

Bazı Kimyasal Sıvıların Durulma Sürelerinin İki Farklı Zaman Boyutlu NMR Cihazı ile Karşılaştırılması


*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 22.05.2024

Kabul/Accepted: 02.12.2024

Yayımlandı/Published: 11.04.2025

Comparison of The Relaxation Times of Some Chemical Liquids Using Two Different Time-Dimensional NMR Devices

Cengiz OKAY* 

Marmara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Kadıköy-İstanbul, Türkiye



© Ayfon Kocatepe Üniversitesi

© 2025 The Author | Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Zaman boyutlu nükleer manyetik rezonansında (TD-NMR) kullanılan spin-örgü (T_1) ve spin-spin (T_2) durulma süresi ölçümleri, onu farklı sıvı maddelerin ve bunların kombinasyonlarının moleküler dinamikleri hakkında bilgi edinmek için değerli bir teknoloji haline getirir. Bu araştırmada bazı sıvı bileşiklerin durulma sürelerini belirlemek için iki farklı proton NMR cihazı: yüksek çözünürlüklü Magritek Spinsol NMR (42MHz-1T) ve Bruker Minispec zaman boyutlu NMR (TD-NMR) (20MHz-0,5T) kullanıldı. Her iki cihaz tarafından elde edilen T_1 ve T_2 değerlerinin birbiriyle aynı eğilimde olduğu ve T_1 durulma süresinin T_2 değerinden daha uzun olduğu görülmüştür. Yüksek çözünürlüklü Magritek Spinsolve NMR cihazının, manyetik alan gradyanı (homojenlik) değerleri açısından Bruker Minispec cihazından daha iyi performans gösterdiği, ölçüm sıcaklıklarının ve larmor frekans değerlerinin T_1 ve T_2 durulma süresine etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zaman boyutlu nükleer manyetik rezonans (TD-NMR); Spin-spin; Spin-örgü; Durulma süreleri.

Abstract

The spin-lattice (T_1) and spin-spin (T_2) relaxation time measurements used in time-domain nuclear magnetic resonance (TD-NMR) make it a valuable technology for learning about the molecular dynamics of different liquid substances and their combinations. In this investigation two distinct proton NMR instruments were utilized to determine the relaxation times of several liquid compounds: the high-resolution Magritek Spinsolve NMR (42MHz-1T) and the Bruker Minispec time-domain NMR (20MHz-0.5T). It has been seen that T_1 and T_2 values obtained by both devices have the same tendency and the T_1 relaxation time is longer than the T_2 value. It's been investigated that the high-resolution Magritek Spinsolve NMR device outperforms the Bruker Minispec device in terms of magnetic field gradient (inhomogeneity) values, the effects of measurement temperatures and larmor frequency values on T_1 and T_2 relaxation times have been investigated in detail.

Keywords: Time-domain nuclear magnetic resonance (TD-NMR); Spin-spin; Spin-lattice; Relaxation time.

1. Giriş

Birçok endüstriyel uygulamada su karışımının yanı sıra etanol ve diğer alkoller de kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında suda çözülmüş olarak kullanılan en yaygın alkoller etanol ve metanoldür. Alkollerin önemli özelliği, alkol-alkol, su-su veya alkol-su kümelerinin oluşumuna bağlı heterojenliktir (Hayashi vd. 1990a, Zhao ve Xiao 2012). Çeşitli sıvı maddeleri ve bunların karışımlarını (örneğin, alkol-su karışımları) tespit ve ayırt etmek hem güvenlik hem de endüstriyel uygulamalar için çok önemlidir ve bunlar için kullanılan bazı metotlar vardır. Bunlardan bazıları; Moleküler dinamik simülasyonları (MDS) (Jia ve Liang 2023), X-ışını saçılması, (Hayashi vd. 1990b) Infra-Red (IR) (Parker vd. 2014) ve nükleer manyetik rezonans (NMR) tekniğidir (Benmore ve Loh 2000, Rameev vd. 2016). Bu metotlar arasındaki NMR, Yüksek Alan NMR (HF-NMR), Katı Hal NMR (ss-NMR), Sıfır Alan NMR, Dünyanın Manyetik Alanı NMR (EF-NMR), Zaman Boyutlu NMR (TD-NMR) gibi birçok alt tipe

sahiptir. Yüksek alan (HF) olarak bilinen NMR spektroskopisi NMR, kimyasal yapıları analiz etmek için çok hassas bir yöntem olsa da süper iletken mıknatıs sistemi içerdiği için kriyojenik sisteme ihtiyacı vardır. Bu durumda NMR spektroskopisi aşırı pahalıdır ve pratik uygulamada kullanımı zordur.

TD-NMR kalıcı mıknatıs teknolojisine dayandığı için kriyojenik bir sisteme ihtiyaç duymaz. Uygun maliyetli, kullanımı kolay ve taşınabilir olduğundan, kalite kontrol ve güvenlik uygulamaları için daha çok tercih edilebilir. Zaman boyutlu NMR (TD-NMR) yönteminde NMR spektrumu yerine numunelerin durulma süreleri ölçülerek analiz edilebilir (Balci 2020). TD-NMR yönteminde spin-spin (enine, T_2) ve spin-örgü (boyuna, T_1) durulma süresi olarak adlandırılan iki ana parametre ölçülür. Her malzemenin farklı durulma süreleri vardır. Bu nedenle, T_1 ve T_2 durulma süresi çeşitli sıvıların etkili bir şekilde taranması ve analizinin yapılması çok önemli bir konudur (Malcolm H. Levitt vd. 2021).

Bu çalışmada, bazı kimyasal sıvıların T_1 ve T_2 durulma süreleri iki farklı (düşük ve yüksek çözünürlüklü) zaman boyutlu NMR (TD-NMR) cihazı ile ölçülerek elde edilen durulma sürelerine NMR cihazlarının etkisi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Numunelerin Hazırlanması ve Durulma Sürelerinin Ölçülmesi

Bu çalışmada kullanılan bazı sıvı kimyasal maddeler: Aseton, Metanol (Met), Di-Su, Etanol (Et), 1-Propanol (1-Pro), 2-Propanol (2-Pro), Tert Bütanol (TBA) ve Oleik Asit (OA)'tir. Bu numunelerin durulma süreleri (T_1 ve T_2) Bruker Minispec mq-20 zaman boyutlu NMR (20MHz-0.5 T) cihazı (Şekil 2.1) ve yüksek çözünürlüklü Magritek Spinsolve NMR Cihazı (42MHz-1T) (Şekil 2.2) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm yapılan kimyasallar Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiş ve her bir ölçümden önce numuneler NMR cihazı içerisinde 10 dk sabit sıcaklıkta kalacak şekilde bekletilmiştir.

Bu iki cihaz arasındaki temel benzerlik uygun maliyetli, kullanımı kolay, taşınabilir olması ve 1-10 dk gibi kısa sürede T_1 ve T_2 durulma sürelerinin ölçülmesidir. Bunun dışında Bruker Minispec cihazı 20MHz-0.5T olup düşük çözünürlüklü, Magritek Spinsolve TD-NMR Cihazı ise 42MHz-1T yüksek çözünürlüklüdür. Ayrıca; Bruker Minispec cihazında 10mm, Magritek Spinsolve TD-NMR Cihazında ise 5mm çaplı NMR tüpleri kullanılmaktadır. Bruker Minispec cihazında istenilen sıcaklıkta (5°C ve 80 °C aralığında) T_1 ve T_2 durulma süreleri ölçülürken Magritek Spinsolve TD-NMR Cihazında ise sadece sabit sıcaklıkta (38°C) T_1 ve T_2 durulma süreleri ölçülmektedir.



Şekil 2.1 Bruker Minispec TD- NMR Cihazı (20MHz-0.5T)



Şekil 2.2 Magritek Spinsolve NMR Cihazı (42MHz-1T)

2.2 Deneysel Setup

Birbirinden farklı olan iki TD-NMR cihazında T_1 ve T_2 durulma sürelerinin ölçümleri için sırasıyla inversion recovery (IR) ve Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) puls sekans tekniği kullanılmış olup IR ve CPMG ölçüm parametreleri Çizelge.1 ve Çizelge.2'de verilmiştir.

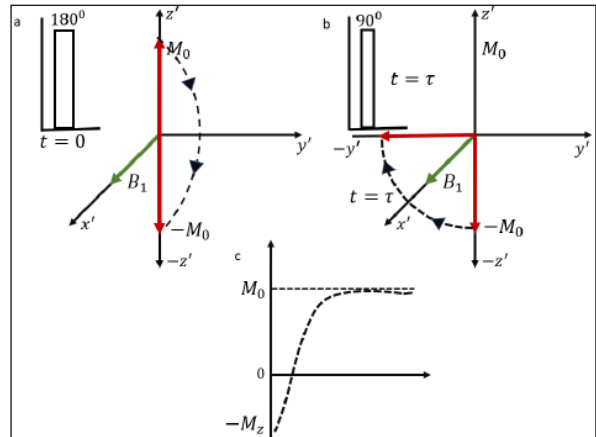
Çizelge. 1 Inversion recovery (IR) Parametreleri

IR Parametreleri	Bruker Minispec	Magritek Spinsolve
B_1 Frekansı	19.95 MHz	43.5 MHz
Max Gecikme	1500 ms	1000 ms
Tekrarlama Süresi	20000 ms	20000 ms
90° Pulse Uzunluğu	3.32 us	11.2 us
180° Pulse Uzunluğu	6.4 us	22.4 us
Receiver Gain	64 dB	28 dB
Tarama sayısı	2	2

Çizelge.2 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) parametreleri

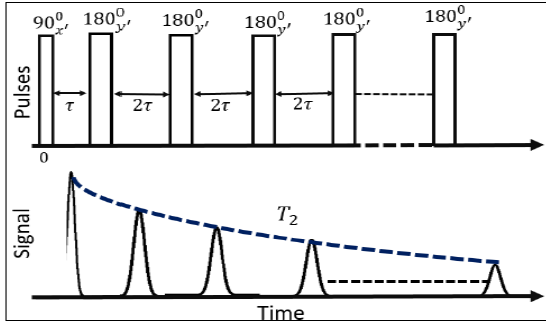
CPMG Parametreleri	Bruker Minispec	Magritek Spinsolve
B_1 Frekansı	19.95 MHz	43.5 MHz
Eko Süresi	1500 ms	1000 ms
Tekrarlama Süresi	25000 ms	5000 ms
90° Pulse Uzunluğu	3.32 us	11.2 us
180° Pulse Uzunluğu	6.4 us	22.4 us
Receiver Gain	64 dB	25 dB
Tarama sayısı	4	4

Inversion recovery (IR) spin-örgü durulma zamanının (T_1) ölçüldüğü en yaygın olarak kullanılan puls sekansıdır. Başlangıçta termal denge durumunda örneğin $+z'$ yönünde konumlanmış olan mıknatıslanma vektörüne (M_0) x' doğrultusunda 180 derecelik puls uygulandığında, mıknatıslanma vektörü $+z'$ yönünden $-z'$ yönüne gelmektedir. Bu pulsdan sonra τ kadar süre beklendiğinde mıknatıslanma vektörü eski termal dengedeki pozisyonuna gelmeye çalışmaktadır. Fakat burada x' doğrultusunda uygulanan 90 derecelik puls mıknatıslanma vektörünü $-z'$ doğrultusundan $-y'$ doğrultusuna getirmektedir. Sistem termal dengeye gelinceye kadar beklenerek farklı τ değerleri için $180^\circ - \tau - 90^\circ$ sekansı uygulanarak işlem tekrarlanmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Inversion recovery puls sekansı

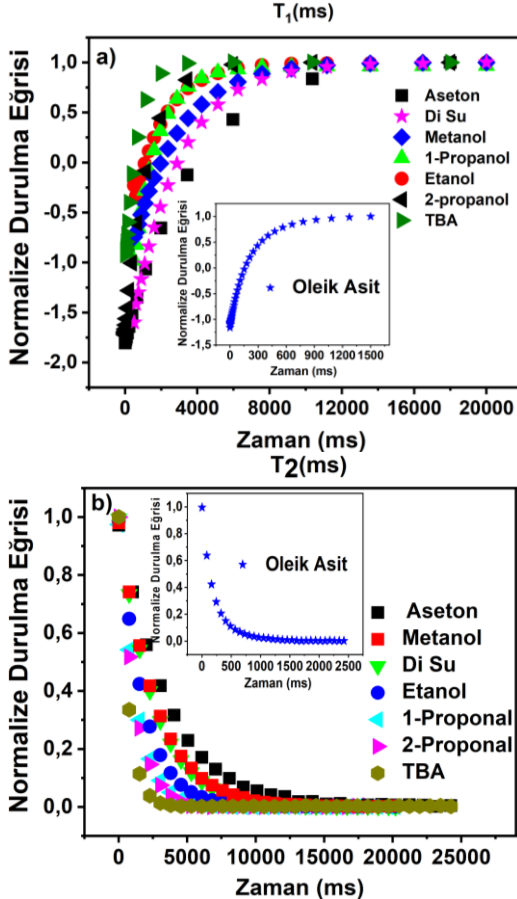
CPMG sekansı (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) TD-NMR cihazlarında en çok kullanılan ölçüm sekanslarından biridir. Bu metotta 90 derecelik ilk pulsun ardından arka arkaya 180 derecelik pulslar uygulanır ve daha sonra elde edilen sinyallerin toplanmasıyla spin-spin durulma zamanı (T_2) elde edilmektedir. Burada 90 derecelik başlangıç pulsu ile 180 derecelik ilk puls arasında τ kadar zaman farkı var iken birbirini takip eden 180 derecelik pulslar arasında 2τ kadar bir zaman farkı bulunmaktadır (Maraşlı 2022) (Şekil 2.4).



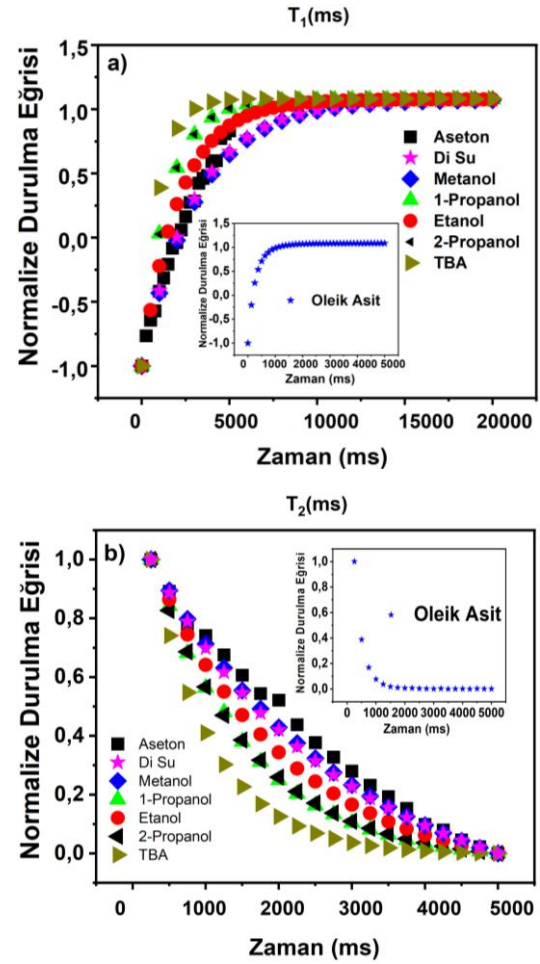
Şekil 2.4 CPMG puls sekansı

3. Bulgular ve Tartışma

TD-NMR cihazları kullanılarak oda sıcaklığında (25°C) sıvı kimyasallardan elde edilen ve normalize edilmiş Spin-Örgü (T_1), Spin-Spin (T_2) durulma eğrileri sırasıyla Şekil 2.5.a.b ve Şekil 2.6.a.b'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 a) T_1 , b) T_2 durulma eğrileri (Bruker Minispec: 20MHz-0.5T)

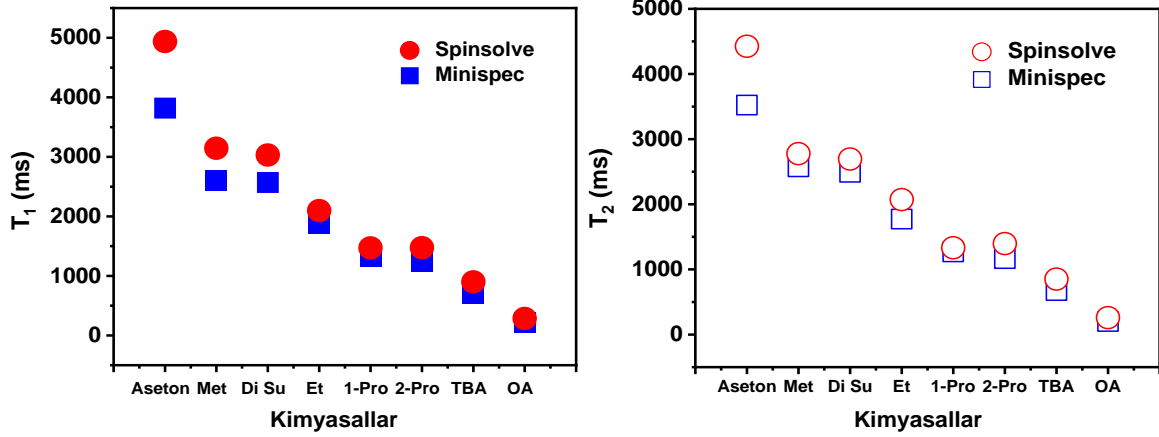


Şekil 2.6 a) T_1 , b) T_2 durulma eğrileri (Magritek Spinsolve: 42MHz-1T)

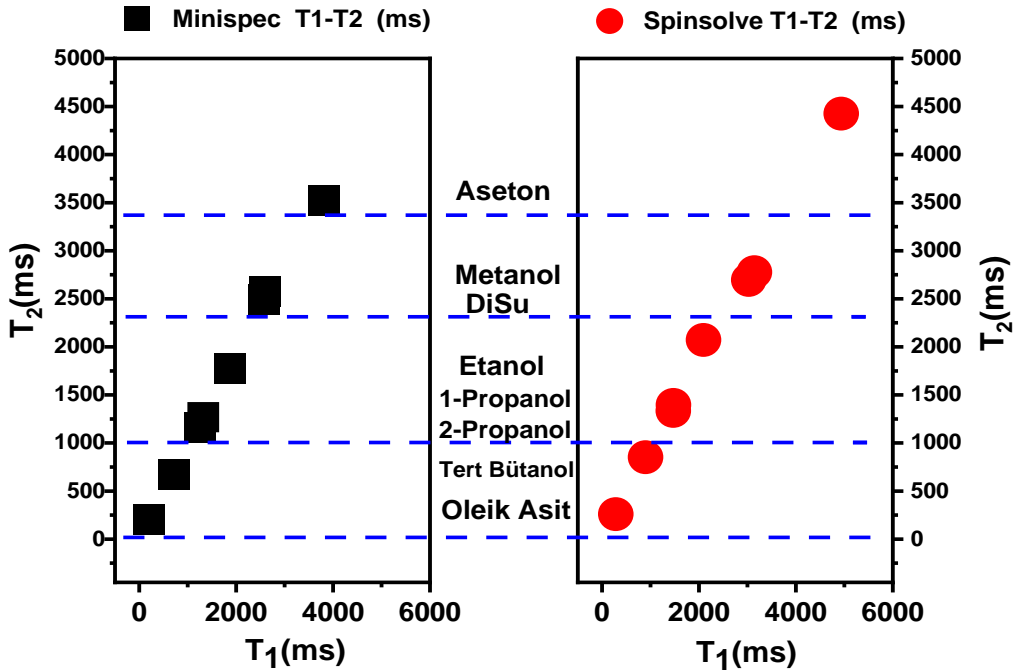
Yukarıdaki şekillerden T_1 ve T_2 sonuçlarının aynı kimyasal sıvılarda her iki cihaz içinde aynı trend (eğilim) içinde oldukları açıkça görülmektedir. Magritek Spinsolve cihazında T_2 ölçüm zaman ölçeğini maksimum 5000ms olarak seçebilmekteyken Bruker Minispec için 25000ms gibi daha yüksek değerlere çıkabilme imkânımız vardır. Bu durum Şekil 2.5.b ve Şekil 2.6.b'deki T_2 durulma eğrilerinden de açıkça görülmektedir. Ayrıca kimyasal sıvıların T_2 durulma durumunu Bruker Minispec cihazından daha net bir şekilde görmekteyiz. Ölçtüğümüz kimyasal sıvılardan Oleik asit için T_1 ve T_2 değerleri çok küçüktür. Diğer kimyasalların durulma eğrilerini daha net bir şekilde görmemiz ve karşılaştırabilmemiz için Oleik asidin durulma eğrileri farklı ölçekte gösterilip aynı grafik içerisinde gömülü olarak verildi. Her bir TD-NMR cihazları spektrumlarından elde edilen T_1 ve T_2 durulma süreleri Çizelge.3 'de verilerek Şekil 2.7'de gösterildi. Her iki cihaz için elde edilen T_1 ve T_2 durulma sürelerini daha iyi karşılaştırmak için grafikler tekrar Şekil 2.8'de farklı formatta verildi. Bu grafikler incelendiğinde Magritek Spinsolve cihazından elde edilen T_1 ve T_2 değerlerinin Bruker Minispec cihazından daha yüksek çıktığı açıkça görülmektedir.

Çizelge. 3 Kullanılan numunelerin T_1 ve T_2 durulma süreleri

	Spinsolve T_1 (ms)	Spinsolve T_2 (ms)	Minispec T_1 (ms)	Minispec T_2 (ms)
Aseton	4938	4426	3820	3522
Metanol (Met)	3145	2777	2600	2575
Di-Su	3030	2695	2570	2490.7
Etanol (Et)	2096	2072	1880	1773.4
1-Propanol (1-Pro)	1470	1333	1321	1269
2-Propanol (2-Pro)	1474	1396	1247	1166
Tert Bütanol (TBA)	900	851	705	675
Oleik Asit (OA)	285	259	210	200



Şekil 2.7 Bruker Minispec: 20MHz-0.5T ve Magritek Spinsolve: 42MHz-1T için T_1 ve T_2 Durulma Süreleri



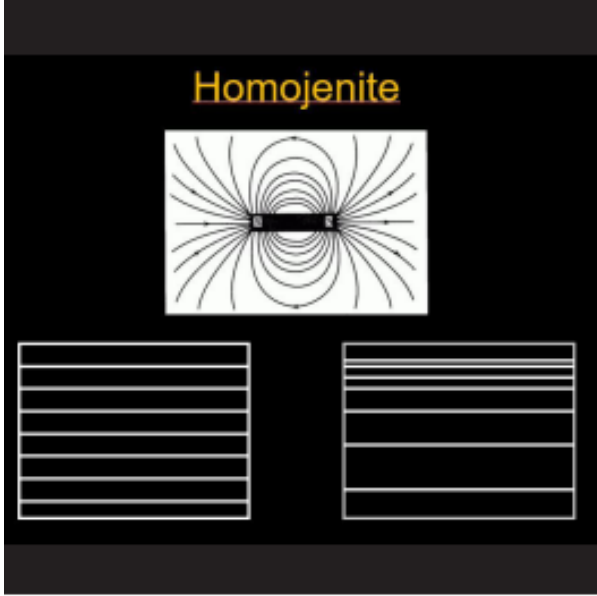
Şekil 2.8 Bruker Minispec: 20MHz-0.5T ve Magritek Spinsolve: 42MHz-1T için T_1 'e karşı T_2 Durulma Süreleri

Durulma süreleri her iki TD-NMR cihazlarında aynı eğilimi göstermesine rağmen durulma süresi değerleri arasında farklılıklar vardır. Bu farklılıklara olası katkılardan biri, her TD-NMR cihazına özgü bir parametre olan, numune hacmindeki manyetik alan düzensizliğinin etkisidir. Manyetik alanın homojenliği, T_1 ve T_2 durulma sürelerinin ve görüntü kalitesinin daha doğru değerlendirilmesi için kritik bir faktördür. Manyetik vektörler, manyetik alan oluştuğunda ortaya çıkar. Mümkün olduğu kadar birbirine

paralel olan manyetik vektörlerin homojenlik sergilediği söylenir. İçinden geçen manyetik vektörlerin tümü paralel ve birbirinden eşit uzaklıkta ise, manyetik alanın daha homojen olduğu söylenir; inhomojenlik mesafelerdeki eşitsizlikten kaynaklanır (Şekil 2.9). Homojenlik, milyon vektör çizgisi başına homojen olmayan vektörlerin sayısıdır ve cihazlarda ppm (milyonda parça) cinsinden ölçülür. Cihazın ppm değeri ne kadar düşüğe homojenlik o kadar iyidir. Cihazın manyetik alan homojenliği

kurulumdan sonra düzenli olarak değerlendirilmeli ve periyodik olarak optimize edilmelidir (Karaali 2020, Chen vd. 2006). Bu nedenle günümüzde kullanılan magnetler genellikle silindirik yapıdadır.

Çalışmada kullandığımız Magritek Spinsolve yüksek çözünürlüklü NMR cihazının çalışma frekansı 42MHz'dir, bu da Bruker Minispec mq-20'den (20MHz) iki kat daha büyüktür. Bilinmeyen manyetik alan altındaki malzemelerin durulma süresi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Bloch 1946).



Şekil 2.9 Homojenite (sol alt), inhomojenite (sağ alt)

$$\frac{1}{T_{2eff}} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{3}\gamma^2 G^2 D\tau^2 \quad (1)$$

Burada: T_{2eff} CPMG darbe sekansı altında karakteristik spin-spin durulma süresi, G manyetik alan gradyanı, D difüzyon katsayısı, γ protonun jromanyetik oranı ve τ yankı süresidir. Bu denklemdeki manyetik alan gradyanı-inhomojenite (G) her bir cihaz için farklı değerlere sahiptir. Düşük viskoziteli ve difüzyon katsayısı $D=0.85 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}$ (Vitalij vd.1995) olan saf alkol (etanol) sıvısının kullanılmasıyla, protonun jromanyetik oranı $\gamma=267 \times 10^6 \text{ s}^{-1}\text{T}^{-1}$ olarak alınmasıyla ve farklı yankı süresi parametreleri kullanılmasıyla burada kullanılan TD-NMR cihazların inhomojenitesi (Maraşlı vd. 2023, Okay 2023) tarafından elde edilmiştir. Ayrıca Maraşlı vd. (2023), (1) numaralı denklemi kullanarak yaptıkları hesaplamalarda T_{2eff} alan tek düzeliliğinin katkısının iki cihaz içinde ihmal edilebilir derecede küçük olduğunu, manyetik alan gradyanı (G) değerlerini Bruker Minispec ve Magritek Spinsolve cihazları için sırasıyla 145ppm ve 36ppm bulmuşlardır. Bu değerlerin bir sonucu olarak, Magritek Spinsolve cihazının inhomojenite değeri Bruker Minispec TD NMR'ye göre çok daha iyi olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla manyetik alan homojenitesi daha yüksek inhomojenite az olduğunda daha yüksek T_1 ve T_2 değerlerine sahip olduğumuz açıkça görülmektedir.

Farklı cihazlarla elde edilen durulma sürelerinde gözlemlenen farklılığın bir başka olası açıklama ise çeşitli TD-NMR cihazlarının ölçüm sıcaklıklarındaki farktır. Bu çalışmada kullanılan TD-NMR cihazlarının ölçüm sıcaklığı Spinsolve cihazı için 38°C, Minispec Bruker cihazı için 25°C'dir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte sıvıların durulma sürelerinin arttığı bilinmektedir (Nelson ve Tung 1987, Tsukahara vd. 2000) Bu etkinin niteliksel değerlendirmesi için, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tarış sızma zeytinyağı numunesinin her iki durulma süresinin ölçümlerinde Bruker Minispec cihazı kullanılarak Maraşlı vd. 2023 tarafından yapılmıştır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte zeytinyağının T_1 ve T_2 durulma sürelerinin de arttığını elde etmişlerdir. Sonuç olarak aynı sıcaklık değerlerinde (38°C) her iki cihaz tarafından elde edilen T_1 ve T_2 durulma sürelerinin birbirlerine yakın olduğunu tespit etmişlerdir. Elde edilen bulgular, Bruker cihazının ölçüm sonuçlarına (25°C) kıyasla Spinsolve cihazının daha yüksek ölçüm sıcaklığının (38°C) daha uzun T_1 ve T_2 durulma süreleri ürettiğini gösterdi.

Son olarak kullanılan cihazların farklı manyetik alanlarının (yani 1H Larmour frekansları) sahip oldukları: Bruker Minispec TD-NMR 20MHz-0.5Tesla ve Magritek Spinsolve NMR cihazı 42MHz-1Tesla ve bunların durulma süresine etkisi araştırıldı. Yukarıdaki açıklamalardan da görüldüğü gibi Bruker ve Spinsolve cihazından elde edilen T_1 ve T_2 durulma süreleri aynı parametrelerde yaklaşık olarak aynı değeri vermektedir. Sonuç olarak kullanılan cihazların farklı manyetik alanlarının (yani 1H Larmour frekansları) olmaları T_1 ve T_2 durulma süresinde gözlemlenen değerlere etkisinin oldukça az olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, bazı sıvı kimyasalların, durulma süreleri iki farklı TD-NMR cihazı: Bruker Minispec mq serisi 20MHz-0.5T TD-NMR ve Magritek Spinsolve 42MHz-1T NMR cihazı kullanılarak ölçüldü. Farklı cihazlar kullanılarak elde edilen T_1 ve T_2 durulma süreleri sonuçlarında tutarlılık ve aynı kimyasal malzemelerde durulma sürelerinin aynı eğilim içinde olduğu gözlemlendi ve bütün numuneler için T_1 değerinin, T_2 değerinden daha uzun olduğu görüldü. Magritek Spinsolve NMR cihazından elde edilen T_1 ve T_2 durulma sürelerinin Bruker Minispec cihazından yüksek olduğu tespit edildi ve bu farklılığın nedenleri araştırıldı:

(i) İki farklı TD-NMR cihazı inhomojenite bakımından karşılaştırıldı ve Magritek Spinsolve NMR cihazının Bruker Minispec cihazından daha homojen olduğu görüldü.

(ii) TD-NMR cihazlarının ölçüm sıcaklıklarındaki farkların (Magritek Spinsolve 38°C, Minispec Bruker 25°C) T_1 ve T_2 durulma sürelerini etkilediği tespit edildi.

(iii) Kullanılan cihazların farklı manyetik alanlarının (yani 1H Larmour frekansları) katkısının çok az olduğu görüldü.

Sonuç olarak farklı cihazlar için ölçülen T_1 ve T_2 durulma sürelerinin niçin birbirinden farklı olduğu detaylı bir şekilde ortaya konuldu.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Literatür taraması, Araştırma, Hesaplamaların Yapılması, Çalışmanın Planlanması ve Yönlendirilmesi, Sonuçların Analizi, Değerlendirilmesi ve Yorumlanması, Makalenin Yazımı

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmada Laboratuvar olanakları ve ekipman erişimini sağlayan Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünden Prof. Dr. Bulat Rami ve Dr. Ayşe Maraşlı 'ya teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Balci, M. (2020). Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi Eğitim Yayınevi. In *Eğitim yayınevi* (4.Baskı). -Türkiye.
- Benmore, C. J., & Loh, Y. L. (2000). The structure of liquid ethanol: A neutron diffraction and molecular dynamics study. *Journal of Chemical Physics*, **112**(13), 5877–5883. <https://doi.org/10.1063/1.481160>
- Bloch, F. (1946). Nuclear induction. *Physical Review*, **70**(7–8), 460–474. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.460>
- Chen, H. H., Boykin, R. D., Clarke, G. D., Gao, J. H. T., & Roby, J. W. (2006). Routine testing of magnetic field homogeneity on clinical MRI systems. *Medical Physics*, **33**(11), 4299–4306. <https://doi.org/10.1118/1.2359229>
- Hayashi, H., Nishikawa, K., & Iijima, T. (1990a). Small-angle X-ray scattering study of fluctuations in 1-propanol-water and 2-propanol-water systems. *Journal of Physical Chemistry*, **94**(21), 8334–8338. <https://doi.org/10.1021/j100384a062>
- Hayashi, H., Nishikawa, K., & Iijima, T. (1990b). Small-angle X-ray scattering study of fluctuations in 1-propanol-water and 2-propanol-water systems. *Journal of Physical Chemistry*, **94**(21), 8334–8338.

<https://doi.org/10.1021/j100384a062>

- Jia, Z., & Liang, C. (2023). Molecular Dynamics and Chain Length of Edible Oil Using Low-Field Nuclear Magnetic Resonance. *Molecules*, **28**(1), 197. <https://doi.org/10.3390/molecules28010197>
- Karaali, K. (2020). Atomdan MR Sinyaline Temel Fizik Prensipler, Görüntü Olusumu ve Görüntü Agirliği. *Türk Radyoloji Seminerleri*, **8**(2), 155–168. <https://doi.org/10.5152/trs.2020.894>
- Malcolm H. Levitt, Svirnickas, A., Wood, M., Cunha, S. C., Oliveira, M. B. P. P., Moresi, G., Magin, R., Řezanka, T., Řezanková, H., Ancora, D., Milavec, J., Gradišek, A., Cifelli, M., Sepe, A., Aphi, T., Zalar, B., Domenici, V., Mason, J., Nmr, M., ... Liu, M. M. (2021). Spin Dynamics Basics of Nuclear Magnetic Resonance. *Physical Review*, **8**(1), 1–9. <https://doi.org/10.1002/cmr.a.20130>
- Maraşlı, A., Okay, C., Karataş, Ö., Mozzhukhin, G., & Rameev, B. (2023). Comparison of homemade TD-NMR device and commercial devices for detection of oil adulteration. *European Physical Journal Plus*, **138**(5), 1–12. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-03980-9>
- Maraşlı, A. (2022). Sanayi ve güvenlik uygulamaları için zaman boyutlu NMR cihazının geliştirilmesi. Doktora Tezi, *Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze-Kocaeli*, 150.
- Nelson, T. R., & Tung, S. M. (1987). Temperature dependence of proton relaxation times in vitro. *Magnetic Resonance Imaging*, **5**(3), 189–199. [https://doi.org/10.1016/0730-725X\(87\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0730-725X(87)90020-8)
- Okay, C. (2023). Investigation of Relaxation Times of Alcohol-Water Mixtures by Time Domain NMR Technique Alkol- Su Karışımlarının Durulma Sürelerinin Zaman Boyutlu NMR Tekniği ile İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **23**, 300–305. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1152842>
- Parker, T., Limer, E., Watson, A. D., Defernez, M., Williamson, D., & Kemsley, E. K. (2014). 60MHz 1H NMR spectroscopy for the analysis of edible oils. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. **57**, 147-158 <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.02.006>
- Rameev, B. Z., Aktas, B. (2016). NMR & MW techniques for detection of explosive and illicit materials. *9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, MSMW 2016*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538215>
- Tsukahara, T., Harada, M., Ikeda, Y., & Tomiyasu, H. (2000). *H Spin-Lattice Relaxation Times of Water, Methanol, and Ethanol under Sub-and Supercritical Conditions*. *Chemistry Letters*, **29**, 4, 420-421 <https://doi.org/10.1246/cl.2000.420>

Vitalij I. Volkov, Svetlana A. Korotchkova, Haruhiko Ohya, Qunhui Gut. (1995). Self-diffusion of water-ethanol mixtures in polyacrylic acid- polysulfone composite membranes obtained by pulsed-field gradient nuclear magnetic resonance spectroscopy, *Journal of Membrane Science*, **100**, 273-286.
[https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00267-3](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00267-3)

Zhao, L. J., Xiao, H. S. (2012). Aqueous solutions of lower alcohols investigated by pyrene fluorescence spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **88**, 111-115.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.12.009>