6].

2.2.2. Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE)

Polietilenin moleküllerinin çapraz bağlanmasıyla elde edilir. 125°C ye kadar çalışma sıcaklığına sahiptirler. Yüksek akım taşıyan kabloların yapımında kullanılırlar. 250°C civarında özelliklerini yitirirler. Polietilene nazaran aşınmaya karşı daha dayanıklıdır. Polietilenden bir diğer farkı da fiziksel özelliklerini yitirmeden daha fazla oranda katkı yapılabilir. Bölgesel boşalmalara karşı daha dayanıklı ve uzun ömürlüdürler. Üretim aşaması sırasında 1-30 µm boyutlarındaki boşlukların oluşması kaçınılmazdır ve görülen bölgesel boşalmaların oluşma sebebi de bunlardır [1, 3].

2.2.3. Polivinilklorür (PVC)

1930'lu yıllardan beri kablo yalıtkanı olarak ve son dönemde de dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Vinilklorürün polimerizasyonu ile elde edilirler. PVC'nin tipik olarak %56.8'i klorür içerir ve bu değer % 67'ye kadar çıkartılabilir. PVC'nin elektriksel endüstride kullanılan türünde %50 PVC, %25-35 arası plastikler ve kalan kısmı da katkılayıcılardan oluşur. Çalışma sıcaklığı 105°C'ye kadar uygundur ve delinme dayanımı 30 kV/mm'den küçüktür. Oda sıcaklığında kayıp faktörü kullanılan katkılayıcıya bağlı olarak 0.002-0.1 arasında değişir. Bu zayıf karakteristik özelliği nedeniyle PVC orta gerilim kablo yalıtkanlarında 10 kV mertebesinde uygulama alanı bulmuştur. Buna karşın 1 kV çalışma geriliminin altındaki değerlerde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra yüksek gerilim kablolarında da iç ve dış koruyucu zırhı olarak ta kullanılan türleri vardır [1, 3, 6].

2.2.4. Elastomerler

Elastomerler kauçuğa benzer elastik özellikler gösteren polimerik malzemelerdir. Güç sistemlerinde en çok kullanılanları silikon kauçuk, Etilen Propilen Kauçuk (EPR) ve Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM)'dir. Sülfür bileşikleri ve diğer polimerizasyonu

sağlayan ajanların vulkanize (hızlı katılaşım) edilmesiyle hazırlanırlar. Pişirme sistemine bağlı olarak elastomerler genelde 10-15 katkılayıcı içerirler. Bu katkılayıcıların %50 si elastomer, hava koşullarına dayanıklı olması amacıyla %25'i karbon, %2 si sülfür ve sülfür bileşikleridir, pişirmeyi hızlandırıcı olarak %3 oranında dikümilperoksit başlatıcı olarak kullanılır.

Elastomerler pişirilirken üç farklı pişirme tekniği kullanılır:

- Sülfür ve diğer bileşikleri kullanarak vulkanize edilme yöntemiyle,
- Işıma ile,
- Kılavuz kılıf kullanılarak

Silikon kauçuk yüksek gerilim yalıtkanlarında ve kablolarında yüksek sıcaklık yalıtkanı olarak kullanılırlar. Çapraz bağlı veya vulkanize edilmiş diklorosilandan hazırlanırlar. Bu nedenle bunlara yüksek sıcaklıkta vulkanize edilmiş (HTV) silikon kauçuk denir. Silika gibi dolgu malzemeleri kullanılarak fiziksel özellikleri arttırılabilir. Silikon kauçuk -55°C ile 200°C arasındaki çalışma sıcaklıklarında güvenle kullanılabilirler. Ozona, koronoya ve hava koşullarına karşı oldukça iyi bir dayanımı vardır. Ayrıca alkollere, alkalilere, tuzlara ve hemen hemen bütün yağ ve vernik'lere karşı dayanıklıdır. Buna karşın halojen hidrokarbonlar konsantre asitler ve aromatik çözeltilere karşı zayıftır .

Kablo yalıtkanları olmasının yanı sıra HTV silikon kauçuklar dış yüksek gerilim hatlarında seramik yalıtkanların üzerine kılıf olarak konurlar ve böylece yalıtkanın kirli havalardaki performansını arttırırlar. Silikon kauçuk kılıf kullanılarak üretilen fibergaslardan 765 kV AC ve ± 500 kV DC gerilimli sistemlerde yararlanılmaktadır.

Bir başka tür silikon kauçuk ise oda sıcaklığında vulkanize edilen (RTV) silikon kauçuktur. Genelde seramik yalıtkanların üzerinde koruyucu tabaka olarak kaplama yapılır. Ticari RTV kaplamalarında Polidimetilsiloksan (PDMS) polimeri, silika ve alüminyumtrihidrat (ATH) kullanılır. Bunların en karakteristik özelliği hidrofobik özellikleridir ki bu sayede ortamda kirlilik ve nem olması durumunda dahi oldukça yüksek bir yüzey dayanımı elde ederler.

Etilenpropilen kauçuk, orta ve yüksek gerilim kablolarında kullanılır, oldukça iyi elektriksel özellikler ve nemli ortamlarda elektriksel kararlılığa sahiptir, esnektir, su ağaçlarına ve koronaya karşı oldukça dayanıklı bir malzemedir. Günümüzde hat başı elektriksel yalıtkanı olarak üç tip EPR kullanılır. Bunlar etilenpropilenmonomer (EPM), etilenpropilendienmonomer (EPDM) ve kopolimer olarak etilenpropilen ve silikon içeren (ESP)'dir. Dağıtım ve iletim sınıfındaki yalıtkanlarda 765 kV'a kadar güvenle kullanılabilirler [1, 3, 6].

2.2.5. Epoksi Reçineler

Termoset polimerler sınıfında yer alırlar, suya karşı dayanımları oldukça iyidir. Uzun zincirleri ve çapraz bağlı yapıları nedeni ile yüksek mekanik dayanıklılık gösterirler. Sıkıştırıcı, hızlandırıcı, doldurucu, renklendirici ve esnekleştirici dolgu malzemeleri karışımın %50'sini oluşturur. 130°C civarında güvenli bir şekilde çalıştırılabilirler, fakat cam dolgu malzemesi kullanılarak bu çalışma sıcaklığı 250°C'ye kadar yükseltilebilir. Epoksi polimerlerin su emmeleri % 0.05 – 0.5 arasında değişir ve bu değer oldukça düşüktür. Bağlı dielektrik sabitleri 3.5 – 5 arasındadır. Cam katkılı epoksilerde bu değer 4-8 arasında değişir. Kayıp faktörleri sıcaklıkla artarlar ve genelde 130°C civarında bir düşme görülür, bu düşüş yapı içerisindeki dipol yönlenmesine bağlanır. Genelde yüksek mekanik dayanımları ve kullanılacak malzemeye ve metale oldukça iyi yapışması, neme karşı dayanıklılığı nedeniyle epoksi reçineler tercih edilirler. Günümüzde 69 kV altındaki gerilim seviyelerinde kullanılırlar. Normal atmosfer koşullarında uzun süreli performansları oldukça iyidir, fakat kirli atmosferik koşullarda performansları oldukça kötüdür [1, 3, 6].

2.2.6. Alliller

En çok bilinen alliller diallil pitalat (DAP) ve diallil isopitalat (DIAP) yapısındadır. Bu bileşikler pitalik anhidridlerin, asitli ortamda allil alkolle reaksiyonu sonucu elde edilir. Allil bileşikler yüksek dielektrik ve termal özelliklerin gerekli olduğu kritik elektrik ve

elektronik uygulamalarda askeri amaçlarla kullanılır. Allil bileşiklerde çeşitli sınıflar vardır.

- GDI-30 tipi yüksek dielektrik dayanımlı, düşük çekme katsayılı, mükemmel nem dirençli ve yüksek darbe dayanımlı cam-fiber katkılı reçine bileşiktir.
- GDI-30F tipi reçineler alev geciktirmenin maksimum olduğu uygulamalar içindir.
- MDG tipi mineral katkılı bileşik iyi dielektrik ve düşük çekme özelliklerinin gerekli olduğu durumlarda kullanılır.
- SDG tipi malzemeler yüksek dielektrik dayanımlı, düşük çekme katsayılı, iyi nem dirençli ve düşük kayıplı cam katkılı bileşiklerdir. Darbe dayanımı diğerlerine nazaran düşüktür.
- SDG-F tipi malzemeler yüksek dielektrik dayanımlı, düşük çekme katsayılı, iyi nem dirençli, ateşe dayanıklı ve düşük kayıplı bileşiklerdir. Darbe dayanımı düşüktür.
- SDI-5 tipi malzemeler yüksek dielektrik dayanımlı, düşük çekme katsayılı, mükemmel nem dirençli ve düşük kayıplı akrilik polimer fiber katkılı bileşiklerdir. Darbe dayanımı ortalama bir değerdedir.
- SDI-30 malzemeler yüksek dielektrik dayanımlı, düşük çekme katsayılı, çok iyi nem dirençli ve düşük kayıplı polietilen fiber katkılı bileşiklerdir. Yüksek darbe dayanımına sahiptir.

Alliller üstün dielektrik özelliklere ve ark dayanımına sahiptir. Bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da korurlar ve hemen hemen yüksek nemden hiç etkilenmezler. Geniş sıcaklık aralıklarında boyutsal kararlılığı mükemmeldir ve birçok parçasının kalıp çekmesi ihmal edilebilecek boyutlardadır. Kimyasallara olan dayanımı güçlü inorganik asitler, güçlü bazlar, toluen ve bazı sökücü maddeler hariç iyidir.

Cam katkılı allil kaplama reçinelerin 60 Hz'te dielektrik sabiti $\epsilon_r=4.2$ ve 1 MHz'te dielektrik sabiti $\epsilon_r=3.5$ değerini alır. Kayıp faktörü ise 60 Hz için 0.004 ve 1 MHz için 0.01 değerini alır.

Alliller geniş kapsamlı olarak yüksek güvenilirlikli konnektörlerde, anahtarlarda ve terminal kartlarında kullanılmaktadır. Ayrıca ev aletlerinde, uzay araştırmalarında ve füze yapımında kullanılmaktadır [3].

2.2.7. Polyesterler

Polyesterler genellikle bir dialkolün bir diesterle reaksiyonu sonucu elde edilirler. Üç grupta incelenirler; esnek yapıya sahip olan sentetik kauçuklar, bunlar kolay şekil değiştirebilirler. Düşük erime sıcaklığına sahip (100 – 120°C) termoplastikler, soğukta kristalize olabilen ve olamayan olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar. Termosetler ise ısıya dayanıklı malzemeler olup mekanik darbelere karşı dayanıklıdır. Elektrik endüstrisinde termoset polyester olan alkidler kullanılır. Elektrik yalıtım malzemesi olarak kullanılan polyester bileşikleri aşağıdaki gibidir.

- MAG Tipi mineral katkılı bileşiklerdir, dielektrik özellikleri iyidir ve ark dayanıklılıkları istenilen düzeydedir.
- MAI-60 Tipi cam-fiber katkılı bileşiklerdir, yüksek darbe dayanımı, iyi dielektrik özellikleri ve ark dayanımları mevcuttur.
- MAT-30 Tipi ısıya dayanıklı, iz oluşumuna dayanıklı, aleve dayanıklı, yüksek darbelere dayanıklı, cam dolgulu mineral katkılı bileşiklerdir.
- MAI-30 Tipi mineral katkılı, cam-fiber katkılı bileşiklerdir. Mükemmel şekil alma ve kalıplanma özellikleri mevcuttur. Elektriksel arka, aleve, ısıya ve yüksek darbelere karşı dayanıklı olan bu bileşikler bunların yanı sıra oldukça iyi mekanik ve elektriksel özelliklere sahiptirler.

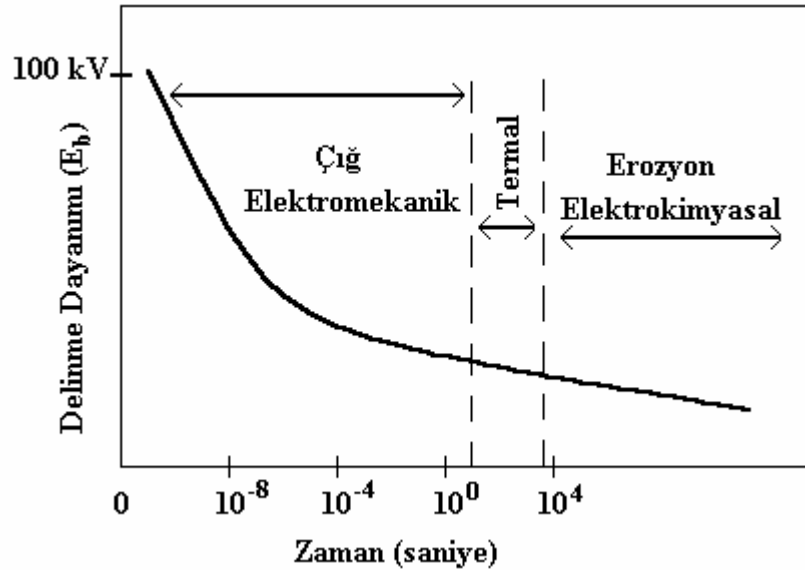
MAI-60 Tipi polyesterin 1 MHz'te dielektrik sabiti $\epsilon_r=4.6$ kayıp faktörü 0.02 ve oda sıcaklığında öz direnci $1 \times 10^{13} \Omega \text{cm}$ olarak ölçülmüştür.

Elektrik–Elektronik endüstrisinde polyesterler devre kesicilerde, rölelerde, anahtarlarda, konnektörlerde ve panolarda kullanılırlar [1, 3, 6].

2.3. KATI YALITKANLARDA DELİNME

Katılarda yalıtkanlarda delinme elektronik delinme olayları, ısı delinme olayları ve elektromekanik delinme olayları olarak üç farklı grupta gerçekleşirler. Delinme olayı bu işlemlerin her birinin toplu olarak etkileşime girmesi sonucu oluşur. Katı yalıtkanlarda delinme sıvılardan ve gazlardan farklıdır. Gazlar delinme gerçekleştikten sonra tamamen eski hallerine dönebilirler. Sıvılar delinme olduktan sonra bir kısmı eski haline dönebilir, katılar ise eski haline geri dönemezler.

Katı yalıtkanlarda delinme, yalıtkana uygulanan zorlanmanın (elektrik alan şiddetinin) süresine bağlıdır. Katı yalıtkanlarda delinme malzemenin moleküler yapısına ve morfolojisine bağlı olduğu kadar, malzemenin geometrisine, sıcaklığına ve çeşitli çevresel faktörlere de bağlıdır. Katı yalıtkanlarda delinme olayları birbiri ile ilişkilidir [1, 6].



Şekil 2.1: Katı yalıtkanlarda delinme

2.3.1. Yaşlanma

Tüm yalıtkanlar kullanım süreleri boyunca çeşitli elektriksel, ısı ve mekanik zorlanmaların yanı sıra aşırı akım ve gerilimlere maruz kalırlar. Nem, ısı değişiklik,

güneş ışını UV etkisi, mekaniksel gerilmeler ve benzeri çevresel faktörler yalıtkanlarda yaşlanmayı hızlandırmaktadır. Bunların yanı sıra izolatörlerde titreşim etkisi de izolatör üzerinde mekaniksel ve elektriksel bozukluklar oluşturur [7-9]. Yaşlanma, yüksek gerilim izolatörlerinde kanal oluşumu, kısmi boşalmalar ve ısınma gibi olumsuz etkileri ile yalıtkanın kullanım ömrünü kısaltır. Yaşlanma başlıca dört grup deneyle incelenir [1, 6]. Bunlar:

- Gerilim yaşlanması: Bu deneyler orta gerilim kablolarının ve alçak gerilim kablolarının ömür sürelerini kestirmek amacıyla yalıtkana uygulanan gerilim seviyesi ve süresi göz önüne alınarak yapılan yaşlandırma testidir.
- Frekans yaşlanması: Burada yalıtkana uygulanan gerilimin genliği sabit tutularak gerilimin frekansı değiştirilip örnekteki bölgesel boşalmalar gözlenir ve buradan yola çıkarak frekans yaşlanması gerçekleştirilir.
- Termal yaşlanma: Yalıtkan belirli gerilim seviyesinde iken ortamın sıcaklığı değiştirilerek her bir sıcaklık durumu için kullanım ömrü tespit edilir. Genel olarak kablo yalıtkanları için her 8-10°K'lik sıcaklık artışı için kablo yalıtkanının ömrünün yarı yarıya azaldığı düşünülür.
- Çok faktörlü zorlanma yaşlandırması: Burada aynı anda elektriksel, termal, mekanik ve kimyasal etkilere maruz bırakılan yalıtkanın değiştirilen koşullar karşısındaki ömrü tespit edilerek ömür analizi gerçekleştirilir.

2.3.2. Kısmi Boşalma (Korona)

Korona, tam olmayan fakat kendi kendini besleyen boşalmaya denir. Yalıtkanın kısmi delinmesi olarak ta tanımlanabilir. Üç biçimde oluşmaktadır.

- İzolatördeki sivri uçlu elektrotta oluşan elektriksel alanın oluşturduğu bozulmalar.
- Farklı yalıtkan malzemelerden oluşmuş yalıtım sistemlerinde bileşenlerden bir tanesinde meydana gelen bozulmalar.
- Yüksek alanın meydana getirdiği bozulmalar.

Bunların dışında malzemenin içinde oluşan hava boşluklarında gerçekleşen, boşalmalar ve yüzeyde meydana gelen boşalmalar da bu tanımın içine katılabilir. Polimerik yalıtkanları, içinde hava boşluğu olmaksızın üretmek mümkün değildir. Üretim esnasında polysterin içine yerleşen ve dielektrik sabitli polysterden daha az olan hava kabarcıkları, gaz basıncına ve diğer faktörlere bağlı olarak yüksek bir alanla zorlanmaktadır. Bu alan boşluktaki gazın iyonize olmasına ve boşlukta başlayan boşalmalara ve hatta delinmelere neden olmaktadır. Bu tür boşalmalar izolatörün bozulmasına hemen etki etmezler, fakat servis ömrünü kısaltırlar [10,11].

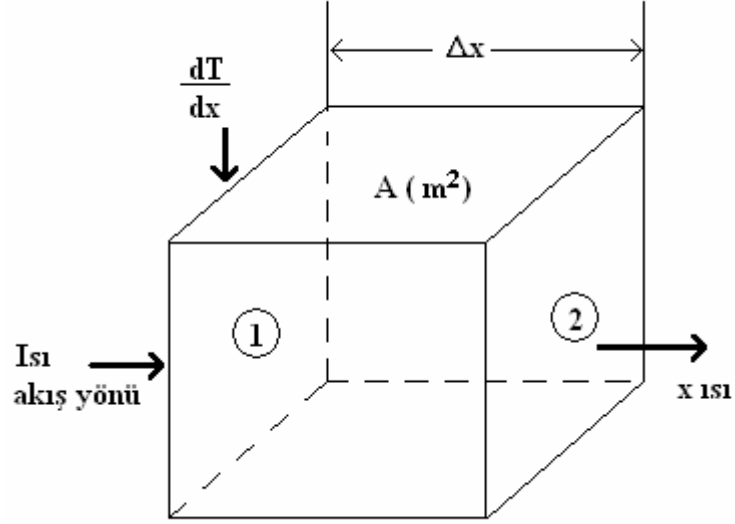
2.3.3. Kanal Oluşumu

Katı yalıtkanlarda kanal oluşumu, elektriksel ön boşalma olayı ile açıklanabilir. Laboratuvar koşullarında hazırlanmış örnek içerisine tam olarak gömülmüş elektrotlar ile tek bir çığın geçişinden sonra delinme tamamlanabilir. Katottan yalıtkanın iletim bandına giren bir elektron, alanın etkisi ile çarpışmalar yaparak enerji kazanır ve bu enerjiyi anoda ilerleyerek kullanır. Ortaya çıkan başka serbest elektronlarla da birlikte bu işlem sürer ve bir elektron çığı oluşur, bu çığ eğer belirli bir kritik boyu aşarsa delinme gerçekleşir [12].

2.3.4. Termik Delinme

Elektrik ve elektronik elemanların üzerinde görülen ısı etki, aşırı akım yüklenmesi veya ortam sıcaklığının artması nedeniyle tahribat oluşturur. Bunun nedeni, termal etkiye tabi tutulan yalıtkanın polarizasyona bağlı olarak oluşan akım ve dielektrik kayıplarına bağlanır. Herbir malzeme için belirli sıcaklık düzeyinin üzerine çıkıldığı zaman kimyasal ve fiziksel bozulma hızlanır. Bir yalıtkan oda sıcaklığında iken bir alan uygulanırsa akım geçirmez fakat ortamın sıcaklığı arttırılırsa yalıtkanın iletkenliği de artar. Bu sırada akım tarafından üretilen ısı kısmen çevreye verilip atılırken kısmen de yalıtkan içinde yutulup bu sıcaklığı üreten akımı, dolayısıyla da sıcaklığı arttırır. Eğer yalıtkan içinde herhangi bir noktada üretilen ısı o yalıtkan için belirli bir değeri aşarsa kararsız bir durum ortaya çıkar ve yalıtkan örnek termik delinme ile bozulur. Malzeme,

içinde kalan hava boşlukları nedeniyle ısınır. Bu boşluklarda oluşan boşalmalar iç sıcaklığı arttırmaktadır. Yüzey alanı A olan bir yalıtkan küpte ısı akışı Şekil 2.2’de gösterildiği gibi x doğrultusunda olduğunda, termal delinmeyi ifade eden denklem aşağıdadır [3,12].



Şekil 2.2: Isı giriş çıkışını bulmada kullanılan blok diagram

$$\text{Yüzeyinden ısı akışı} = KA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Burada K , malzemenin ısı iletkenliğidir. T sıcaklık ve A ise yüzey alanıdır.

$$\text{Isı akışı} = KA \frac{dT}{dx} = KA \frac{dV}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.2)$$

(2.2) nolu eşitlikteki ikinci terim yalıtkan blok içerisine doğru ısı girişini ifade eder. Buradan hareketle;

$$\text{Isı akışı / hacim} = K \frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) = K \text{div}(\text{grad}T) \quad (2.3)$$

Enerjinin korunumu yasasına göre elemanın içine giren ısı miktarı, malzemeden çıkan ısı miktarı ve malzemenin içindeki sıcaklığı yükseltmek için harcanan ısı miktarının toplamı şeklinde ifade edilir.

$$\sigma E^2 = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}(K \text{grad} T) \quad (2.4)$$

Burada C_v yalıtkanın ısı kapasitesini, σ elektriksel iletkenlik, T sıcaklığı ve t ise ısıya uygulanan süresini göstermektedir.

Deneyisel çalışmalar termal delinmenin malzemeye uygulanan gerilimin süresine de aynı oranda bağlı olduğunu göstermiştir. İki ayrı durum için inceleme yapılabilir.

2.3.4.1. Anlık Isıl Delinme

Bu durumda ısı çok çabuk oluşur ve bu yüzden kaplamanın ısı kaybı ihmal edilebilir. Böylece (2.4) numaralı eşitlik düzenlenebilir.

$$\sigma E^2 = C_v \frac{dT}{dt} = C_v \frac{dT}{dE} \frac{dE}{dt} \quad (2.5)$$

$$E = \left(\frac{E_b}{t_b} \right) t \quad (2.6)$$

$$\sigma = \sigma_o \exp \left[- \frac{W}{k_b T} \right] \quad (2.7)$$

Burada W , potansiyel bariyerini aşabilen aktivasyon enerjisidir. Ayrıca σ , T_0 atmosfer basıncındaki iletkenlik ve k_b Boltzman sabitidir. (2.6) ve (2.7) numaralı eşitlikleri (2.5) numaralı eşitlikte yerine koyarsak;

$$\int_0^{E_b} \frac{t_b}{E_b} \frac{\sigma_o}{C_v} E^2 dE = \int_{T_0}^{T_b} \exp \left(\frac{W}{k_b T} \right) dT \quad (2.8)$$

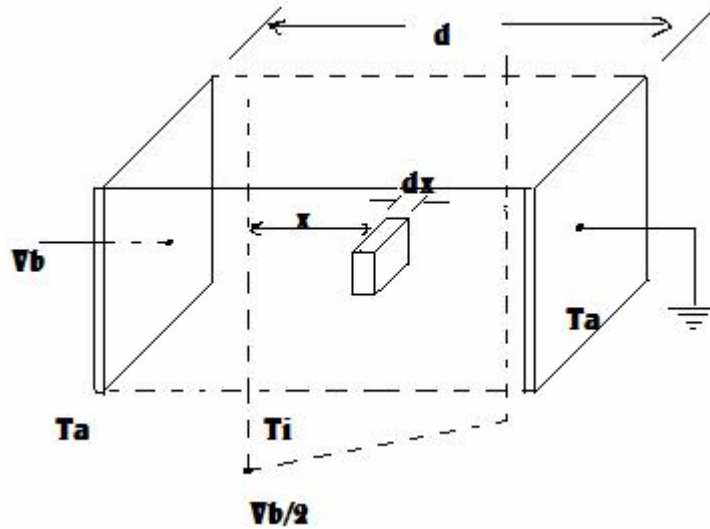
Delinme oluştuğunda $T_0 \rightarrow T_c$ ve $W \gg k_b T$ özellikleri ile;

$$E_b = \left[\frac{3C_v k_b T_0^2}{\sigma_0 W t_b} \right] \exp \left[\frac{W}{2k_b T_0} \right] \quad (2.9)$$

Bu bize kritik bir alana uygulanan anlık ısı delinmenin, alan uygulamasının zamanı ile ters orantılı ve ayrıca kritik sıcaklıktan bağımsız olduğunu gösterir.

2.3.4.2. Sabit Sıcaklık Isıl Delinme

Bu durum için geniş yüzeyli elektrotlar arasında kalın bir yalıtkan plaka düşünülür. Metal elektrotlar güçlü ısı emici olarak davranır. Buna göre plakada ısının oluşturduğu T_i sıcaklığı elektrotlara doğru iletilir. Bu yüzden denklemdeki ısı emilim bileşeni ihmal edilir.



Şekil 2.3: Katı yalıtkanın sabit sıcaklık ısı delinme durumu düzeneği

$$\sigma E^2 = \text{div}(K \text{grad} T) \quad (2.10)$$

Delinme geriliminde $E = E_b$, $\sigma E = J$ ve $E = -dV/dx$ olur. Bu nedenle $J = -\sigma dV/dx$ olur.

$$J \frac{dV}{dx} = K \frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.11)$$

Her tarafın integrali alınarak ve $\rho_v=1/\sigma$ yaklaşımıyla sonuca varılır.

$$V_b^2 = 8 \int_{T_i}^T K \rho_v dT \quad (2.12)$$

$T_i=T_b$ olduğunda kritik duruma ulaşılır. Bu durum, sabit sıcaklık ısı delinme durumları altında kalın dielektrik plaka için delinme geriliminin plakanın kalınlığından bağımsız olduğunu gösterir. Yüksek termal iletkenlik katsayısı K istenmeyen ısının uzaklaştırılmasını kolaylaştıran bir faktördür.

2.3.5. Elektromekaniksel Delinme

Yalıtkan malzemenin kimyasal birleşim şekilleri, üretim teknikleri, merkezkaç kuvvetleri ve titreşim nedeni ile malzemenin fiziksel açıdan etkilenmesi sonucu görülen bozulma türüdür. Oksidasyon, ozon, radyasyon, nem ve kimyasallar yalıtkanın ömrünü fiziksel olarak bozan etkenler arasındadır. Yalıtım malzemelerinin birçok kimyasallara karşı dirençleri çok iyi kaydedilmiş ve böylece yalıtım malzemelerinin karşılaşılabilecekleri kimyasal maddelere karşı dirençleri arttırılmaya çalışılmıştır. Fiziksel bozulmaya yol açan malzemelerden olan nem, su formunda veya yüksek nem olarak karşımıza çıkar. En büyük etkisi yalıtım sisteminin dielektrik özelliklerini düşürmesi veya yalıtım bozulmasına yol açmasıdır. Bazı yalıtım malzemeleri, özellikle kağıt yalıtkanlar ve organik bazlılar nem emici özelliktedir ve yüksek oranda nem gözlenen çevre şartlarındaki elektriksel yalıtım sistemlerinde yalnız olarak kullanılmaya uygun değildir. Nem bu malzemenin liflerinin şişmesine sebep olur ve malzemenin kalınlığını arttırarak daha fazla yer kaplamasına neden olur. Bununla birlikte %6 oranında nem bu malzemelerin ideal mekanik özelliklerini gösterebilmesi için gerekli bir düzeydir. Bu malzemelerin herbiri kritik su içeriğine sahiptir ve bu içeriğin altına düşüldüğünde kullanılabilirlikleri hızla bozulur bu sebeple kullanımdan önce tamamen

kurutulmazlar. Genellikle bu malzemelere yalıtkan sıvılar veya cilalar emdirilerek veya kaplanarak neme karşı direnci artırılır.

Nemi çekme özelliği kağıtlar ve organik üretimlerle aynı derecede olmasa da bazı plastikler diğerlerine oranla nemi daha kolay emer. Örnek olarak poliamidler (naylonlar), poliimidler, akrilikler, polisülfonlar ve bazı poliüretanlar gösterilebilir. Bir dereceye kadar düşük dielektrik özellikleri çoğu durumda bunların kullanımını engellemez [1, 5].

Neme dayanıklı malzemelerin yüzeyinde, iletken bir yol olarak şekillenir. Bu hareket yüzeyde iletken kirliliğin bulunduğu durumlarda daha da şiddetlenir. Çoğunlukla enerji nakil hattı yalıtkanlarında bu delinme şekli gözlenir.

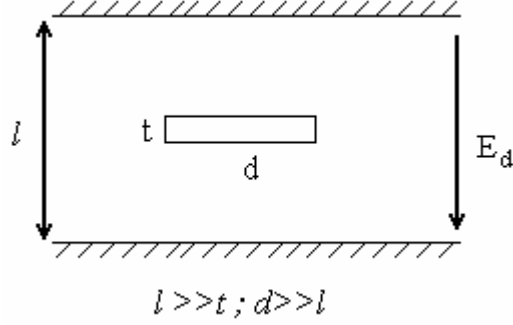
Belirli koşullarda ve yüksek sıcaklıklarda nem bazı polimerleri özellikle poliüretanları harekete geçirir ve kimyasal bozunmaya neden olur. Bu şekilde dielektrik özelliğini bozar. Bu hidrolize olma eğilimi daha az yalıtkan olan polimerlerle karıştırılarak veya katkılanarak kontrol edilebilir.

Yalıtım malzemesindeki boşluklar ve kirlilik diğer çevre koşullarında olduğu gibi malzemenin fiziksel olarak bozulmasına neden olur.

2.3.6. Erozyon

Elektriksel malzemelerde kullanım sırasında özellikle yüksek gerilim kablolarındaki başlıca bozulma nedenlerinden birisi erozyon şeklindeki aşınımdır. Malzemenin üretimi sırasında içinde kalan boşluk ve hava kanallarında elektriksel boşalmaların oluşması sonucu gerçekleşir. Genelde bu boşluk ve kanalların içindeki hava veya diğer gazların dielektrik dayanımı katı yalıtkanın dayanımından daha az olması nedeniyle boşluktaki veya kanaldaki elektrik alanın değeri yükselir ve bunun sonucunda yalıtıkanda erozyon görünür [12, 13]. Şekil 2.4’de içinde disk şekilli bir boşluk bulunan dielektrik bir malzeme görülmektedir, burada malzeme E_d elektrik alanına maruz bırakılmıştır. Bu durumda boşluktaki elektrik alan değerini hesaplamak istersek

$$E_c = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_c} E_d \quad (2.5)$$



Şekil 2.4: İçinde disk şeklinde bir boşluk bulunan yalıtkan malzeme

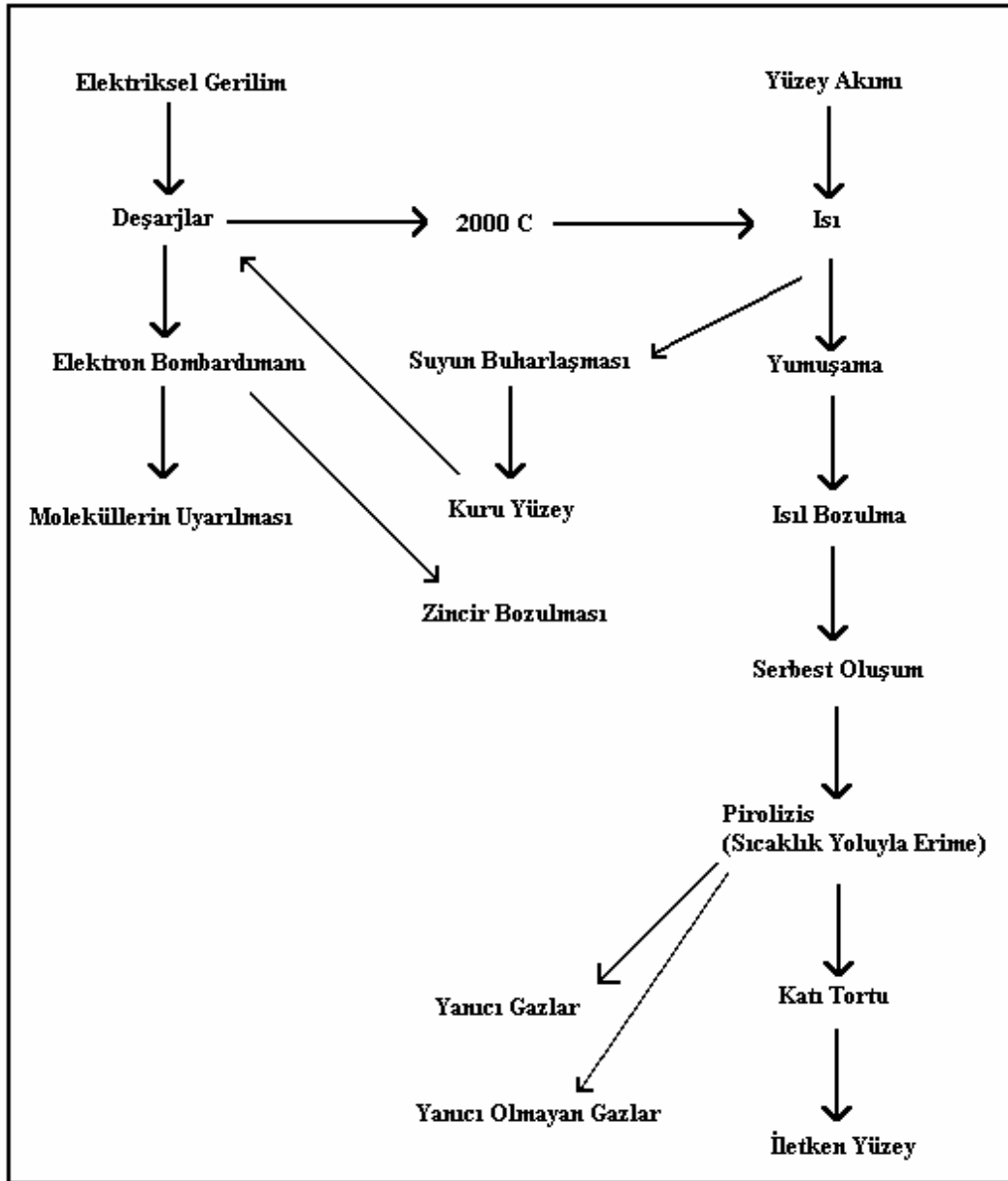
İfadesinden yararlanılır. Burada sırasıyla ϵ_d ve ϵ_c dielektriğin ve boşluğun bağıl dielektrik sabitidir. Hava için $\epsilon_c \cong 1$ ve pekçok katı yalıtkan malzeme için ϵ_d 2 ile 3 arasında değişir. Yukarıdaki ifadeden görüleceği üzere boşluktaki alan değeri yalıtkanla uygulanan alan değerinden daha fazla olacağı için boşluktaki alan değeri havanın delinme değeri seviyesine geldiğinde boşalma oluşur ve alternatif akımın her sıfırdan geçişinde bu tekrarlanır. Tekrarlanan boşalmalar sonucunda malzemenin yüzeyinde erozyon ve kimyasal bir bozulma gerçekleşir.

Boşluklardan kaynaklı sorunlar genelde katı yalıtkanlı kabloların en önemli problemidir. Polimerik yalıtkanların üretimi aşamasında bu boşlukların (1 – 30 μm) önüne geçilemediği için ticari polimerik kablo yalıtkanları 138 kV ile ve yağ emdirilmiş polimer katkılı kablo yalıtkanları 400 kV ile sınırlıdır [6].

2.3.7. Yüzeysel İz Oluşumu (Surface Tracking)

Yüzeysel iz oluşumu (surface tracking) daha çok polimerik izolatorlerde gözlemlenen bir bozulma biçimidir. Yüzeysel iz oluşumu sonucunda, izolatörün yüzeyi yanmaya

bağlı olarak karbonlaşır ve o bölgede bir iz meydana gelir. Yüzeyde oluşan iz ve oluşum süresi, izolatörde kullanılan polimerin moleküler yapısına, uygulanan gerilime, elektrot tipine, test sırasında yüzeyden akan suyun akış hızına bağlıdır. Yüzey aşınımı oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Yüzey aşınımına etkiyen olaylar

Katı yalıtkanlardaki yüzeyde oluşan kaçak akım, yüzeydeki nem ve kirlilikten kaynaklanmaktadır. Bu da doğal olarak yüzeyin bozulmasına ve bir karbonize yolun

oluşmasına neden olmaktadır. Bu olaya yüzey aşınımı veya yüzey iz oluşumu denir. Karbonize yol topraklı elektrottan yüksek gerilim elektrotuna doğrudur. Bu yolun tamamlanmasıyla bozulma tamamen gerçekleşmiş olur.



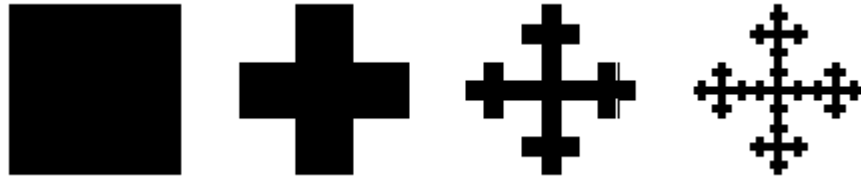
Şekil 2.6: Yüzey aşınımı oluşmuş polimer örnekleri

Yüzey aşınımı, düşük şiddetli boşalmaların oluşumu ile başlar. Bu boşalmalar yüzeyden akan suyun iyonize bir tabaka oluşturmasından meydana gelmektedir [8-14].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. FRAKTAL GEOMETRİ VE BOYUT

Fraktal, matematikte çoğunlukla kendine benzeme özelliği gösteren karmaşık geometrik şekillerin ortak adıdır. Fraktallar, klasik, yani Öklid’çi geometrideki kare, daire, küre gibi basit şekillerden çok farklıdır. Bunlar doğadaki Öklid geometrisi aracılığıyla tanımlanamayacak pek çok uzamsal açıdan düzensiz olguyu ve düzensiz biçimi tanımlama yeteneğine sahiptir. Fraktallar kendisini daha küçük ölçeklerde de taklit eden geometrik şekiller olarak nitelendirilirler. En önemli özelliği kendi kendisine benzemesidir. Şeklin alt şekilleri birebir şeklin bütününe benzer. Teoride fraktal şekillerin sonsuz küçüklükteki alt şekilleri bile bütün haldeki şeklin barındırdığı ayrıntıları barındırır.



Şekil 3.1: İterasyonla elde edilmiş şekil.

Fraktal matematiğinin geçmişi 19. yy sonları ve 20. yy başlarına kadar uzanır. Bu yıllarda Weierstrass, Candor, von Koch ve Peano matematikçilerin daha önce hiç görmediği eğriler çizmeye başladılar. Bu eğriler çoğunlukla türevlenemeyen, kendine benzeme özelliği barındıran ve boyutları klasik boyut kavramından farklı olan eğrilerdir. Çoğu matematikçi bu eğrileri canavar olarak nitelendirip onlarla uğraşmayı reddetmiştir. 1975 yılında Benoit Mandelbrot latineden aldığı ve kırılmış manasına gelen ‘fractus’ kelimesini kullanmıştır. Mandelbrot fraktal şekillerin korkulduğu gibi olmadığını, sanıldığının aksine güzel ve doğadaki nehirler, kıyıları, dağlar vb. şekillerin geometrisi açıklayabilecek olgular olduğunu ortaya koymuştur [20, 22, 23].

Birçok makaleye konu olmasına ve uygulama alanları ortaya konulmasına rağmen doğal bilimlerde fraktal geometri ve matematiğin kullanılması yenidir ve fraktal matematiğin çeşitli bilim dallarındaki birçok açıklanamamış konuya ışık tutacağı öngörülen bir gerçektir. Fraktal geometrisi için çeşitli özellikler geçerlidir.

- Fraktal kavramı, yalnızca matematik değil fiziksel kimya, fizyoloji ve akışkanlar mekaniği gibi değişik alanlar üzerinde önemli etkiler yaratan yeni bir geometri sisteminin doğmasına yol açmıştır.
- Tüm fraktallar kendine benzer ya da en azından tümüyle kendine benzer olmamakla birlikte, çoğu bu özelliği taşır.
- Kendine benzer bir cisimde cismi oluşturan parçalar ya da bileşenler cismin bütününe benzer. Düzensiz ayrıntılar ya da desenler giderek küçülen ölçeklerde yinelenir ve tümüyle soyut nesnelerde sonsuza değin sürebilir. Her parçanın her bir parçası büyütüldüğünde, yine cismin bütününe benzer.
- Fraktal cisimler, düzensiz biçimli olduklarından ötürü Öklid geometrisine uyan şekillerin ötelenme bakışına sahip değildirler. Ötelenme bakışına sahip bir cisim kendi çevresinde döndürüldüğünde görünümü aynı kalır.
- Kendine benzerlik ve tamsayı olmayan boyutlu kavramlarıyla birlikte fraktal geometri, istatistiksel mekanikte, özellikle görünürde rasgele özelliklerden oluşan fiziksel sistemlerin incelenmesinde giderek daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.
- Fraktal geometri bilgisayar grafiklerinde de yararlı olmaktadır. Fraktal algoritma ise, engebeli dağlık araziler ya da ağaçların karışık dal sistemleri gibi karmaşık, çok düzensiz doğal cisimlerin gerçekteki benzer görüntülerinin oluşturulabilmesini olanaklı kılmıştır.

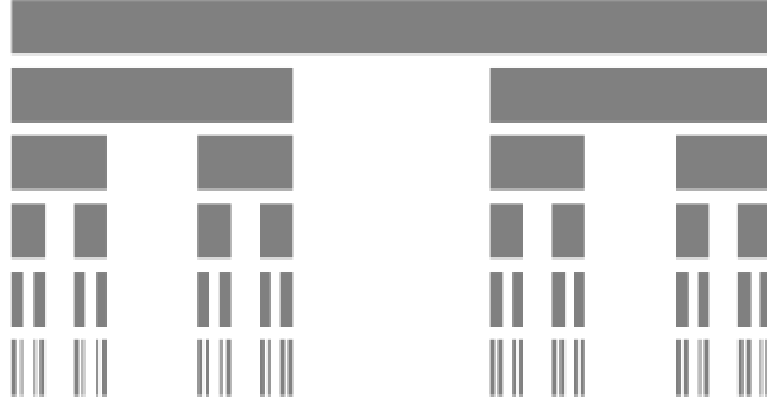
3.1.1. Fraktal Şekiller

Kendine benzer şekillerin oluşturduğu geometrik yapılar alışılmamış karakteristikler barındırır. En ufak bir parçadan şeklin bütününe ulaşmak mümkündür. Bu şekilleri oluşturmak için gereken kurallar çok basit olmasına rağmen matematiksel olarak ifade

edebilmek çok zordur. Eğriler teoride sonsuz uzunluktadır. Geleneksel boyut kavramı bu eğrilere uygulanamaz çünkü boyutları düzlem ile eğri arası bir değere tekabül eder. En bilinen fraktal şekiller Cantor kümesi, Koch eğrisi ve Sierpinski üçgenidir [20, 22].

3.1.1.1. Cantor Kümesi

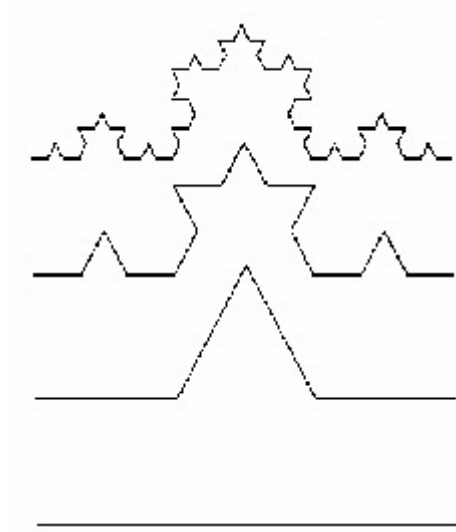
Belli bir uzunluktaki bir düz bir parçadan yola çıkılır. İlk önce parçanın kendisi yerleştirilir. Sonra ortasından bir parça çıkarılarak yerleştirilir. Daha sonra kalan parçaların ortasından parçalar çıkarılır. Bu bir iterasyonla sonsuza değin sürdürülerek (yeterince) bir şekil elde edilir. Elde edilen şekil Cantor kümesi olarak adlandırılır.



Şekil 3.2: Cantor Kümesi

3.1.1.2. Koch Eğrisi

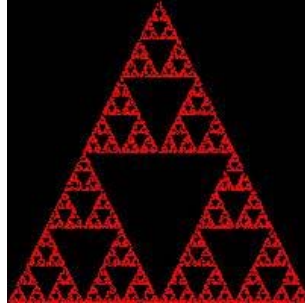
Bir doğru parçası üç eşit parçaya bölünür ve ortasında eşkenar üçgen oluşturulur. Kalan bütün doğrular yine üç parçaya ayrılıp eşkenar üçgenler oluşturulur. İterasyon metodu ile bundan sonra oluşan her doğruya aynı işlem uygulanıp Koch eğrisi elde edilir.



Şekil 3.3: Koch Eğrisi

3.1.1.3. Sierpinski Üçgeni

Bir eşkenar üçgenin içine yine bir eşkenar üçgen koyarak ve bunu bir iterasyon döngüsü içinde tekrarlayarak Sierpinski üçgeni elde edilir.



Şekil 3.4: Sierpinski Üçgeni

3.1.2. Fraktal Boyut

Öklid'çi boyut kavramında boyut tam sayılarla ifade edilir ve koordinat düzlemlerine bağlıdır. Düzlem iki boyutlu, küp ise üç boyutlu olmak üzere boyut kavramı bildiğimiz klasik şekiller için yerleşmiştir. Fraktal boyut kavramı geometrik bir boşluğu dolduran noktaların dağılımını ortalama olarak ölçme işine bağlıdır. Bir başka deyişle şeklin

karmaşıklığını ve şekil nüanslarını inceler. Genelde fraktal boyut için Hausdorff-Besicovitch boyutunun topolojik boyutu aştığı durumlar ($D > D_T$) değerlendirilir [8, 21].

Noktalar kümesi klasik Öklid uzayında bir doğru oluşturur ve bunun topolojik boyutu $D_T=1$ ve Hausdorff boyutu $D=1$ olarak tanımlanır. Düzlem için $D_T=2$ ve $D=2$ olur. Bu nedenle ne doğru ne yüzey (üçgen, kare, dikdörtgen vb...) fraktal şekiller olarak nitelendirilemez. Öklid geometrisiyle doğal objelerin incelenmesi zordur çünkü bu objelerin boyutları 1, 2 ve 3 arasında tam sayı olmayan değerler alır [8, 21].

Hausdorff boyutu, Minkowski boyutu, kutu sayma (box counting), Hurst katsayısı ve Fourier analizi gibi yöntemler fraktal boyut hesaplamak için geliştirilmiştir. Eğer obje ‘f’ ölçeğinde kendisinin ‘N’ kopyasına ayrılırsa boyut değeri D aşağıdaki denklemi sağlar.

$$N = \left(\frac{1}{f} \right)^D \quad (3.1)$$

D iki tarafın logaritması alınarak bulunabilir.

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{f}} \quad (3.2)$$

Bu yöntem şeklin kesin alt kopyaları olan şekiller için geçerlidir ama şekiller o kadar kolay ayrılıp alt kopyaları incelenemez. Burada Hausdorff soruna çözüm getirmiştir. Komşuluk kavramı düzenli bir şeklin (kare, daire) küçük bölgesinin fraktal şeklin belli yerine yerleştirilmesi olarak nitelendirilebilir. İlk önce nesne belli bir ölçü için N_1 komşuluğunda kaplanır. Daha sonra aynı işlem tekrarlanır ancak bu sefer komşuluk f faktörü oranında azaltılır. Bu işlemde nesneyi kaplamak için gerekli olan komşuluk sayısı N_2 olur. N_1 ve N_2 değerleri komşuluk ölçüsünde ve genel şekle uydukları oranda birbirleriyle bağımlıdır. Bunun için kesin bir formül olmasa da Hausdorff sonsuz küçük komşuluklarda nesnenin boyutu için bir denklem önermiştir.

$$\left(\frac{N_2}{N_1}\right) = \left(\frac{1}{f}\right)^D \quad (3.3)$$

Tablo 3.1: Eukleides ve fraktal geometrilerinin karşılaştırılmaları

EUKLEIDES GEOMETRİSİ	FRAKTAL GEOMETRİ
Geleneksel(>2000 yıl)	Modern(~ 25 yıl)
Karakteristik ölçü veya ölçeğe dayanır	Belirli ölçek veya ölçü yoktur
İnsan yapımı şekillere uyar	Doğal şekiller için uygundur
Formülle ifade edilir	İteratif sistemlerdir

Kapasite boyutu, Korelasyon boyutu ve Bilgi boyutu olmak üzere üç adet fraktal boyut hesaplama yöntemi vardır [8, 21].

3.1.2.1. Kapasite Boyutu (*Capacity Dimension*)

Karmaşık şekillerin fraktal boyutunun hesaplanmasında kullanılır. Temeli şeklin tamamının eşit kare kutularla kaplanması esasına dayanır. Daha sonra kutu sayısı sayılır. Aynı prosedür farklı kenar uzunluğundaki kutular için gerçekleştirilir [8].

$$N(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon^n} \quad (3.4)$$

Burada ‘N(ε)’ kutu sayısını, ‘ε’ kutunun kenar uzunluğunu gösterir. ‘n’ ise tamsayıdır.

$$D_{cap} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (3.5)$$

Kapasite boyutu (3.5) numaralı eşitlikteki gibi hesaplanabilirse de, N(ε) değerini ε değerine göre çizdirmek daha iyi bir yaklaşımdır.

3.1.2.2. Korelasyon Boyutu (Correlation Dimension)

Bu metot daha kesin ve doğru yoldan fraktal boyut hesaplamaya olanak sunmaktadır. Yine aynı şekilde belirli ‘ ε ’ çapındaki kutuları saymaya dayanır. İki metot arasındaki temel fark kapasite boyut modelinin sadece metrik bir metot olması ve dinamik sistemlerin zaman davranışını göz önüne almasıdır. Diğer taraftan korelasyon boyut metodu olasılık tipi boyut hesabını tipik yolun bağıl frekansını kullanarak gerçekleştirir [8].

$$D_c = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i^2}{\ln \varepsilon} \quad (3.6)$$

$$P_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i}{N} \quad (3.7)$$

Bu eşitliklerde n_i i’inci elemandaki nokta sayısı ve N yoldaki toplam nokta sayısıdır. Korelasyon boyut hesabı için Grassberger ve Procaccia daha iyi ve hızlı bir yol olan $C(\varepsilon)$ ’yi ε değerine oranla çizmeyi önermiştir.

$$C(\varepsilon) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \{ \text{Bir hücredeki nokta çifti sayısı } \|x_i - x_j\| < \varepsilon \} \quad (3.8)$$

$$D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\ln C(\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)} \quad (3.9)$$

$C(\varepsilon)$ ’yi hesaplarsak (3.10) numaralı eşitliğe ulaşırız.

$$C(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i^2 \quad (3.10)$$

$C(\varepsilon)$ sonlu ama çok sayıda N noktaları için kestirilebilir. Kaplama metoduna göre daha doğru sonuçlar verir.

3.1.2.3. Bilgi Boyutu (Information Dimension)

Korelasyon boyutuna benzer bir metottur ama temel olarak belirli bir hücrede nokta bulabilme olasılığına dayanır. İlk önce şekildeki bütün noktalar daha sonra ε ölçülü hücrelerdeki bulunan noktalar sayılır [8].

$$D_i = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{H(\varepsilon)}{\ln \frac{1}{\varepsilon}} \quad (3.11)$$

(3.11) numaralı eşitlikteki $H(\varepsilon)$, ε ölçüsü için sistem durumunu doğrulukla belirlemek için gerekli bilgi miktarını yani entropiyi temsil eder.

$$H(\varepsilon) = - \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i \ln P_i \quad (3.12)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad , \quad \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i = 1 \quad (3.13)$$

N şekle ait toplam nokta sayısını, n_i bir hücredeki nokta sayısını ve $N(\varepsilon)$ şekli kaplamak için gerekli olan ε ölçülü minimum kutu sayısını verir. Sonuçta boyut için (3.14) numaralı eşitlik elde edilir.

$$D_i = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i \ln P_i}{\ln(\varepsilon)} \quad (3.14)$$

Her kutu için olasılıkların ($P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_i$) eşit olduğu durumda $H(\varepsilon)$ maksimum değerine sahip olur ve (3.5) numaralı eşitlikle aynı değere sahip olur.

$$H(\varepsilon) = N(\varepsilon) \times P \times \ln \frac{1}{P} \quad , \quad \text{bütün hücreler için } P = \frac{1}{N(\varepsilon)}$$

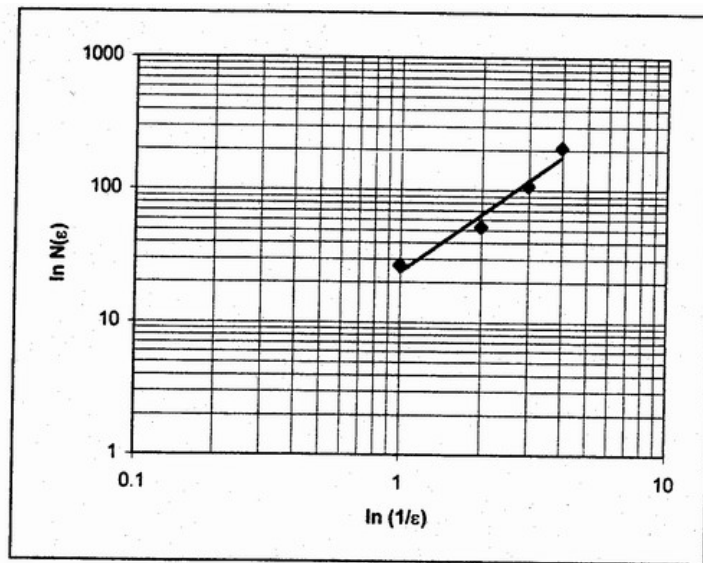
$$H(\varepsilon) = N(\varepsilon) \times \frac{1}{N(\varepsilon)} \times \ln \left(\frac{1}{\frac{1}{N(\varepsilon)}} \right) \Rightarrow H(\varepsilon) = \ln N(\varepsilon) \quad (3.15)$$

3.1.2.4. Boyut Hesap Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Genel olarak bütün metotlar güvenilir sonuçlar vermektedir, ancak özellikleri genel olarak karşılaştırılabilir.

- Kapasite metodunda şekli kaplamak için gerekli olan minimum sayıdaki ε ölçülü kutu sayısı sayılır.
- Bilgi metodunda şekil ε ölçülü kare kutularla kaplanır ve daha sonra kutudaki nokta bulunma olasılığı ölçülür.
- Korelasyon metodu bilgiye çok benzer ama kutularda iki çift nokta bulunma olasılığı ile ilgilenir.

Bütün bu metotlarda gürültü çok önemlidir. Kutu içine gelen ve şekille ilgisi olmayan bozulmalar hesaba girerek boyut bilgisine etki eder. Bu metotlara ek olarak Benzerlik boyutu, Minkowski boyutu, Fourier analizi ve Hurst katsayısı gibi metotlar ortaya konulmuştur ama bunlar matematiksel olarak birbirine denktir [8, 21].



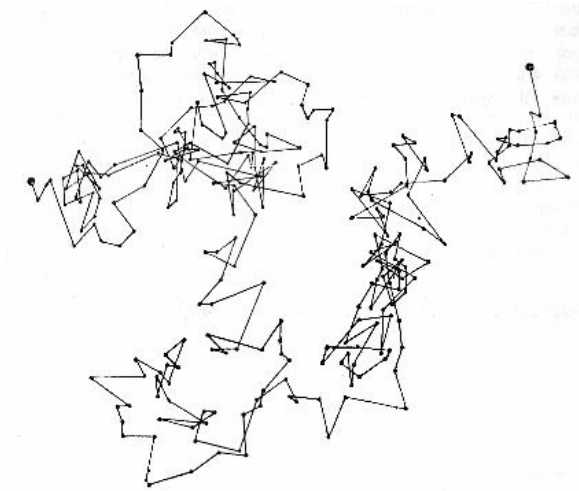
Şekil 3.5: Fraktal boyut hesaplama eğrisi

3.2. BROWN HAREKETİ

İskoç Botanikçisi Robert Brown 1827 yılında suya bırakılan çiçek tozlarının birçoğunun titreyerek hareket ettiğini belirledi. Sık sık yinelediği deneylerden sonra, bu hareketlerin sıvıdaki akımdan ve bu sıvının yavaş yavaş buharlaşmasından ileri gelmediğini bilakis taneciklerin kendi hareketleri olduğunu gözlemledi. İnorganik cisimlerin çok küçük boyuttaki parçacıkları dahi suyun içine atılınca farklı yönde hareket ediyorlardı. Asla azalmayan ve durmadan devam eden bu hareket “Brown Hareketi” olarak adlandırılmıştır [25].

Ama zamanında bu buluş 20. yüzyıldaki Gouy’un ortaya koyduğu kurallara kadar ilgi çekmemiştir. Bu kurallara göre:

- Hareket çok düzensiz ve daimi olup dönüşümler ve rotasyonlardan oluşmaktadır. Aynı zamanda yörüngeyi tanımlayan tangenti yoktur.
- İki parçacık birbirine çaplarından daha fazla yaklaşsalar bile bağımsız hareket ederler.
- Küçük parçacıklarda hareket daha aktiftir.
- Parçacıkların yoğunluğunun harekete etkisi yoktur.
- Hareket düşük viskoziteye sahip sıvılarda ve yüksek sıcaklıkta daha aktiftir.



Şekil 3.6: Mikroskobik parçacığın Brown hareketi

Einstein maddenin kinetik teorisini göz önünde bulundurarak, sıvı atomlarının ve taneciklerinin kendilerine oranla çok büyük olan katı parçacıkları harekete geçirdiklerini fark etmiştir. Suyu oluşturan atomların kendilerinden kat kat büyük olan çiçek tozlarını bombalaması sonucu, tanecikler yeteri kadar büyükse Brown Hareketi oluşmaktadır. Bombalanan moleküllerin belli bir enerjisi (kütleleri ve hızları) olmadığı takdirde, Brown Hareketi oluşmamaktadır [26].

1908’de Einstein’ın araştırmaları sonucu katı mikroskopik parçacıkların sıvı ortamındaki düzensiz ve bitmeyen hareketlerini (Brown Hareketi) inceleyen bir çalışma ortaya konmuştur. Bu çalışmaya göre:

- Difüzyon katsayısı çözücünün viskozitesi ve çözünen molekülün büyüklüğü hariç solüsyonun doğasından bağımsızdır.
- Moleküler ısı teorisine göre sıvıdaki maddeler yerlerini rasgele değiştirirler.
- Moleküler kinetik teoriye göre sıvıdaki parçacıkla çözünen madde arasında önemli bir fark yoktur.
- Brown Hareketi teorisi bütün küresel parçacıklar için uygulanabilir.

3.2.1. Einstein matematiksel modeli

Küçük bir parçacığın durağan bir sıvıdaki Brown Hareketi Langevin denklemi ile ifade edilebilir.

$$m \dot{v} = -\alpha v + F(t) \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte m parçacığın kütlesi, v hızı ve α ise sönümleme sabiti ve F(t) ise rasgele dalgalanma kuvvetidir.

$$\alpha = 6\pi\eta a \quad (3.2)$$

Buradaki a kürenin yarıçapı ve η dinamik viskozitedir.

$$m\ddot{x} = m \left[\frac{d}{dt} \left(x \dot{x} \right) - \left(\dot{x} \right)^2 \right] = -\alpha x \dot{x} + x F(t) \quad (3.3)$$

(3.3) numaralı eşitlikte zaman ortalamaları alınabilir.

$$m \left\langle \frac{d}{dt} \left(x \dot{x} \right) \right\rangle = m \frac{d}{dt} \left\langle x \dot{x} \right\rangle = m \left\langle \dot{x}^2 \right\rangle - \alpha \left\langle x \dot{x} \right\rangle + \left\langle x F(t) \right\rangle \quad (3.4)$$

Rasgele dalgalanma kuvvetinin zaman ortalaması için (3.5) numaralı eşitlik yazılabilir.

$$\left\langle x F(t) \right\rangle = \left\langle x \right\rangle \left\langle F(t) \right\rangle = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{2} m \left\langle \dot{x}^2 \right\rangle = \frac{1}{2} kT \quad (3.6)$$

(3.6) numaralı eşitlikte k Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

$$m \frac{d}{dt} \left\langle x \dot{x} \right\rangle = kT - \alpha \left\langle x \dot{x} \right\rangle \quad (3.7)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + \frac{\alpha}{m} \right) \left\langle x \dot{x} \right\rangle = \frac{kT}{m} \quad (3.8)$$

Bu eşitliğin çözümünden (3.9) numaralı ifadeye ulaşırız.

$$\left\langle x \dot{x} \right\rangle = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left\langle x^2 \right\rangle = C e^{-\gamma t} + \frac{kT}{\alpha} \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte $\gamma = \alpha/m$ karakteristik zamandır ve C ise sabittir. (3.9) nolu denklemi $t=0$ anında yeniden yazabiliriz.

$$0 = C + \frac{kT}{\alpha} \quad (3.10)$$

C sabiti için $C = -kT/\alpha$ ifadesi elde edilir. (3.9) numaralı ifade son şeklini alır.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = \frac{kT}{\alpha} (1 - e^{-\gamma t}) \quad (3.11)$$

(3.11) numaralı eşitlikte integral alınırsa,

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kT}{\alpha} \left[t - \frac{1}{\gamma} (1 - e^{-\gamma t}) \right] \quad (3.12)$$

Limitsel olarak $t \ll \gamma^{-1}$ alınırsa eşitlik,

$$\langle x^2 \rangle = \frac{kTt^2}{m} \quad (3.13)$$

Yeni halini alır. Limitsel olarak $t \gg \gamma^{-1}$ alınırsa eşitlik,

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a} \quad (3.14)$$

Haline gelir. $\langle r^2 \rangle = 3\langle x^2 \rangle$ bilindiğine göre eşitliği düzenlenirse,

$$\langle r^2 \rangle = \frac{kTt}{\pi\eta a} \quad (3.15)$$

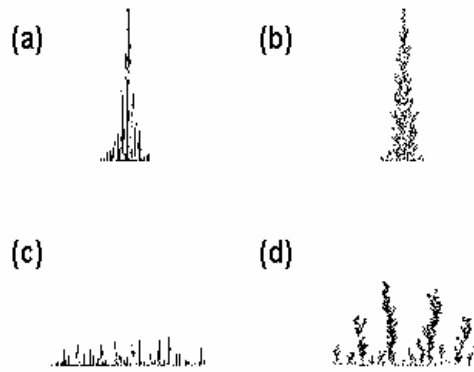
Elde edilir. Daha sonraki limitlerde bu bir difüzyon işlemidir ve difüzyon sabiti ile ifade edilebilir. Sonuç olarak küçük bir parçacığın durağan bir sıvıdaki hareketini matematiksel olarak ifade edebilmek için difüzyon sabitinden yararlanılır [26]. En son difüzyon sabiti eşitliği elde edilir.

$$D = \frac{3kT}{\alpha} \quad (3.16)$$

3.2.2. Fraktal ve Brown Hareketi

Fraktallar kendi içinde benzeşir. Bu fraktal geometrisinin büzülme veya genişleme ile bozulmayacağı anlamına gelir. Bir şeklin ölçeksel olarak küçültülerek tekrarlanması ile fraktal oluşturulabilir. Önemli bir olgu ise fraktal yapılarının aynı Brown Hareketi gibi rasgele iterasyon algoritması olmasıdır. Bu bir kalemle kâğıda rasgele noktalar koymaya benzer fakat tek fark sonraki noktanın olasılığının belli koşullara göre sabit olmasıdır [22, 23, 27].

- Brown Hareketi fraktal boyutu maksimum 2 olan bir süreçse örnektir.
- Bir parçacığın alacağı yola “rasgele yol” (random walk) denir ve bu harekette alınacak mesafe ve yön tamamen rasgele değişkenlerdir.
- Parçacığın belli bir uzay noktasından başka bir noktaya giderken hedef noktaya varmadan önce tüm uzayı doldurması, fraktal boyut olarak ikiye denk gelir.
- Fraktal ve Brown Hareketini birleştiren en önemli model “Fraksiyonel Brown Hareketidir”.
- Bu model doğadaki pürüzlü yapıları (ağaç, bulut ve dağ yapıları vb.) rasgele yol bazında inceler.
- Bu yapıları modellemek için rasgele iterasyon algoritmasını kullanarak fraktal modelini oluşturur [23].



Şekil 3.7: Parçacıkların Brown hareketi

Bu tür modeller yapay bitki ve mimari yapıları animasyon şekillerini oluşturmak için kullanılır. Fraksiyonel Brown Hareketi modeli polimerik yalıtkanlardaki elektriksel aşınım şekillerini incelemek için uygundur.

3.2.3. Brown Hareketi Modeli

Katı yalıtkan maddelerdeki yüzey aşınımlarını modellemek için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bunlardan biri dirençlerle örülmüş yapı sistemleridir. Bu sistemler rasgele değerlerdeki direnç kombinasyonları ile modelleme yoluna gitmiştir. Ancak gerçek hayatta karşılaştığımız şekilleri modellemede Brown Hareketi modeli kadar başarılı bir model değildir [8, 24, 28].

Akarsu şekilli yüzey aşınımları için Brown Hareketi modeli yeterli bir modeldir. Gauss dağılımı gibi olasılık dağılımları için ortalama değer, bir dizi küme içinde tekrarlanan ölçümlerden en olası değerdir. Varyans ise bu ölçümlerin belirsizliği ile ilgili bir ifadedir. Brown Hareketi için ortalama değerden uzaklaşmak hata ya da büyük varyans başarısız ölçüm demek değildir, çünkü bütün dağılım bir tahmindir. Genel Brown modeli kendi kendine benzerliği gösteren bir modeldir. Bu model ortalamanın karesi yer değiştirmeye bağlı bir yol oluşturur ve bu yol zamanla büyür [8].

Eğer 0 ile 1 t zamanı arasında bir şekil üretilecekse, $X(0)$ değeri 0 olarak alınır ve $X(1)$ değeri 0 ortalama değerli ve σ^2 varyanslı rasgele bir değişken olarak alınır. Noktalar arası toplam değişme (3.17) numaralı eşitlikle ifade edilebilir.

$$\text{var}[X(t_2) - X(t_1)] = |t_2 - t_1| \sigma^2 \quad (3.17)$$

Bu eşitlikte $t=1/2$ için yer değiştirmeyi hesaplayabiliriz.

$$X\left(\frac{1}{2}\right) - x(0) = \frac{1}{2}[X(1) - X(0)] + D_1 \quad (3.18)$$

(3.18) numaralı eşitlikte D_1 0 ortalama değerli ve Δ_1^2 varyanslı rasgele değerdir. Bütün değerleri (3.18) numaralı eşitlikte yerine koyarak yeni bir forma ulaşırız.

$$\text{var}\left[X\left(\frac{1}{2}\right) - X(0)\right] = \frac{1}{4} \text{var}\{X(1) - X(0)\} + \Delta_1^2 \quad (3.19)$$

(3.19) numaralı eşitlikte $\Delta_1^2 = 1/4 \sigma^2$ değerindedir. Her iterasyonda varyans yarılanır. Varyans değeri (3.20) numaralı eşitliği kullanarak bulunabilir.

$$\Delta_n^2 = \frac{1}{2^{n+1}} \sigma^2 \quad (3.20)$$

Bu metot $\Delta t = 2^{-n}$ zaman farklarına uygundur. $2^{-(n+1)} \sigma^2$ varyanslı rasgele değer hesaplanan orta noktaya eklenir. Ölçek parametresi olan H değerini eşitliğe ekleyerek (3.21) numaralı eşitliği elde ederiz.

$$\text{var}\{X(t_2) - X(t_1)\} = |t_2 - t_1|^{2H} \sigma^2 \quad (3.21)$$

H parametresinin yüksek değerleri için yer değiştirme azalarak daha düzgün şekiller elde edilir. Ayrıca şekillerin fraktal boyutları H parametresine bağlıdır.

3.2.4. Brown Hareketi ve olasılık teorisi

Sabit uzunluktaki ayırık adımlardan oluşan diziyi ($X[n]$) içeren rasgele sürece rasgele-yol (random walk) denilir. T uzunluğundaki sürelerde sabit olan analog bir rasgele süreç için;

$$X_T(t) = \sum_{k=1}^{\infty} W[k]u(t - kT) \quad (3.22)$$

$W[k]$ +s için $p=0.5$, -s için $p=0.5$ değerlerini alır.

$X_T(nT) = \sum_{k=1}^n W[k] = X[n]$ rasgele-yol dizisi haline gelir. Olasılık yoğunluk fonksiyonları rasgele yol'un bilinen sonuçlarından elde edilebilir. Brown Hareketi (Wiener) olarak bilinen sürecin dağılımı üstteki denklemde T' yi sıfıra götürerek bulunabilir. İfadedeki atlama aralığı s ve aralık T' yi limit olarak sıfıra götürünce sürekli bir rasgele süreç elde ederiz.

Wiener prosesi gaz moleküllerinin kaotik rasgele hareketine model oluşturması amacı ile geliştirilmiştir. Bu hareket literatürde Brown hareketi olarak bilinir. Bu nedenle bu hareket Brown Hareketi veya Wiener Prosesi olarak adlandırılır.

$X[n]$ rasgele değişkeni n tane bağımsız Bernouli rasgele değişkeninin toplamı olarak ifade edilir.

$$E[X_T(nT)] = 0 \quad (3.23)$$

$E[X_T^2(nT)] = ns^2$ $t=nT$ sonucunda varyans değerine ulaşılır.

$$\text{Var}[X_T(t)] = E[X_T^2(nT)] = ts^2/T \quad (3.24)$$

Şimdi bizim yapmamız gereken s^2 ifadesini T ile ilişkilendirmektir çünkü T sıfıra giderken varyans sabit kalır. $s^2 = \alpha T$ dersek ($\alpha > 0$) varyans sabittir (αt). Ortalama limit teoremi vasıtasıyla sınırlı Gauss dağılımına ulaşılır. Bu sonuç Wiener prosesi için bilinen forma ulaşır.

$$\mu_x(t) = 0, \text{Var}[X_T(t)] = \alpha t \quad (3.25)$$

Fiziksel olarak sonuçları irdelersek s^2 ifadesi T ile orantılıdır ve parçacığın hızı $v = s/T$ yaklaşımı ile (s aldığı yol) ifade edilir. Formüle göre alınan yol sıfıra giderken ($s=0$) hız sonsuza gider.

İstatiksel ortalaması sıfır, varyansı αt olan Wiener Prosesi için olasılık yoğunluk fonksiyonu ise bilinen Gauss dağılımıdır.

$$F_x(x,t)=1/(2\pi\alpha t)^{1/2} \exp(-x^2/2\alpha t), \quad t>0 \quad (3.26)$$

Yer değişimin olasılık yoğunluk fonksiyonu (3.28) numaralı eşitlikle bulunabilir.

$$\Delta=X(t)-X(\tau) \quad \text{tüm } t>\tau \text{ için} \quad (3.27)$$

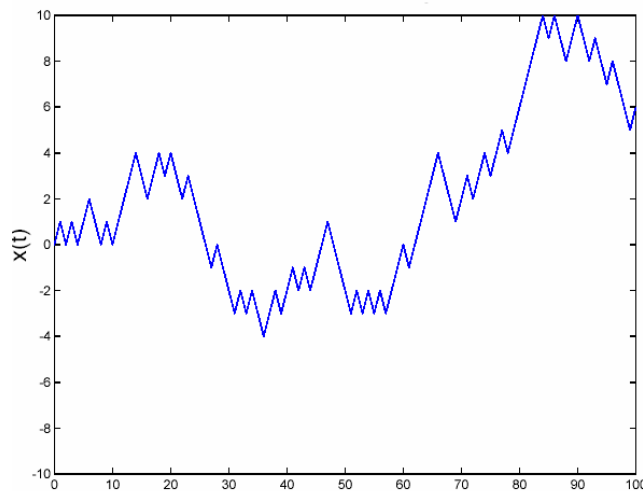
$$f_{\Delta}(t-\tau)=1/[2\pi\alpha(t-\tau)]^{1/2} \exp[-\delta^2/2\alpha(t-\tau)] \quad (3.28)$$

$$E[X(t)-X(\tau)]=E[\Delta]=0 \quad (3.29)$$

$$E[(X(t)-X(\tau))^2]=\alpha(t-\tau) \quad t>\tau \text{ için} \quad (3.30)$$

Bu olasılık yoğunluk fonksiyonlarını kullanarak n'inci derece olasılık yoğunluk fonksiyonları bulunabilir ve bu n'inci derece olasılık yoğunluk fonksiyonları da Wiener prosesi için Gauss'tur. Bilindięi üzere bütün pozitif n tamsayıları için rasgele değişkenin n'inci derece olasılık yoğunluk fonksiyonu birleşik Gauss ise bu olay Gauss rasgele olayı adını alır. Wiener prosesi de bir Gauss sürecidir. Wiener prosesinin kovaryans fonksiyonu (aynı zamanda korelasyon fonksiyonudur çünkü $\mu_x(t)=0$)

$$C_{XX}(t_1,t_2)=\alpha \min(t_1,t_2), \quad \alpha>0 \quad (3.31)$$



Şekil 3.8: Parçacığın $\alpha=1$ verilerek elde edilen Brown hareketi

$t_1 > t_2$ seçerek yer değiştirmenin $X(t_2)$ 'den bağımsız olduğunu gösterebiliriz.

$$E[(X(t_1) - X(t_2))X(t_2)] = E[(X(t_1) - X(t_2))] E[X(t_2)] = 0 \quad (3.32)$$

$$E[X(t_1)X(t_2)] = E[X(t_2)^2] = \alpha t_2 \quad (3.33)$$

Eğer $t_1 < t_2$ alırsak;

$E[X(t_2)X(t_1)] = \alpha t_1$ olur ve bu bize kovaryans denklemini sağladığını gösterir.

3.3. ÖRNEKLERİN YAPISI VE AŞINDIRMA SİSTEMİ

Fraktal boyut kavramından yola çıkılarak incelenecek yüzey aşınımına uğramış örnekler laboratuvar şartlarında hazırlanır. Bu elektriksel aşınımın ve bozulmaların test edilmesi için çeşitli metotlar vardır.

- Eğik Düzlem Testi (Inclined Plane Test)
- CTI Test (Comparative Tracking Index Test)
- Toz – Sis Testi (Dust Fog Test)
- Tuz – Sis Testi (Salt Fog Test)
- Kuru Ark Testi (Dry Arc Test)
- Ayırık Nem Aşınım (Differential Wet Tracking) Testi
- Aşınım Dayanım Çarkı (Tracking Endurance Wheel) Testi

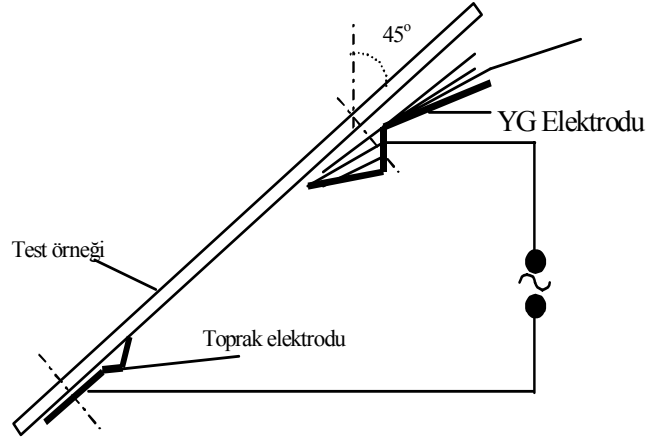
Bu testlerin bazıları güncelliğini yitirmiş olduğundan kullanılmamaktadır. Bu tezde kullanılan örnekler Eğik Düzlem Testinde gerçekleştirildiği için bu test sistemi incelenecektir.

3.3.1. Eğik Düzlem Testi (Inclined Plane Test)

Eğik Düzlem Testi (Inclined Plane Test) ilk olarak 1961 yılında gerçekleştirilmiş ve 1964 yılında Amerika’da ASTM D2303 standardı olarak kabul edilmiştir. Bu test ile ilgili olarak ilerleyen yıllarda IEC 587 standardı olarak yeni bir standart geliştirilmiştir. ASTM ve IEC testleri arasında küçük farklılıklar olmakla birlikte temelde aynı teoriye dayanmaktadırlar [15,16]. Bu çalışmada yapılan bütün testler Eğik Düzlem Testinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.9’deki deney düzeneği bu çalışmada örneklerin yaşlanma sürecini incelemekte kullandığımız deney düzeneğidir [16]. IEC 587 standartlarına uygun olarak düzenlenmiştir. Test örneği üzerinde kullanılan elektrodların tamamı paslanmaz çelik olup korozyona karşı dayanıklıdır.

Yüksek gerilim elektrodu ile test örneği arasına suyun düzenli bir şekilde akmasını sağlayan sekiz katlı Vatman tipi filtre kağıdı bulunmaktadır. Yüksek gerilim elektrodu üstte, toprak elektrodu alttadır.

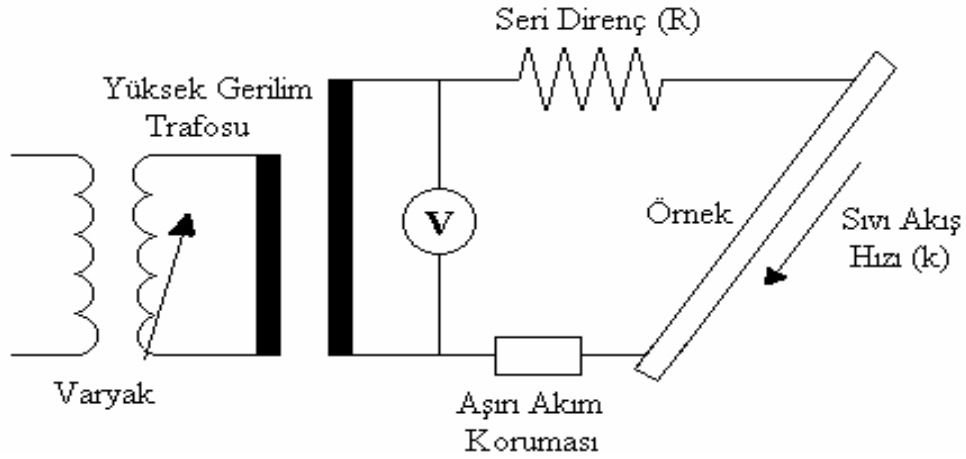


Şekil 3.9: Deney düzeneği

Yüksek gerilim elektrodu standartlarda belirtildiği gibi 33 k Ω 'luk seri ya da paralel dirençlerle sürülmekte ve kademeli olarak değerini değiştirebildiğimiz bir varyak ile beslenmektedir.

Test örneğinin üzerinden akan sıvının miktarı 36 ml/saat olarak düzenlenmiştir. Kullanılan saf suyun içine $\%0.1 \pm 0.002$ oranında NH_4Cl (Amonyum Klorür) ve $\%0.2 \pm 0.002$ oranında da Triton-X100 eklenmektedir. Test örneğinin dikey olarak 45° 'lik açı yapması nedeniyle, sıvı akışının yüzeyin tamamından geçmesi için çözeltinin içine yapışkanlık özelliğine sahip Triton-X maddesi katılmıştır [8].

Toprak elektrodu ile toprak arasına 60 mA'lık bir sigorta koyularak, test örneğinin yüzeyindekideşarjların oluşturduğu ani akım yükselmeleri önlenmiştir.



Şekil 3.10: Deney düzeneğinin şematik gösterilimi

220 V şebeke gerilimi varyak ile kontrol altında tutularak 220/4000 V çevirme oranına sahip transformatör yardımıyla 4kV'luk değere ulaştırılmaktadır. Transformatör çıkışında 33 k Ω , 18 Watt'lık yüksek gerilime dayanıklı direnç bulunmaktadır. Bu aşamadan sonra polyester test örneğinin üzerinde bulunan elektrotlara gerilim uygulanmaktadır.

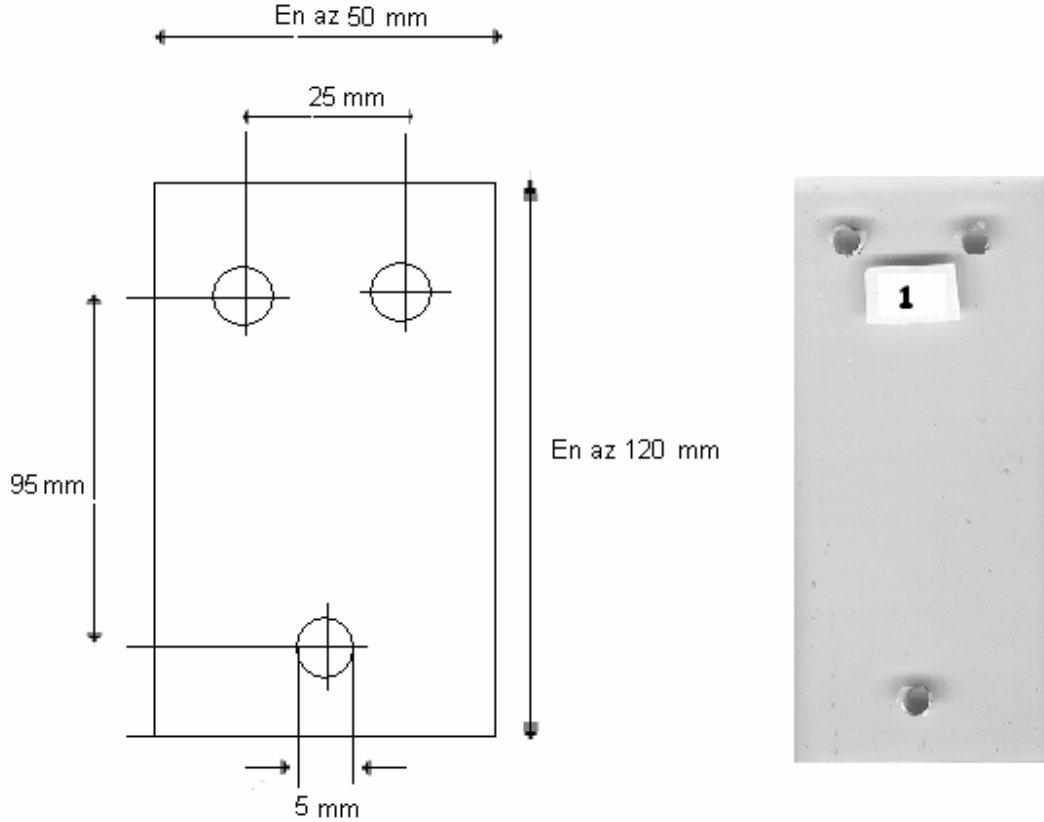
3.3.2. Test Örneği

Bu çalışmadaki deneylerde kullanılan örnekler polyester reçine kullanılarak laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Başlatıcı olarak Metiletil-Keton-Peroksit (MEKP) ve

hızlandırıcı olarak % 1 Kobalt-oktaset kullanılmıştır. Tablo 3.2’ de polyester örneklerin hazırlanışında uygulanan farklı formüller verilmiştir [17]. Bu çalışmada kullanılan polyester test örnekleri hazırlanırken polyester hacminin % 0,25 si kadar Metil-Etil-Keton-Peroksit (MEKP) kullanılmış, %0,25’ i kadar da hızlandırıcı kobalt katılmıştır. Bütün örnekler aynı laboratuvar koşulları altında hazırlanmış, 35°C sıcaklıktaki bir fırında 4 saat süre ile pişirilmiştir. Hazırlanan örneklerin boyutları 100mmx55mmx9mm olacak şekilde hazırlanmıştır [15, 18].

Tablo 3.2: Polyester örneklerin hazırlanmasında kullanılan farklı formüller

Formül No	Katalizör (MEKP)	Hızlandırıcı-Kobalt	Rengi
1	%0,25	%0,25	Seffaf
2	%0,5	%0,5	Açık yeşil
3	%0,25	%0	Seffaf
4	%0,125	%0,125	Leylak



Şekil 3.11: Deneylerde kullanılan test örneğinin boyutları

Elde edilen karışım kalıplara dökülerek birkaç dakika bekletilmiştir. Bu bekletme esnasında polyester içinde eğer hava boşlukları oluşmuşsa, bu kabarcıkların yüzeye çıkması beklenmiş ve toplu iğne ucu ile giderilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerek karışım gerekse kalıplama işleminde örnek yüzeylerinin pürüzsüz olması amacı ile tahta ve cam kullanılmaya özen gösterilmiştir. Şekil 3.11’de deneylerde kullanılan test örneğinin boyutları verilmektedir.

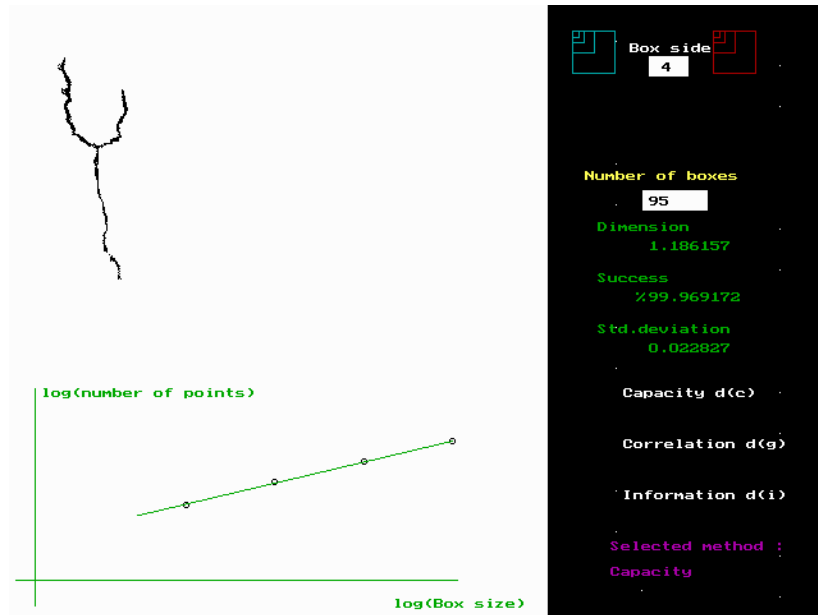
Test örneğinin üzerinden akacak olan sıvı, içerisinde %0,2 NH_4Cl (Amonyum klorür) ve %0,1 Triton-X olan elektrolittir. Bu çözeltide amonyum klorür sıvının elektrik iletkenliğini arttırmak, Triton-X ise sıvının yalıtkan yüzeyinde daha uzun süre kalmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Test örneğinin üst kısmına yerleştirilen yüksek gerilim elektrodu ile alt kısma yerleştirilen toprak elektrodu arası en az 50 mm’dir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada yüzeysel iz oluşumu testi kullanılarak çeşitli koşullar altında polimerik yalıtkanlarda gözlenen yüzeysel karbon izler, fraktal boyut kavramı ile matematiksel açıdan incelenmiştir. Farklı koşulların etkileri boyut değerlerindeki değişim ölçülerek irdelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında Brown Hareketi modeli kullanılarak deneylerde elde edilen örneklere benzer yapıda şekiller simülasyon yoluyla elde edilmiştir ve bu şekillerin fraktal boyutları da göz önüne alınarak incelenmiştir.

4.1. TEST ÖRNEKLERİN FRAKTAL BOYUT AÇISINDAN İNCELENMESİ

Fraktal boyut incelemesi için kullanılacak yüzey aşınımları barındıran polimer örnekler laboratuvar ortamında IEC 587 test standartlarına uygun olarak kurulan test düzeneğinde daha önceden elde edilmiştir [29]. Bu örnekler, fraktal boyut hesaplamak amacıyla C dilinde yazılmış bir program kullanılarak incelenmiştir [8]. Fraktal boyut hesaplanması aşamasında kapasite, korelasyon ve bilgi boyutu metotları kullanılmıştır.



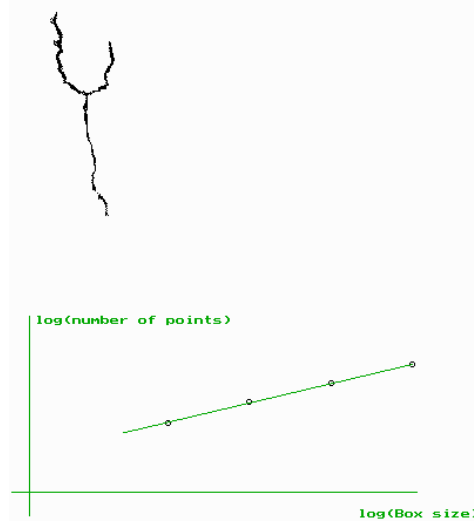
Şekil 4.1: Programın sonuç yapısı

Program çıkışında, verilen şeklin logaritmik olarak boyut grafiğini çizdirir ve üç ayrı metot için boyutları hesaplar. Örnekler üç ayrı koşul altında elde edilmiştir. Bunlar sırasıyla:

1. Herhangi bir dış etki olmaksızın elde edilen örnekler
2. Nem Etkisi altında elde edilen örnekler
3. Titreşim etkisi altında elde edilen örnekler

4.1.1. Herhangi Bir Dış Etki Olmaksızın Elde Edilen Örnekler

Çalışmanın bu bölümünde yapılan deneylerde örneklerin ve deneyin yapıldığı laboratuvar ortamında tüm dış etkenler sabit tutulmuştur. 4 kV gerilim seviyesi ve 36 ml/saat sıvı akış hızı kullanılarak yapılan deneylerde iz oluşumu şekilleri tespit edilmiştir. Polimerik yalıtkanlarda hiçbir etki olmadığı durumda elde edilen iz oluşumları fraktal boyut kavramı açısından incelenmiştir.



Şekil 4.2: Herhangi bir dış etki olmaksızın elde edilen örnekler

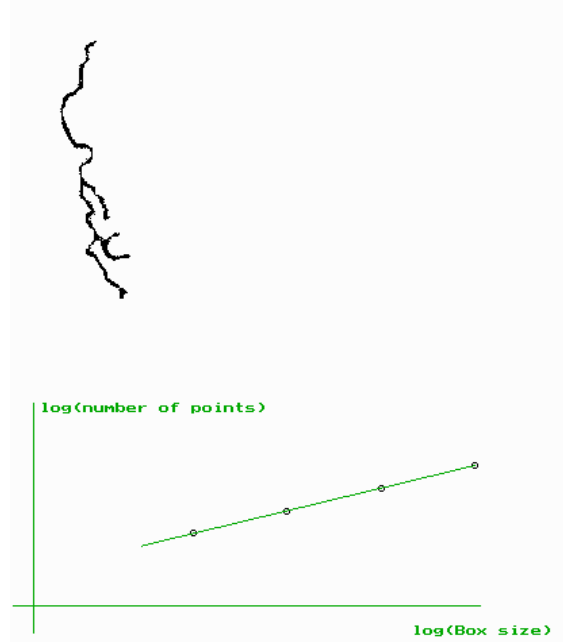
Herhangi bir dış etki olmaksızın elde edilen 5 örnek için ortalama fraktal boyut değerleri sırasıyla kapasite boyutu, korelasyon boyutu ve bilgi boyutu olarak hesaplanmıştır.

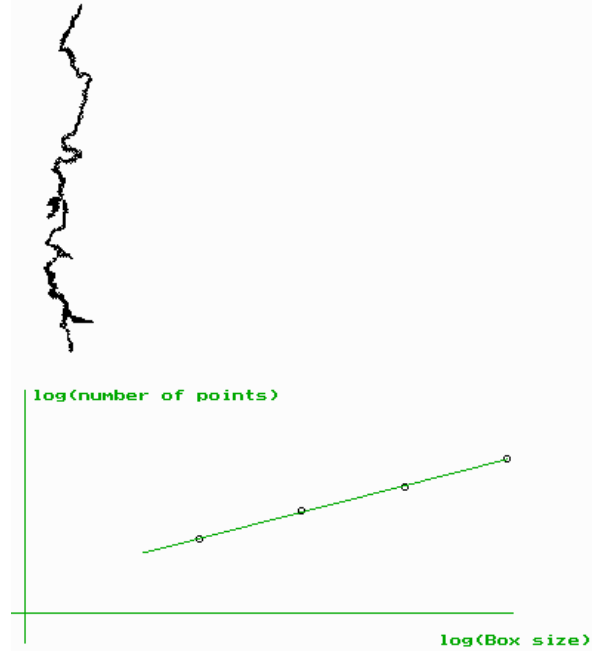
Tablo 4.1: Herhangi bir dış etki olmaksızın elde edilen örneklerin fraktal boyutları

BOYUT HESAPLAMA TEKNİĞİ	BOYUT DEĞERİ
Kapasite Boyutu	1,186
Korelasyon Boyutu	1,112
Bilgi Boyutu	1,257

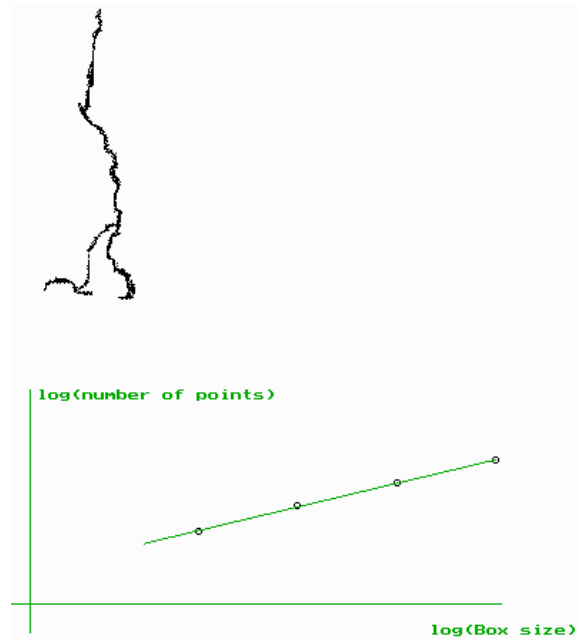
4.1.2. Nem Etkisi Altında Elde Edilen Örnekler

Deneyler sırasında test örneğinin içinde bulunduğu düzenek hava geçirmez özellikte şeffaf jelatin ile kaplanmış böylece örneğin içinde yer aldığı kafes düzeneğin her noktasındaki nem değerinin aynı olması amaçlanmıştır. Düzeneğin içerisine bir buhar üretici yardımı ile verilen buhar bir nemölçer yardımı ile ölçülmüş ve istenen değere ulaştığında buhar üretimi kesilmiştir. Daha sonra istenen nem seviyesi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ortam sıcaklığının 28 °C olduğu koşullarda %40, %60, %80 ve %99 nem seviyeleri seçilmiştir.

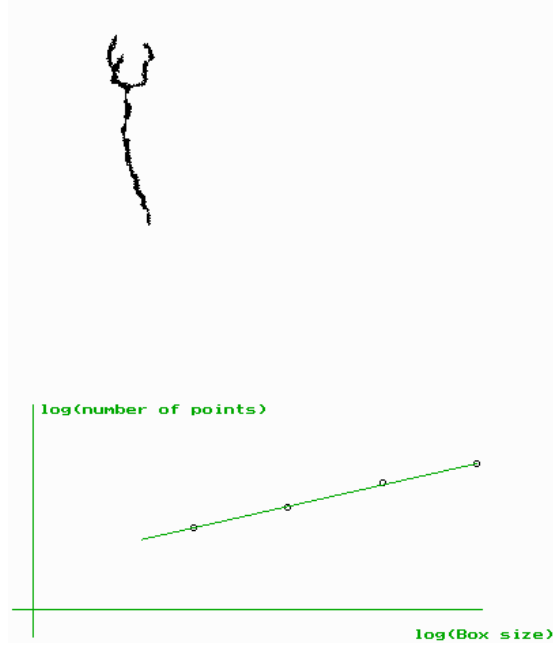
**Şekil 4.3:** %40 nem etkisi altındaki örnekler



Şekil 4.4: %60 nem etkisi altındaki örnekler



Şekil 4.5: %80 nem etkisi altındaki örnekler



Şekil 4.6: %99 nem etkisi altındaki örnekler

Nem etkisi altındaki örnekler için ortalama fraktal boyut değerleri hesaplanıp Tablo 4.2’ de gösterilmiştir.

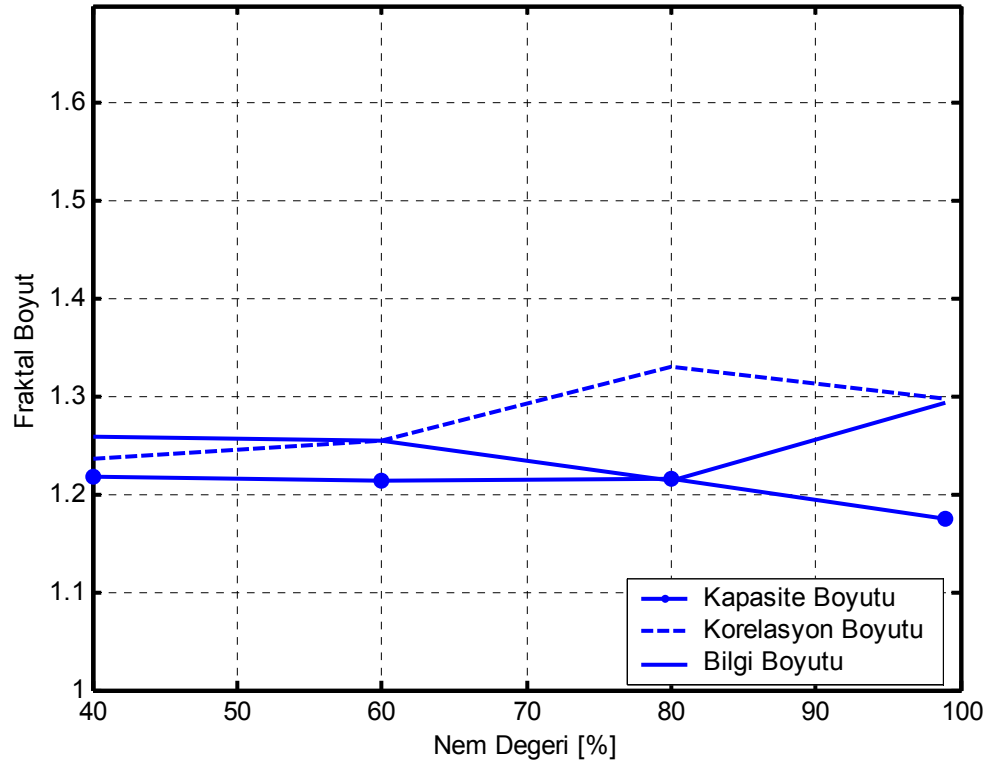
Tablo 4.2: Nem etkisi altındaki örneklerin fraktal boyutları

% NEM DEĞERİ	KAPASİTE BOYUTU	KORELASYON BOYUTU	BİLGİ BOYUTU
%40	1,219	1,236	1,258
%60	1,213	1,254	1,255
%80	1,216	1,330	1,213
%99	1,174	1.297	1,294

Tablo 4.3: Nem etkisi altındaki örneklerin ortalama fraktal boyutları

% NEM DEĞERİ	FRAKTAL BOYUT
%40	1,238
%60	1,241
%80	1,256
%99	1,257

Nem etkisi altındaki örneklerin, fraktal boyutları ile nem oranları arasındaki ilişki şekil 4.7’ de verilmiştir.



Şekil 4.7: Nem etkisi altındaki örneklerin fraktal boyutları

Nem etkisi altındaki örneklerde oluşan izlerin yatayda ne kadar yer kapladıklarına ilişkin bilgiler tablo 4.4’ de verilmiştir. Bu değerler örnekler için minimum ve maksimum değerler olarak verilmiştir.

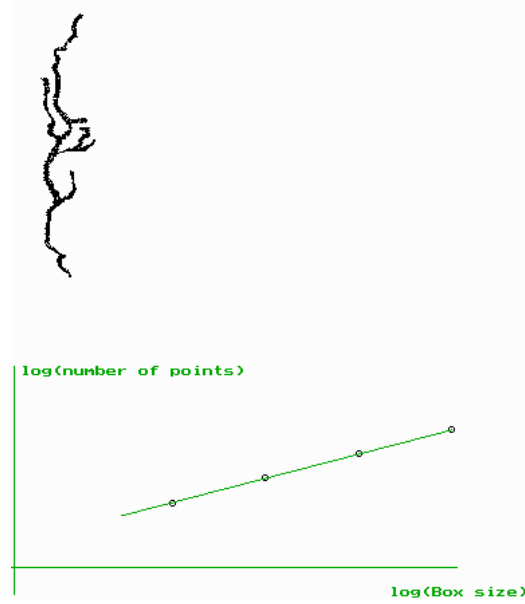
Tablo 4.4: Nem etkisi altındaki örneklerin yüzeyde (yatayda) kapladığı genişlikler

% NEM DEĞERİ	YÜZEYDE KAPLADIĞI GENİŞLİK(cm)
%40	1,2-1,4
%60	1,3-1,8
%80	1,7-2,2
%99	1,9-2,5

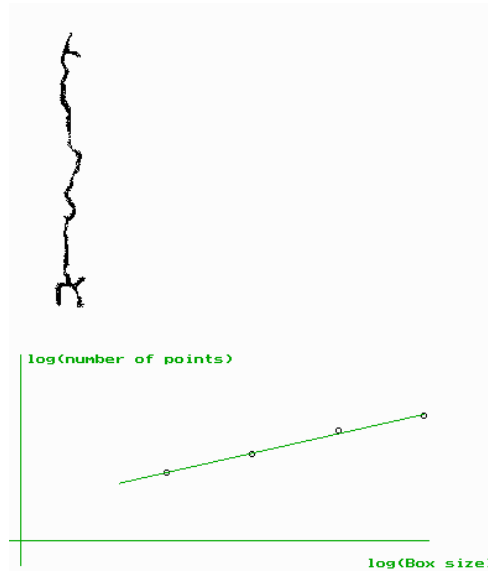
4.1.3. Titreşim Etkisi Altında Elde Edilen Örnekler

Hazırlanan deney sisteminde diğer dış etkenler (nem, sıcaklık, gerilim, sıvı akış hızı vb.) sabit tutularak mekanik titreşimlere maruz kalan polimerik yalıtkan örnekler

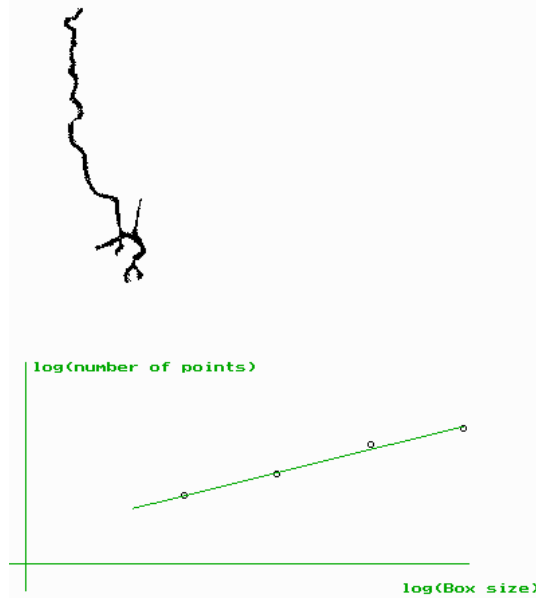
kullanılmıştır. Her aşamada ortamın titreşim hızı bir vibrasyon motoru yardımı ile değiştirilerek düşük, orta ve yüksek titreşim için örnekler elde edilmiştir [29]. Düşük titreşim değerlerini elde etmek için motor 6V doğru gerilim, orta titreşim değerlerini elde etmek için 15 V doğru gerilim, yüksek titreşim değerlerini elde etmek için ise motor 24 V doğru gerilim ile beslenmiştir.



Şekil 4.8: Düşük titreşime maruz kalan örnekler



Şekil 4.9: Orta titreşime maruz kalan örnekler



Şekil 4.10: Yüksek titreşime maruz kalan örnekler

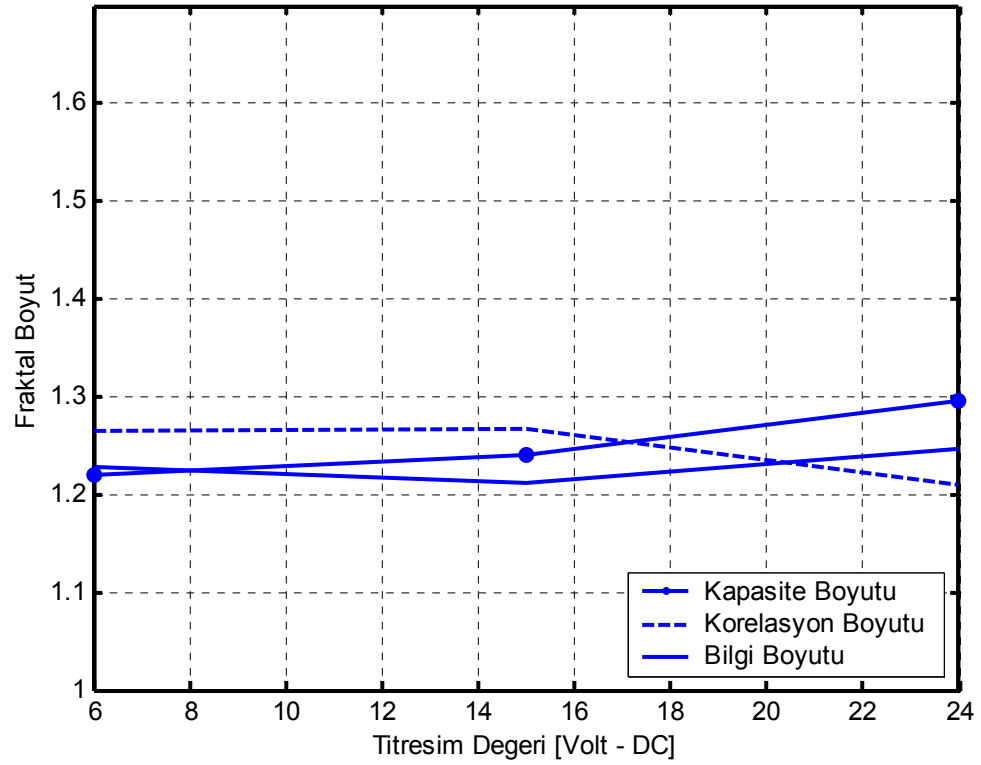
Yatay titreşime maruz kalan örneklerin üç ayrı metot için hesaplanan boyutları Tablo 4.5’ de verilmiştir.

Tablo 4.5: Yatay titreşim etkisi altındaki örneklerin fraktal boyutları

TİTREŞİM	KAPASİTE B.	KORELÂSYON B.	BİLGİ B.
Düşük (6 V)	1,220	1,266	1,228
Orta (15 V)	1,240	1,268	1,212
Yüksek (24 V)	1,295	1,209	1,246

Tablo 4.6: Yatay titreşim etkisi altındaki örneklerin ortalama fraktal boyutları

TİTREŞİM DEĞERİ	FRAKTAL BOYUT
DÜŞÜK TİTREŞİM (6 V)	1,238
ORTA TİTREŞİM (15 V)	1,240
YÜKSEK TİTREŞİM (24 V)	1,250



Şekil 4.11: Yatay titreşim etkisi altındaki örneklerin fraktal boyutları

Titreşim etkisi altındaki örneklerde oluşan izlerin yatayda ne kadar yer kapladıklarına ilişkin bilgiler tablo 4.7’de verilmiştir. Bu değerler örnekler için minimum ve maksimum değerler olarak verilmiştir.

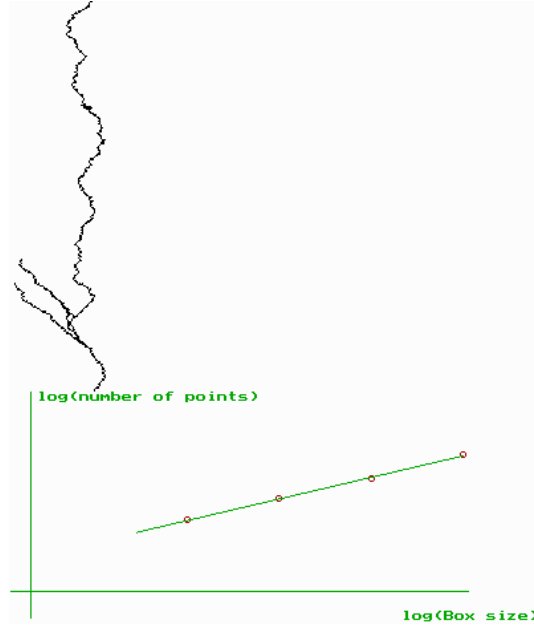
Tablo 4.7: Titreşim etkisi altındaki örneklerin yüzeyde(yatayda) kapladığı genişlikler

TİTREŞİM DEĞERİ	YÜZEYDE KAPLADIĞI GENİŞLİK(cm)
DÜŞÜK TİTREŞİM (6 V)	1,1-1,4
ORTA TİTREŞİM (15 V)	1,3-1,7
YÜKSEK TİTREŞİM (24 V)	1,9-2,3

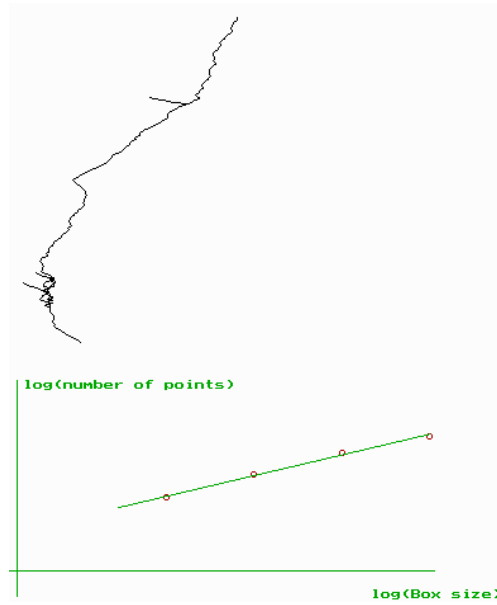
4.2. BROWN HAREKETİ İLE MODELLEME

Çalışmanın bu bölümünde deneysel yollardan elde edilen örnek şekillerinin Brown Hareketi modeli kullanan bir bilgisayar programı ile elde edilmesi amaçlanmıştır [8].

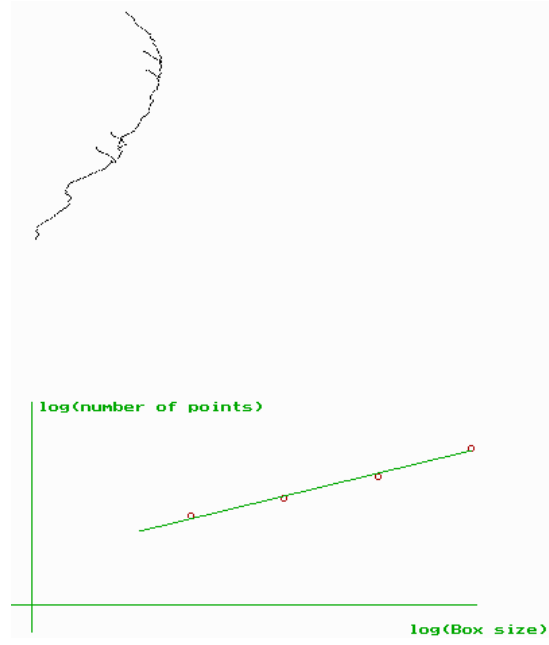
Bilgisayar programı ilk aşamada gauss fonksiyonu için gerekli olan katsayı değeri (seed) istemektedir. Bu katsayılar göre çeşitli çıkış şekilleri elde edilmiştir. Çeşitli çevre koşulları altında elde edilen örneklerin sahip olduğu karakteristik özelliklere sahip şekiller elde edilmiştir. Bu şekillerin sayısal olarak katsayı değerlerine bakılmıştır ve uygun çevre koşulu ile ilişkilendirilmiştir.



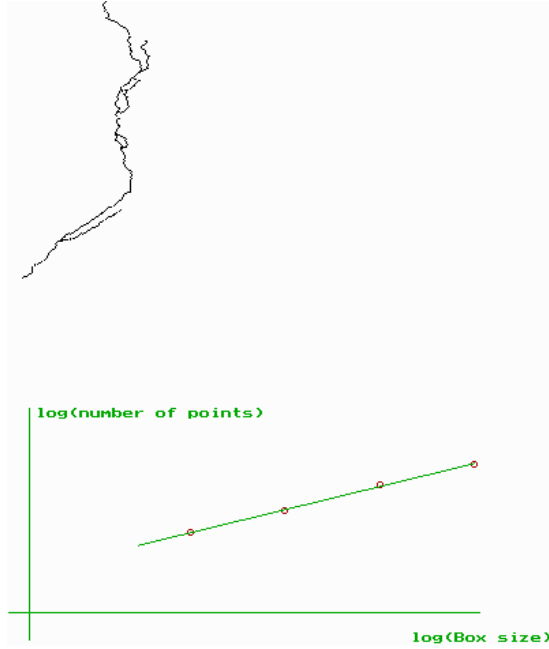
Şekil 4.12: Katsayı değeri üç olan şekil



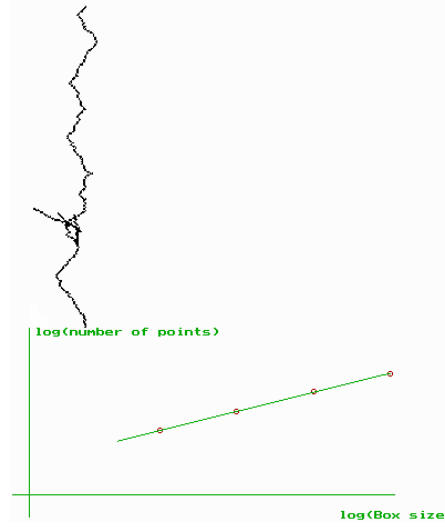
Şekil 4.13: Katsayı değeri yirmi olan şekil



Şekil 4.14: Katsayı değeri ondört olan şekil



Şekil 4.15: Katsayı değeri bir olan şekil



Şekil 4.16: Katsayı değeri dokuz olan şekil

Bilgisayar programı katsayı değerleri için çeşitli şekiller üretmektedir. Bunlar polimerlerde elde edilen şekiller gibi rasgeledir. Ancak girilen katsayı değerine karşılık beklenen fraktal boyut ve yüzeye dağılım özellikleri göstermektedir. Çeşitli katsayı değerleri için elde edilen şekiller incelendiğinde uygun şartlar için uygun şekiller elde edilmiştir.

Tablo 4.8: Nem etkisine göre bilgisayarda oluşturulan örnekler

% NEM DEĞERİ	FRAKTAL BOYUTU	YÜZEYE DAĞILIM (cm)	KATSAYI
%40	1,235	1,3	20
%60	1,240	1,5	14
%80	1,252	2	1
%99	1,258	2,3	9

Tablo 4.9: Yatay Titreşim etkisine göre bilgisayarda oluşturulan örnekler

TİTREŞİM DEĞERİ	FRAKTAL BOYUTU	YÜZEYE DAĞILIM (cm)	KATSAYI
DÜŞÜK TİTREŞİM (6 V)	1,235	1,3	20
ORTA TİTREŞİM (15 V)	1,240	1,5	14
YÜKSEK TİTREŞİM (24 V)	1,252	2	1

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada IEC 587 Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu Test metodu kullanılarak elde edilen ve elektrik endüstrisinde katı yalıtkan olarak kullanılan polimerik yalıtkan malzemelerin fraktal boyutlarının, dış etkenlerle nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu dış etkenler yatay titreşim ve bağıl nem olmak üzere iki grup olarak incelenmiştir.

Fraktal boyutları hesaplayan programda kapasite, korelasyon ve bilgi boyutu olmak üzere her örnek için üç ayrı boyut hesaplanmıştır. Her dış etki için beş ayrı örnek kullanılmıştır. Daha sonra belli bir dış etki için ortalama bir fraktal boyut değeri elde edilmiştir.

Herhangi bir dış etki olmaksızın yapılan deneylerde başka bir çalışmada elde edilmiş polimerik yalıtkanın yüzeyindeki izler dar ve derin (ortalama 1 cm) özelliktedir. Nem etkisi altında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar yalıtkanın bulunduğu ortamdaki nem oranı arttırıldığında, artan nem oranı ile birlikte polimerik örneklerin yüzeyindeki izin alanı daha geniş ve derinliğinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Titreşim etkisi altında elde edilmiş örneklerde, mekanik titreşime maruz kalan polimerik yalıtkanın artan titreşim ile birlikte üzerindeki iz alanının dağıldığı gözlemlenmiştir.

Örneklerin fraktal boyutların dış etkenlere göre hesaplanan ortalama değerleri yapıları hakkında bir fikir vermektedir. Elde edilen bulgulara göre dış etki olmadan elde edilen örneklerdeki iz oluşumlarının fraktal boyutları, nem etkisi altındaki ve titreşim etkisi altındaki örneklerle göre daha düşüktür. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü titreşim ve nem etkisi ile aşınma şekilleri yüzeye daha çok yayılır. Öklid geometrisine göre bir düzlemin boyutu 2 olup, fraktal boyut maksimum iki değerini alabilmektedir. Yüzeyin tamamen iz ile kaplanması sonucunda da fraktal boyutun iki değerine yaklaşması yüzeysel aşınımın daha çok alana yayıldığına işaret eder.

Nem etkisi altındaki örnekler yüzeyde nemlenmeye maruz kaldığı için elektriksel boşalma olayı daha çok alanda olur ve bunun sonucu olarak yüzey aşınımı şekli daha geniş alana yayılır. Nemin yani su moleküllerinin bulunduğu yüzey alanında elektriksel boşalmalar daha rahat gerçekleşir. Artan nem oranı ile birlikte fraktal boyutlarda artış gözlenir. Bu gözlemlediğimiz yüzey özellikleri ile örtüşmektedir.

Titreşim etkisi altındaki örneklerde artan titreşim ile birlikte yalıtkan yüzeyinden akan sıvının geniş bir alana dağılması sonucu yalıtkan üzerindeki iz oluşumu süresi uzamıştır. Oluşan izin yüzey üzerindeki alanının genişlediği, derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak fraktal boyutlarda, artan titreşim etkisi ile birlikte artma gözlenmiştir. Titreşimle izlerin yayılması fiziksel olarak makul bir davranıştır. Çünkü titreşim altındaki sistemde su molekülleri nem etkisinde olduğu gibi yüzeye daha çok yayılacaktır ve elektriksel boşalma daha geniş alanda olacaktır.

Çalışmanın ikinci kısmında dış etkilere maruz kalmış örneklerle benzer şekiller elde edilmiştir. Brown hareketi modeli kullanılarak bilgisayar ortamında elde edilen örnekler fraktal boyutlarına ve yüzey alanındaki izlerin genişliğine bakılarak incelenmiştir. Her bir dış etkene karşılık programa hangi katsayı (seed) değerinin girilmesi gerektiği hesaplanmıştır. Bu katsayı değerleri belli bir kesinlik sağlamamakla birlikte polimer örneklerin modellenmesi için gerekli yapıyı sağlamaktadır. Katsayı değerleri arttıkça yüzeye yayılım oranını artmaktadır. Modellenen şekiller ile gerçekte oluşan şekiller fraktal boyut ve yüzeye dağılım parametrelerine göre incelenince benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Bu da bize Brown hareketi ile bu tür yapıların modellenebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada rasgele sistemlerin de çeşitli yollarla analiz edilebileceği ve uygun yöntemlerle modellenebileceği ortaya konulmuştur. Bu tür rasgele oluşmuş yüzey bozulması izlerini incelemek için fraktal geometrisinin çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Brown hareketi modelinin ise bu tür rasgele yapıları modellemek için etkili ve yeterli bir model olduğu ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

1. MALIK, N. H., AL-ARAINY, A. A., QURESHI, M. I., 1998, *Electrical insulation in power systems*, Marcel Dekker, Inc, ISBN 08247-0106-2.
2. ADLER, A., 1971, *Physics of Electronic Ceramics*, Part A. L. L. Hench and D. B. Dove (Eds.), Marcel Dekker, Inc., New York.
3. SHUGG, W.T., 1995, *Handbook of Electrical and electronic insulating materials*, 2.ed., IEEE Press, ISBN 0-7803-1030-6.
4. DORF, R.C., 1993, *The Electrical Engineering Handbook*, CRC Press, 1132-1151.
5. ALGHAMDI, ASG., AUCLAND, DW., HON, BR., VARLOW, BR., 1992, *The Influence of stray capacitance on wet tracking of polyester resin*, DMMA 6.
6. GALLAGHER, T.J., PEARMAIN, A.J., 1984, *High Voltage Engineering*, Great Britain by Pitman Press, ISBN 0-471-90096-6
7. BILLINGS, M.J., SMITH, A, WILKINS, R, 1967, *Tracking in polymeric insulation*, E 12(3), 131-137.
8. UĞUR, M., 1997, *Modelling and analysis of surface tracking phenomena of solid insulating materials*, University of Manchester, Doktora tezi, 270.
9. MEREV, A., 1999, *Polimerik katı yalıtkanlarda yüzey aşınımının mekanik etkenler karşısındaki değişimi*, Yüksek Lisans Tezi.
10. LIPROT, F.J., 1996, *An examination of the servise performance of ceramic insulators*, IEE Colloquium on a review of outdoor insulation materials, 4.1-4.7.
11. LOOMS, J. S. T., 1988, *Insulators for High Voltages*, Peter Peregrinus, London 276.

12. KUFFEL, E., ABDULLAH, M., (Çevirenler: ÖZKAYA, M., TÜFEKÇİ, T., ERGAN, N.), 1986 *Yüksek Gerilim Tekniği*, İTÜ Yayınları, 65-80.
13. BENZAOUNA, S. F., WILLIAMS, D. L., GRIFFITHS, H., ROWLANS, A. R., WATERS, R. T., 1993, *Wetting action in a fog test facility*, UPEC 93, 2, 557-560.
14. WATSON, J. F., MASON, J. H., Lych, A. C., 1979, *Assessing materials for use as outdoor insulation*, ISH 3, 1-4.
15. ASTM D2303, 1978, *Standard test methods for liquid contaminant, inclined plane tracking and erosion of insulating materials*, 552-556.
16. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1984, IEC 587, *Inclined Plane Tracking Test Method*.
17. SCOTT BADER FİRMASI, 1991, *Technical Information*, Katalog, 1-5.
18. BILLINGS, M.J., WILKINS, R., WARREN, L., 1968, *A comparison of the IEC Dust-Fog and Inclined Plane test*, EI 3, 33-39.
19. KUNTMAN, A., ERSOY, A., GÜNEŞ, İ. and UĞUR, M., 2003, *Polimerik yalıtkanların yaşlanma sürecine nemin etkisinin incelenmesi*, XVII. Ulusal Kimya Kongresi, İstanbul.
20. MANDELBROT, B.B., 1983, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Company.
21. NIEMEYER, L., PIETRONERO, L., WIESMANN, H. J., 1984, *Fractal Dimension of Dielectric Breakdown*, Phys. Rew. Lett. 52, 1033-1036
22. TAKAYASU, H., 1990, *Fractals In The Physical Sciences*, Manchester University Press, Manchester.

23. RUSS, J.C., 1994, *Fractal Surfaces*, Plenum Press, ISBN 0-8493-2241-3.
24. KUDO, K., MARUYAMA, S., 1990, *Fractals of Computer Simulated Tree*, CEIDP, 502-507.
25. THOMPSON, D. W., 1917, *Growth and Form*, Cambridge University Press.
26. SCHILPP, P.A., 1949, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, The Library of Living Philosophers Vol. II, Illinois.
27. KLAFTER, J., SHLESINGER, M.F., ZUMOFEN, G., 1996, *Beyond Brownian Motion*, AIP, 33-39.
28. HALSEY, T.C., LEIBIG, M., 1992, *Theory of Branched Growth*, Phys. Rev. A. 46(12), 7793-7809.
29. GÜNEŞ, İ., 2005, *Polimerik Yalıtkanlarda Titreşimin Kullanım Ömrü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

EKLER

EK-A

Fraktal Boyut Hesaplama Programı C Kodu

```
#include "stdio.h"
#include "dos.h"
#include "alloc.h"
#include "stdlib.h"
#include "string.h"
#include "conio.h"
#define pixels2bytes(n)      ((n+7)/8)
#define plane(n)             { outp(0x3c4,2); outp(0x3c5,(n)); }
#include <graphics.h>
#include <math.h>
void *alan;
void *grid;
void *griddel;
void image(void);
void imagedel(void);
void dimensionbox(void);
void fracdim(void);
void correbox(void);
void inforbox(void);

int size,nm,ss=4,t,k,lim,limit;
unsigned int Nu;
float A1,A0,box[10],R2,N[10],Syx;

char c;
typedef struct {
    char manufacturer;
    char version;
    char encoding;
    char bits_per_pixel;
    int xmin,ymin;
    int xmax,ymax;
    int hres;
    int vres;
    char newpalette[48];
    char reserved;
    char colour_planes;
    int bytes_per_line;
    int newpalette_type;
    char filler[58];
} PCXHEAD;
```

```

main()
{
    FILE *fp;
    PCXHEAD pcx;
    union REGS r;
    char *screen=MK_FP(0xa000,0x0000);
    char *p,*pr,newpalette[768];
    char name[30],numbuf[5],err[5],side[5],dev[8];
    unsigned int width,depth,bytes,bits,planebytes;
    unsigned int screenwidth,screendepth,screenbytes,screenmode;
    unsigned int i,j;
    int gdriver=DETECT,gmode=0;
    int renk,chh,x,y,color;
    int hor;
    float ver;
    printf("Please enter the name of the image file!\n");
    scanf("%s",name);

    if((fp=fopen(name,"rb"))==NULL)
    {
        printf("Can't open the PCX file.");
        exit(1);
    }
    if(fread((char *)&pcx,1,sizeof(PCXHEAD),fp) != sizeof(PCXHEAD))
        printf("Can't read the PCX header.");

    if(pcx.manufacturer != 10)
        printf("This isn't a PCX file.");

    if(pcx.bits_per_pixel==1) bits=pcx.colour_planes;
    else bits=pcx.bits_per_pixel;
    width=pcx.xmax-pcx.xmin;
    depth=pcx.ymax-pcx.ymin;
    bytes=pcx.bytes_per_line;
    if(bits==1) {
        screenwidth=640;
        screendepth=480;
        screenbytes=80;
        screenmode=0x0012;
        memcpy(newpalette,"\000\000\000\377\377\377",6);
    }
    else if(bits <= 4) {
        screenwidth=640;
        screendepth=480;
        screenbytes=80;
        planebytes=pixels2bytes(width);
        screenmode=0x0012;
        memcpy(newpalette,pcx.newpalette,48);
        bytes*=bits;
    }
}

```

```

    }
else {
    screenwidth=320;
    screendepth=200;
    screenbytes=320;
    screenmode=0x0013;
    fseek(fp,-769L,SEEK_END);
    if(fgetc(fp) != 12)
        printf("Can't find the newpalette");
    if(fread(newpalette,1,768,fp) != 768)
        printf("Can't read the newpalette");
    fseek(fp,(long)sizeof(PCXHEAD),SEEK_SET);
}
if((p=malloc(bytes))==NULL)
    printf("Can't allocate memory.");
initgraph(&gdriver,&gmode,"c:\\borlandc\\bgi");

r.x.ax=screenmode;
int86(0x10,&r,&r);

setnewpalette(newpalette,bits);

for(i=0;i<depth && i<screendepth;++i) {
    if(readpcxline(p,fp,bytes) != bytes) {
        r.x.ax=0x0003;
        int86(0x10,&r,&r);
        printf("The PCX file is damaged.");
    }
    if(bits==1) memcpy(screen,p,min(screenbytes,bytes));
    else if(bits==8) memcpy(screen,p,min(screenwidth,bytes));
    else {
        pr=p;
        for(j=0;j<bits;++j) {
            plane(1<<j);
            memcpy(screen,pr,min(screenbytes,planebytes));
            pr+=planebytes;
        }
        plane(0x0f);
    }
    screen+=screenbytes;
}

size=imagesize(440,0,600,60);
alan=malloc(size);
getimage(440,0,600,60,alan);

for(k=0;k<480;k++)

```

```

{
for(t=0;t<640;t++)
{
    chh=getpixel(t,k);
    if(chh==15)
        goto cik;
}
lim=k;
break;
cik :
}

for(t=100;t<420;t++)
{
for(k=0;k<lim;k++)
{
    chh=getpixel(t,k);
    if(chh==15)
        goto cikis;
}
limit=t;
break;
cikis:
}

setcolor(15);
bar(limit,0,420,480);
bar(0,lim,400,480);

start:
setcolor(15);
bar(0,300,400,480);
outtextxy(485,30,"Box side");

outtextxy(480,300,"Capacity d(c)");
outtextxy(480,340,"Correlation d(g)");
outtextxy(480,380,"Information d(i)");

setcolor(MAGENTA);
outtextxy(470,420,"Selected method :");
putimage(460,430,alan,COPY_PUT);
do {
c=getch();
if(c=='c')
{
    outtextxy(470,440,"Capacity");
}
else if(c=='g')
{

```

```

        outtextxy(470,440,"Correlation");
    }
    else if(c=='i')
    {
        outtextxy(470,440,"Information");
    }
    else if(c=='q')
    {
        exit(0);
    }
    } while(c!='c' && c!='g' && c!='i' && c!='q');

    Nu=0;

    for(y=0;y<271;y++)
    {
        for(x=0;x<321;x++)
        {
            color=getpixel(x,y);
            if(color==0)
            {
                Nu++ ;
            }
        }
    }

    if(Nu==0)
    {
        outtextxy(100,200,"No data!!!");
        delay(1000);
        exit(1);
    }

    if(c!='i')
    {
        setcolor(2);
        line(20,300,20,470);
        line(5,450,350,450);
        outtextxy(300,465,"log(Box size)");
        outtextxy(25,300,"log(number of points)");
    }

    for(nm=0;nm<ss;nm++)
    {
        box[nm]=pow(2,(5-nm));

        image();
        imagedel();
        setcolor(0);
    }

```

```

bar(500,40,530,55);
sprintf(side,"%0.0f",box[nm]);
outtextxy(510,45,side);
if(c=='c')
dimensionbox();
else if(c=='g')
correbox();
else if(c=='i')
inforbox();
}

setcolor(2);
fracdim();

if(c=='g')
{
for(hor=100;hor<347;hor++)
{
ver=(fabs(A0)+A1*((float)hor/100.0));
putpixel(hor,300+20*ver,2);
}
}

else if(c=='c')
{
for(hor=100;hor<347;hor++)
{
ver=(fabs(A0)-A1*((float)hor/100.0));
putpixel(hor,300+20*ver,2);
}
}
if(c=='g')
{
A1=-A1;
}

outtextxy(460,170,"Dimension");
sprintf(numbuf,"%f",A1);
outtextxy(500,185,numbuf);

outtextxy(460,210,"Success");
sprintf(err,"%f",100*R2);
outtextxy(490,225,"%");
outtextxy(500,225,err);

outtextxy(460,250,"Std.deviation");
sprintf(dev,"%f",Syx);
outtextxy(500,265,dev);

```

```

    sound(1800);
    delay(1500);
    nosound();

    c=getch();
    putimage(430,5,alan,COPY_PUT);
    delay(3000);
    if(c=='q');
    else
    {
        putimage(460,165,alan,COPY_PUT);
        putimage(460,220,alan,COPY_PUT);
        putimage(440,100,alan,COPY_PUT);
        goto start;
    };
    r.x.ax=0x0003;
    int86(0x10,&r,&r);
    return 0;
}

```

```

readpcxline(p,fp,bytes)
    char *p;
    FILE *fp;
    unsigned int bytes;
    {
        int n=0,c,i;
        memset(p,0,bytes);
        do {
            c=fgetc(fp) & 0xff;
            if((c & 0xc0) == 0xc0) {
                i=c & 0x3f;
                c=fgetc(fp);
                while(i--) p[n++]=c;
            }
            else p[n++]=c;
        } while(n<bytes);
        return(n);
    }

```

```

setnewpalette(p,bits)
    char *p;
    int bits;
    {
        union REGS r;
        int i,n;
        n=1<<bits;
        if(bits <= 4) {

```

```

        for(i=0;i<n;++i) {
            r.x.ax=0x1000;
            r.h.bh=i;
            r.h.bl=i;
            int86(0x10,&r,&r);
        }
    }
    outp(0x3a6,0xff);
    for(i=0;i<n;++i) {
        outp(0x3c8,i);
        outp(0x3c9,(*p++) >> 2);
        outp(0x3c9,(*p++) >> 2);
        outp(0x3c9,(*p++) >> 2);
    }
}
error(s)
char *s;
{
    puts(s);
    exit(1);
}

/*****
***/
/* Function name : image() */
/* Description : this function draws a blue rectangular according to */
/* the box value */
/*****
***/

void image(void)
{
    setcolor(3);
    rectangle(440,20,441+box[nm],21+box[nm]);
    size=imagesize(440,20,441+box[nm],21+box[nm]);
    grid=malloc(size);
    getimage(440,20,441+box[nm],21+box[nm],grid);
}

void imagedel(void)
{
    setcolor(4);
    rectangle(550,20,551+box[nm],21+box[nm]);
    size=imagesize(550,20,551+box[nm],21+box[nm]);
    griddel=malloc(size);
    getimage(550,20,551+box[nm],21+box[nm],griddel);
}

```

```

/*****
**/
/*****
**/

void dimensionbox(void)
{
    int color,x=1,y=1;
    long no;
    char bufN[5];

    setcolor(0);
    no=0;

    setcolor(YELLOW);

    outtextxy(450,130,"Number of boxes");

do {
do {
    putimage(x-1,y-1,griddel,XOR_PUT);
    for(t=0;(t<box[nm]);t++)
    {
        for(k=0;(k<box[nm]);k++)
        {
            color=getpixel(x+k,y+t);
            if(kbhit())
                exit(1);
            if(color==0)
            {
                no++;
                putimage(x-1,y-1,griddel,XOR_PUT);
                putimage(x-1,y-1,grid,XOR_PUT);
                putimage(x-1,y-1,grid,XOR_PUT);
                setcolor(0);
                bar(495,145,545,160);
                sprintf(bufN,"%ld",no);
                outtextxy(500,150,bufN);
                goto end;
            }
        }
    }
    putimage(x-1,y-1,griddel,XOR_PUT);
    end:x+=box[nm];
}
while(x<321);
x=1;

```

```

    y+=box[nm];
}
while(y<271);
sound(1000);
N[nm]=no;
circle(100*log(32/pow(2,nm)),300+20*fabs(log(N[nm])),2);

delay(100);
nosound();
delay(500);
}

/*****
***/
/*****
***/

void correbox(void)
{
    int no,color,x=1,y=1;
    char bufC[5];
    float Pi,Zi;
    Pi=0.0;
    setcolor(0);
    no=0;

    setcolor(YELLOW);
    putimage(445,95,alan,COPY_PUT);
    outtextxy(450,130,"Points in boxes");

    do{
        do{
            putimage(x-1,y-1,griddel,XOR_PUT);
            for(t=0;(t<box[nm]);t++)
            {
                for(k=0;(k<box[nm]);k++)
                {
                    color=getpixel(x+k,y+t);

                    if(kbhit())
                        exit(1);
                    if(color==0)
                    {
                        no++;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        setcolor(0);
        bar(495,145,535,160);
        sprintf(bufC,"%d",no);
        outtextxy(500,150,bufC);
        Pi=(Pi+pow(no,2));
        no=0;
        putimage(x-1,y-1,griddel,XOR_PUT);
        x+=box[nm];

    }
    while(x<321);
    x=1;
    y+=box[nm];
}
while(y<271);
sound(1000);
N[nm]=(float)(Pi/pow(Nu,2));
setcolor(4);
circle(100*log(32/pow(2,nm)),300+20*fabs(log(N[nm])),2);
delay(100);
nosound();

delay(500);

}

/*****
**/
/*****
**/

void inforbox(void)
{
    int no,color,x=1,y=1;
    char bufC[5];
    float Pi,Zi;
    double sonuc;
    Pi=0.0;
    setcolor(0);
    no=0;

    setcolor(YELLOW);
    outtextxy(450,130,"Points in boxes");

    do{
        do{

```

```

putimage(x-1,y-1,griddel,XOR_PUT);
for(t=0;(t<box[nm]);t++)
{
for(k=0;(k<box[nm]);k++)
{
color=getpixel(x+k,y+t);

if(kbhit())
exit(1);
if(color==0)
{
no++;
}
}
}
setcolor(0);
bar(495,145,535,160);
sprintf(bufC,"%d",no);
outtextxy(500,150,bufC);

sonuc=((float)no/(float)Nu);

if ( no > 0 )
{
Pi=(Pi+(sonuc*log(sonuc)));
}

no=0;
putimage(x-1,y-1,griddel,XOR_PUT);

x+=box[nm];
}
while(x<321);
x=1;
y+=box[nm];
}
while(y<271);
sound(1000);
N[nm]=-(Pi);
delay(100);
nosound();

delay(500);
}
/*****
**/
/*****
**/

```

```

void fracdim()
{
    float Xi,XYi,X2i,Yi;
    float Xmean,Ymean,ST,SR;
    int say;
    Yi=0.0,Xi=0.0,XYi=0.0,X2i=0.0,A1=0.0;
    Xmean=0.0,Ymean=0.0,ST=0.0,SR=0.0,Syx=0.0;

    for(say=0;say<ss;say++)
    {
        X2i=(X2i+pow(log(1/box[say]),2));
        Xi=(Xi+log(1/box[say]));

        if(c=='i')
        {
            Yi=(Yi+N[say]);
            XYi=(XYi+log(1/box[say])*(N[say]));
        }

        else
        {
            Yi=(Yi+log(N[say]));
            XYi=(XYi+log(1/box[say])*log(N[say]));
        }
        A1=(ss*XYi-Xi*Yi)/(ss*X2i-pow(Xi,2));
        Xmean=(Xi/(float)ss);
        Ymean=(Yi/(float)ss);
        A0=(Ymean-A1*Xmean);

        for(say=0;say<ss;say++)
        {

            if(c=='i')
            {
                ST=(ST+pow((N[say]-Ymean),2));
                SR=(SR+pow(N[say]-A1*log(1/box[say])-A0,2));
            }

            else
            {
                ST=(ST+pow((log(N[say])-Ymean),2));
                SR=(SR+pow(log(N[say])-(A1*log(1/box[say])+A0),2));
            }
        }

        R2=((ST-SR)/ST);
        Syx=sqrt(SR/(float)(ss-2));
    }
}

```

EK-B**Brown Hareketi Modelleme Programı C Kodu**

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<dos.h>
#include<conio.h>
#include<graphics.h>
#include<stdlib.h>

float gauss(unsigned seed);
void subdivide(int f1,int f2,float std);
//void newstep(void);
float Fh[17],ratio,newx,newy;
char combination=0x00;
unsigned int seed=3245;

int aa,bb,cc,xx,t=0;
main()
{
    float scale=800,h=0.90,std;
    int i,gmode=0,gdriver=DETECT;

    while(seed !=0)
    {
        printf("Enter seed (0 to quit): ");
        scanf("%d",&seed);
        initgraph(&gdriver,&gmode,"c:\\borlandc\\bgi");
        setcolor(15);
        Fh[0]=gauss(seed)*scale;
        Fh[16]=gauss(0)*scale;
        ratio=pow(2,-h);
        aa=0;
        bb=16;
        xx=0;
        std=scale*ratio;
        randomize();
        do
        {
            subdivide(aa,bb,std);
            for(i=aa;i<bb;i++)
                line(200+i,Fh[i]+200,(i+1)+200,Fh[i+1]+200);
            // printf("aa=%d cc=%d artis=%0.1f\n",aa,cc,pow(cc,2)/100.0);
            std=scale*pow(ratio,4);
        }
    }
}

```

```

    aa=random(200);
    cc=random(30);
    bb=aa+5+cc;
    Fh[bb]=Fh[bb]+(pow(cc,3)*gauss(seed)/2.0);
    xx++;
}
while(xx<1);

setcolor(2);
}
getch();

return 0;
}
void subdivide (int f1,int f2,float std)
{
    int fmid;
    float stdmid;

    fmid=(f1+f2)/2;
    if(( fmid!=f1) && (fmid!=f2))
    {
        Fh[fmid]=(Fh[f1] + Fh[f2])/2.0 + gauss(0)*std;
        stdmid=std*ratio;
        subdivide(f1,fmid,stdmid);
/*      printf("f1=%d,fmid=%d",f1,fmid); */
        subdivide(fmid,f2,stdmid);
/*      printf("fmid=%d,f2=%d\t",fmid,f2);*/
    }
}

float gauss(unsigned seed)
{
    int k;
    float value,exponent,gauss;
    if(seed !=0)
        srand(seed);
    k=rand() - 16383;
    value = k/5461.0;
    exponent= -(value*value)/2.0;
    gauss = 0.15915494*exp(exponent);
    k=rand();
    if(k > 16383)
        gauss*=-1;
    return(gauss);
}

```

ÖZGEÇMİŞ

Cengiz Polat UZUNOĞLU, 1980 yılında İstanbul'da doğdu. Kocamustafapaşa ilkokulundan 1991 yılında mezun oldu. Orta ve lise öğrenimine Vefa Anadolu Lisesinde devam etti. 1998 yılında liseden mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başladı. 2002 yılında aynı bölümde lisans öğrenimini tamamladı ve mezun oldu. 2002-2003 Akademik yılında İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2003 yılında İ.Ü. Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Buradaki görevine devam ettiği bir yıl boyunca Kontrol Mühendisi ve Yaklaşık Maliyet Komisyonu üyesi olarak çalıştı. 2004 yılında İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak atandı ve halen aynı Ana Bilim Dalında çalışmalarına devam etmektedir.