

# PCB'ler için Isı Gerektirmeyen, Plastik Esaslı Nanoyapılı Koruyucu Kaplama: Teknoloji, Performans ve Güvenilirlik

## Özet

Otomotiv, endüstriyel, deniz, dış mekân ve yüksek nem ortamlarındaki baskılı devre kartları (PCB) neme, suya, iyonik kirliliğe, korozyona, termal çevrime ve mekanik gerilime maruz kalır. Bu etkenler yüzey yalıtım direncini düşürür ve elektrokimyasal göç, dendrit büyümesi ve korozyon gibi arıza mekanizmalarını tetikler. Koruyucu (konformal) kaplamalar köklü bir çözümdür; **IPC-CC-830** ve **IEC 61086** çerçeveleri bunların nasıl nitelendirileceğini tanımlar. Bu makale, oda sıcaklığında güçlendirilmiş, opak bir katman oluşturan **ısı gerektirmeyen, plastik esaslı, çok katmanlı bir koruyucu kaplamayı** (MGCoat) anlatır. Sayısal değerler üretici özellikleri ve gözlemlenen performans olarak verilmiştir; resmi uyum için bağımsız niteleme önerilir.

**Anahtar kelimeler:** PCB güvenilirliği; konformal kaplama; koruyucu kaplama; yüzey yalıtım direnci; elektrokimyasal göç; IPC-CC-830; IEC 61086; daldırma koruması; ısısız uygulama.

## 1. Giriş

Elektronik sahada güvenirliliği, çevresel gerilime dayanıklılıkla belirlenir. Elektronik; motor bölmesi modüllerine, dış mekân sensörlerine, deniz ekipmanına, LED sistemlerine, drone ve motosiklet elektroniğine yayıldıkça PCB; yoğuşma, yağmur, yıkama, tuz, toz, iyonik kalıntı, sıcaklık değişimi ve titreşimle karşılaşır. Konformal kaplamalar, kart üzerinde bir bariyer oluşturarak bu riskleri azaltır ve dielektrik dayanımını ve uzun ömürlü işlevi korur [1], [4].

Bu makale **ısı gerektirmeden uygulanan plastik esaslı bir koruyucu kaplama** sunar. Esas olarak yüzey yalıtıcısı olan çok ince filmlerin aksine sistem, çevresel ve mekanik korumayı birleştiren **güçlendirilmiş, katmanlı bir yapı** olarak tasarlanmıştır ve standartlara dayalı doğrulama için net bir yol tanımlar.

## 2. Sahada PCB Arıza Mekanizmaları

**2.1 Nem ve iyonik kirlilik.** İyonik kalıntılarla (flux, tuz, kirletici) birleşen adsorbe nem, iletkenler arasındaki **yüzey yalıtım direncini (SIR)** düşürerek çalışma noktalarını kaydıran ve arızaya yol açan kaçak akımlara neden olur [4], [5].

**2.2 Elektrokimyasal göç ve dendritler.** Gerilim ve nem altında metal iyonları göç eder ve iletkenleri köprüleyen iletken dendritler olarak çöker; aralıklı veya kalıcı kısa devreler oluşur. Nem filmini ve iyon hareketliliğini sınırlayan kaplamalar bunu bastırır.

**2.3 Korozyon ve CAF.** Nem ve kirlilik bakırı aşındırır; içte, cam-reçine arayüzünde iletken anodik filament oluşabilir. İkisi de özellikle ince adımlı tasarımlarda ömrü kısaltır.

**2.4 Termal ve mekanik gerilim.** Termal çevrim nemli havayı muhafazalardan geçirir; elleçleme, titreşim ve aşınma mekanik yük bindirir. **Kürlenmeden sonra mekanik dayanım** ekleyen bir kaplama ikisini de ele alır.

## 3. Konformal Kaplamalar: İşlev ve Malzeme Sınıfları

Konformal kaplamalar, montaja uyan ince polimer katmanlardır. Yaygın sınıflar **akrilik, silikon, poliüretan, epoksi ve parylene** olup neme karşı koruma, mekanik/kimyasal direnç, sıcaklık aralığı ve onarımı farklı dengeler [1], [4]. Pratikte birçok kaplama, nem ve hafif kirlilik için ultra ince şeffaf filmidir; az mekanik koruma sağlar ve optik gizleme sunmaz. Bu, suya ve neme karşı koruma, mekanik güçlendirme ve tasarım gizliliğini birlikte gerektiren uygulamalar için bir boşluk bırakır.

## 4. MGCoat Kaplama Sistemi

**4.1 Malzeme konsepti.** MGCoat Liquid PCB Plastic Coating, oda sıcaklığında güçlendirilmiş bir katmana kürlenmiş **plastik esaslı, opak bir koruyucu kaplamadır. Birden çok katta** uygulanacak şekilde tasarlanmıştır; kalınlığı ve korumayı uygulamaya göre ayarlar ve seri üretim ile saha onarımı için **daldırma, püskürtme ve fırçayı** destekler.

**4.2 Özellikler.** Aşağıdakiler üretici özellikleri ve gözlemlenen performanstır.

<b>Esas / görünüm</b>	Plastik esaslı, opak (beyaz, siyah veya gri)
<b>Uygulama yöntemi</b>	Daldırma, püskürtme veya fırça
<b>Uygulama sıcaklığı</b>	Isısız, 15-45 °C (optimum 25-35 °C)
<b>İlk kuruma</b>	8-10 dakika
<b>Tam kürlenme (maks. dayanım)</b>	12 saat
<b>Kat başına kalınlık</b>	20-200 µm (normal 50-100 µm)
<b>Önerilen kat</b>	2-4, katlar arası ~10 dk
<b>Verim</b>	≈ 300-500 µm'de 1 m <sup>2</sup> başına 1 L
<b>Çalışma sıcaklığı (kürü)</b>	-55 °C ile +90...110 °C
<b>Sökülebilirlik</b>	Özel çözücüyle çıkarılır
<b>Raf ömrü</b>	5 yıl (kapalı)

**4.3 Uygulama yöntemi ve koruma kademeleri.** Koruma, hedef ortam ve çalışma gerilimi için kat sayısı olarak belirlenir; katlar arası kısa kuruma yapılır. Kaplamadan sonra hava boşluğu olmadan tam kaplama gözle doğrulanır.

Ortam	Gerilim	Kat
Tam su daldırma	AC 220 V	4
Tam su daldırma	DC $\leq$ 24 V	3
Yağmur / sıçrama	AC 220 V	2
Yağmur / sıçrama	DC $\leq$ 24 V	2

## 5. Güvenilirlik Değerlendirme Çerçevesi

Performans, genel bir “su geçirmez” iddiasıyla değil, tanınan çerçevelerle değerlendirilmelidir. **IPC-CC-830**, baskılı montajlardaki yalıtım bileşikleri için yeterlilik ve uygunluğu belirler [1]. **IEC 61086-1** monteli kart kaplamalarını tanımlar ve sınıflandırır; **IEC 61086-3-1** genel, yüksek güvenilirlik ve havacılık için malzeme şartlarını verir [2], [3]. Yöntemler arasında **yüzey yalıtım direnci** (IPC-TM-650 2.6.3 [5]), nem ve nemli-ısı, termal çevrim, yapışma, mekanik dayanıklılık, kirlilik ve tuz püskürtme direnci, UV, daldırma sonrası işlevsel test ve kısa devre kontrolü yer alır.

**İddialar hakkında.** Buradaki değerler üretici özellikleri ve şirket içi gözlemlerdir; **üçüncü taraf sertifikası değildir**. Resmi uyum gerektiğinde IPC-CC-830 / IEC 61086 kapsamında bağımsız niteleme önerilir.

## 6. Karşılaştırmalı Konumlandırma

İnce şeffaf filmlere kıyasla sistem, birleşik korumalı güçlendirilmiş plastik katman olarak konumlanır. Temel farklar:

Özellik	Tipik ince film	MGCoat kaplama
Kürlenme	Çoğunlukla ısı/UV veya uzun	Isısız, oda sıcaklığı
Katman	Çok ince yüzey filmi	Güçlendirilmiş 20-200 µm, çok katlı
Mekanik koruma	Sınırlı	Sert, aşınmaya dayanıklı
Su teması	Nem / hafif sıçrama	Yağmurdan daldırmaya (kademeli)
Optik	Şeffaf	Opak (tasarım gizleme)
Uygulama	Genelde yalnız püskürtme	Daldırma / püskürtme / fırça
Onarım	Değişken	Çözücüyle sökülür

## 7. Sınırlamalar, Güvenlik ve Önerilen Doğrulama

Mühendislik dürüstlüğü güvenilirliğin parçasıdır. Ürün **plastik esastır ve çoğu plastik gibi sıvı hâlde bir miktar yanıcıdır** — sıvı asla açık alev maruz bırakılmamalıdır; küreldikten sonra, ~120 °C üzeri ısıya veya sert bir çiziğe (matkap/bıçak) maruz kalana dek koruyan kararlı bir filmdir. Su yalıtımı **elektrik güvenliği tasarımının yerine geçmez**: gerilim, akım, kaçak/açıklık mesafesi, konnektörler ve kullanıcı erişimi ayrı değerlendirilmelidir. Derin daldırma için tüm montaj hava boşluğu olmadan sızdırmaz olmalıdır. Performans; yüzey hazırlığı, maskeleme ve tam kaplamaya bağlıdır. Resmi kabul için bağımsız testler ve belgelenmiş parti verileri önerilir.

## 8. Sonuç

Küreldikten sonra mekanik olarak güçlendirilmiş, yağmurdan tam daldırmaya kademeli, tasarım koruması için opak ve çözücüyle sökülebilen **ısı gerektirmeyen, plastik esaslı, çok katmanlı bir kaplama**; çevresel ve

mekanik gerilimi birlikte ele alan pratik bir endüstriyel yol sunar — ince şeffaf filmlerin tam kapsamadığı bir boşluk. IPC-CC-830 ve IEC 61086 çerçevelerinde konumlanan ve belgelenmiş testlerle desteklenen ürün; otomotiv, endüstriyel, deniz, LED ve insansız sistem elektroniği için uygundur.

## Kaynaklar

1. IPC-CC-830, *Qualification and Performance of Electrical Insulating Compound for Printed Wiring Assemblies*, IPC.
2. IEC 61086-1, *Coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings) — Part 1: Definitions, classification and general requirements*, IEC.
3. IEC 61086-3-1, *Coatings for loaded printed wire boards — Part 3-1: Specifications for individual materials — general purpose, high-reliability and aerospace applications*, IEC.
4. IPC-HDBK-830, *Guidelines for Design, Selection and Application of Conformal Coatings*, IPC.
5. IPC-TM-650, *Test Methods Manual* (e.g., Method 2.6.3, Surface Insulation Resistance), IPC.