

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# دانشگاه پیام نور

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک

دانشکده علوم پایه

گروه علمی فیزیک

عنوان پایان نامه:

روش حذف مرگ ناگهانی درهم تنیدگی با تعیین ضریب جفت شدگی نزدیک‌ترین

همسایه‌ها در زنجیره‌ی اسپینی مدل  $XY$

استاد راهنما:

دکتر احمد آخوند

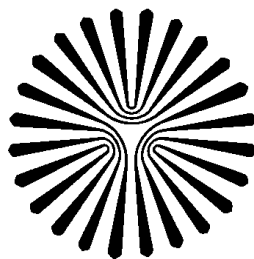
استاد مشاور:

دکتر عبدالرسول قرائتی

نگارش:

محمد صفی خانی قلی زاده

شهریور 1389



دانشگاه پیام نور

بسمه عالی

تصویب پایان نامه

پایان نامه تحت عنوان : روش حذف مرگ ناگهانی درهم تنیدگی با تعیین ضریب جفت شدگی نزدیکترین همسایه‌ها در زنجیره‌ی اسپینی مدل  $XY$  که توسط محمد صفی خانی قلی زاده در مرکز شیراز تهیه و به هیأت داوران ارائه گردیده است مورد تأیید می باشد.

تاریخ دفاع: 1389/06/25  
نمره: 19  
درجه ارزشیابی : عالی  
اعضای هیأت داوران:

<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>هیأت داوران</u>	<u>مرتبه علمی</u>	<u>امضاء</u>
1- دکتر احمد آخوند	استاد راهنما	استادیار	
2- دکتر عبدالرسول قرائتی	استاد مشاور	دانشیار	
3- دکتر محمد مهدی گلشن	استاد داور	دانشیار	
4- دکتر محمد فناعتیان	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و همسر مهربان و دلسوزم.

## سپاسگذاری

سپاس پروردگار یکتا که اوست عالم مطلق، سپاس از پدر و مادر مهربانم که یاری‌ام دادند و دعای خیرشان همیشه پناهم بوده. سپاس از همسر عزیزم که یگانه همراه همیشگی‌ام بوده. سپاس از زحمات بی‌دریغ استاد ارجمند جناب آقای دکتر احمد آخوند که در تمامی مراحل تحقیق و نگارش، همواره مرا یاری نمودند.

## چکیده

در این پایان نامه، با استفاده از هامیلتونی هایزنبرگ مدل  $XY$  پدیده‌ی مرگ ناگهانی درهم‌تنیدگی را در زنجیره‌ی اسپینی باز مورد مطالعه قرار می‌دهیم و با استفاده از ضریب جفت‌شدگی بین زوج کیوبیت‌های مجاور در این زنجیره شرایطی را به دست می‌آوریم که تحت آن شرایط، مرگ ناگهانی درهم‌تنیدگی حذف می‌گردد. به عبارت دیگر زنجیره اسپینی خواهیم داشت که در تمامی بازه‌های زمانی درهم‌تنیده می‌باشد و در ادامه با توجه به شرایطی می‌توانیم میزان نوسانات درهم‌تنیدگی را در بازه‌های زمانی مشخص افزایش دهیم.

واژه های کلیدی: درهم‌تنیدگی، زنجیره‌ی اسپینی، ضریب جفت‌شدگی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ه.....	چکیده.....
ک.....	فهرست شکل ها.....
1.....	پیش گفتار.....
3.....	فصل اول) مفاهیم اولیه.....
4.....	1-1 مقدمه.....
4.....	2-1 کیوبیت و حالت های کوانتومی.....
4.....	1-2-1 کیوبیت.....
5.....	2-2-1 پایه و بعدها.....
5.....	3-2-1 ضرب داخلی.....
6.....	3-1 ماتریس ها و عملگرها.....
7.....	1-3-1 مشاهده پذیرها.....
7.....	2-3-1 عملگرهای پائولی.....
7.....	3-3-1 ضرب خارجی.....
7.....	4-3-1 رابطه بستاری.....
8.....	5-3-1 نمایش عملگرهای استفاده شده در ماتریس ها.....
8.....	6-3-1 ضرب خارجی و نمایش ماتریس.....
9.....	7-3-1 نمایش ماتریس از عملگرها در فضای دو بعدی.....
9.....	8-3-1 عملگرهای هرمیتی ، یکانی و بهنجار.....
10.....	1-8-3-1 عملگر هرمیتی.....

صفحه	عنوان
10.....	2-8-3-1 عملگر یکانی .....
10.....	3-8-3-1 عملگر بهنجار.....
10.....	9-3-1 ویژه مقادیر و ویژه بردارها.....
10.....	10-3-1 معادله ویژه مقدار.....
11.....	11-3-1 تجزیه طیفی .....
11.....	12-3-1 رد یک عملگر.....
12.....	13-3-1 مقادیر انتظاری یک عملگر.....
12.....	14-3-1 تابع‌های یک عملگر.....
12.....	15-3-1 تغییر شکل یکانی.....
13.....	16-3-1 عملگر تصویر.....
14.....	17-3-1 عملگر مثبت.....
14.....	18-3-1 جابجاگرهای جبری.....
15.....	19-3-1 عدم قطعیت هایزنبرگ.....
16.....	20-3-1 فرض‌هایی از مکانیک کوانتومی.....
17.....	4-1 ضرب تانسوری.....
18.....	1-4-1 جابجایی ضرب‌های داخلی.....



18-4-1	ضرب تانسوری بردارهای ستونی.....	18
3-4-1	عملگرها و ضرب تانسوری.....	18
4-4-1	ضرب تانسوری ماتریس‌ها.....	19
5-1	عملگر چگالی.....	19
1-5-1	عملگر چگالی برای یک حالت خالص.....	20
2-5-1	تحول زمانی عملگر چگالی.....	21
3-5-1	عملگر چگالی برای یک حالت آمیخته.....	22
4-5-1	ویژگیهای مهم عملگر چگالی.....	23
5-5-1	احتمال بدست آوردن یک نتیجه اندازه‌گیری مشخص.....	23
6-5-1	ویژگیهای حالت‌های آمیخته.....	23
6-1	کامپیوتر کوانتومی.....	24
7-1	نقاط کوانتومی.....	25
8-1	محاسبات کوانتومی.....	27
9-1	توانایی و قدرت محاسبات کوانتومی.....	29
10-1	درهم‌تنیدگی.....	30
1-10-1	چه موقع یک حالت درهم‌تنیده می‌باشد.....	31
2-10-1	نمایش پائولی.....	32
3-10-1	استفاده از حالت‌های بل برای نمایش عملگر چگالی.....	32
4-10-1	تجزیه اشمیت.....	33
5-10-1	حجم اطلاعات و آنتروپی.....	33
6-10-1	معیار مثبت بودن ترانهاده‌ی جزئی برای حالت‌های آمیخته.....	34
11-1	اندازه درهم‌تنیدگی.....	35
1-11-1	درهم‌تنیدگی تشکیل و معیار تلافی.....	35
2-11-1	عامل منفی.....	36

37.....	فصل دوم) نظم مغناطیسی جامدات.....
38.....	1-2 مقدمه.....
38.....	2-2 مغناطش.....
39.....	3-2 ممان مغناطیس الکترون.....
41.....	4-2 دیامغناطیس در اتم‌ها و جامدات.....
42.....	5-2 تئوری لانژوین (کلاسیک) برای پارامغناطیس.....
45.....	6-2 ممان مغناطیسی اتم‌های ایزوله، قانون هوند.....
46.....	7-2 فرومغناطش و نظم مغناطیسی.....
47.....	8-2 برهمکنش بین دو اسپین (برهمکنش تبادلی).....
52.....	فصل سوم) مرگ ناگهانی درهم‌تنیدگی در زنجیره‌ی اسپینی.....
53.....	1-3 مقدمه.....
53.....	2-3 بررسی درهم‌تنیدگی زنجیره‌ی اسپینی سه کیوبیتی.....
57.....	3-3 بررسی در هم‌تنیدگی در یک زنجیره اسپینی چهار کیوبیتی.....
62.....	4-3 بررسی در هم‌تنیدگی در یک زنجیره اسپینی پنج کیوبیتی.....
66.....	5-3 بررسی درهم‌تنیدگی در یک زنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی.....
68.....	6-3 بررسی درهم‌تنیدگی در یک زنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی.....
70.....	7-3 بررسی درهم‌تنیدگی در یک زنجیره اسپینی هشت کیوبیتی.....
71.....	8-3 بررسی درهم‌تنیدگی در یک زنجیره اسپینی نه کیوبیتی.....
73.....	فصل چهارم) حذف مرگ ناگهانی درهم‌تنیدگی در زنجیره‌ی اسپینی.....
74.....	1-4 حذف مرگ ناگهانی درهم‌تنیدگی.....
74.....	1-1-4 زنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی.....
78.....	2-4 شرایط حذف مرگ ناگهانی درهم‌تنیدگی.....
79.....	1-2-4 سیستم چهارکیوبیتی.....
83.....	2-2-4 سیستم پنج کیوبیتی.....

صفحه	عنوان
85	3-2-4 سیستم شش کیوبیتی.....
87	4-2-4 سیستم هفت کیوبیتی.....
89	5-2-4 سیستم هشت کیوبیتی.....
91	6-2-4 سیستم نه کیوبیتی.....
93	3-4 روش اول : افزایش میزان نوسانات درهم تنیدگی در بازه‌ی زمانی مشخص.....
93	1-3-4 سیستم چهار کیوبیتی.....
95	2-3-4 سیستم پنج کیوبیتی.....
97	3-3-4 سیستم شش کیوبیتی.....
98	4-3-4 سیستم هفت کیوبیتی.....
100	5-3-4 سیستم هشت کیوبیتی.....
102	6-3-4 سیستم نه کیوبیتی.....
104	4-4 روش دوم: افزایش میزان نوسانات درهم تنیدگی در بازه‌ی زمانی مشخص.....
104	1-4-4 سیستم چهار کیوبیتی.....
105	2-4-4 سیستم پنج کیوبیتی.....
106	3-4-4 سیستم شش کیوبیتی.....
107	4-4-4 سیستم هفت کیوبیتی.....
108	5-4-4 سیستم هشت کیوبیتی.....
109	6-4-4 سیستم نه کیوبیتی.....
111	نتیجه‌گیری.....
112	مراجع.....

## فهرست شکل‌ها

عنوان و شماره	صفحه
شکل 1-2 الکترونی که در یک مدار کلاسیک $A$ حرکت می‌کند.....	39
شکل 2-2 مولفه‌ای از تکانه زاویه‌ای که در راستای میدان است.....	40
شکل 3-2 نظم موضعی مغناطیسی.....	47
شکل 1-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ به ازای $J$ ‌های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی سه کیوبیتی برای $a = \frac{p}{6}$ .....	55
شکل 2-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ به ازای $J$ ‌های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی سه کیوبیتی برای $a = \frac{p}{8}$ .....	56
شکل 3-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ به ازای $J$ ‌های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی سه کیوبیتی برای $a = \frac{p}{12}$ .....	57
شکل 4-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ و $J$ درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای $a = \frac{p}{6}$ .....	59
شکل 5-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ و $J$ درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای $a = \frac{p}{8}$ .....	60
شکل 6-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ و $J$ درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای $a = \frac{p}{12}$ .....	60
شکل 7-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ به ازای $J$ ‌های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای $a = \frac{p}{6}$ .....	61
شکل 8-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ به ازای $J$ ‌های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای $a = \frac{p}{8}$ .....	61
شکل 9-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ به ازای $J$ ‌های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای $a = \frac{p}{12}$ .....	62
شکل 10-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ و $J$ درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی برای $a = \frac{p}{6}$ .....	63
شکل 11-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ و $J$ درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی برای $a = \frac{p}{8}$ .....	64
شکل 12-3 نمودار $C_{AB}$ بر حسب $t$ و $J$ درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی برای $a = \frac{p}{12}$ .....	64

- شکل 3-13 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 65
- شکل 3-14 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 65
- شکل 3-15 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 66
- شکل 3-16 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 67
- شکل 3-17 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 67
- شکل 3-18 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 68
- شکل 3-19 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 68
- شکل 3-20 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 69
- شکل 3-21 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 69
- شکل 3-22 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 70
- شکل 3-23 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 71

- شکل 3-24 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 71
- شکل 3-25 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 72
- شکل 3-26 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 72
- شکل 3-27 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 73
- شکل 4-1 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 75
- شکل 4-2 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 75
- شکل 4-3 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 76
- شکل 4-4 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 76
- شکل 4-5 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 77
- شکل 4-6 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی سه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 77
- شکل 4-7 نحوه‌ی قرار گرفتن  $n$  کیوبیت در یک زنجیره‌ی اسپینی ..... 78
- شکل 4-8 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 80
- شکل 4-9 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 80
- شکل 4-10 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 81

- شکل 4-11 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 81
- شکل 4-12 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 82
- شکل 4-13 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 82
- شکل 4-14 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 83
- شکل 4-15 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 84
- شکل 4-16 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 84
- شکل 4-17 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 85
- شکل 4-18 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 86
- شکل 4-19 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 86
- شکل 4-20 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 87
- شکل 4-21 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 88

- شکل 4-22 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 88
- شکل 4-23 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 89
- شکل 4-24 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 90
- شکل 4-25 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 90
- شکل 4-26 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 91
- شکل 4-27 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 92
- شکل 4-28 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 92
- شکل 4-29 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 93
- شکل 4-30 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 94
- شکل 4-31 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 94
- شکل 4-32 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 95



- شکل 4-33 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 96
- شکل 4-34 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 96
- شکل 4-35 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 97
- شکل 4-36 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 98
- شکل 4-37 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 98
- شکل 4-38 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 99
- شکل 4-39 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 99
- شکل 4-40 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 100
- شکل 4-41 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 101
- شکل 4-42 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 101
- شکل 4-43 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 102

- شکل 4-44 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 102
- شکل 4-45 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 103
- شکل 4-46 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 103
- شکل 4-47 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 104
- شکل 4-48 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 104
- شکل 4-49 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  و  $J$  درزنجیره‌ی اسپینی چهار کیوبیتی برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 105
- شکل 4-50 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 105
- شکل 4-51 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 105
- شکل 4-52 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی پنج کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 106
- شکل 4-53 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 106
- شکل 4-54 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 106
- شکل 4-55 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی شش کیوبیتی  
برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 107

- شکل 4-56 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 107
- شکل 4-57 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 107
- شکل 4-58 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هفت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 108
- شکل 4-59 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 108
- شکل 4-60 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 108
- شکل 4-61 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی هشت کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 109
- شکل 4-62 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{6}$  ..... 109
- شکل 4-63 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{8}$  ..... 109
- شکل 4-64 نمودار  $C_{AB}$  بر حسب  $t$  به ازای  $J$  های مختلف درزنجیره‌ی اسپینی نه کیوبیتی  
 برای  $a = \frac{p}{12}$  ..... 110

## پیش گفتار

جان بل<sup>1</sup> در سال 1964 تئوری خود را مربوط به حالت‌های کوانتومی درهم‌تنیده منتشر کرد. بل بیان کرد که سیستم‌های درهم‌تنیده کوانتومی به گونه‌ای متفاوت با سیستم‌های کلاسیکی، همبسته هستند [1-8]. در حقیقت می‌توان درهم‌تنیدگی را به عنوان بدیع‌ترین انحراف مکانیک کوانتومی از فیزیک کلاسیک در نظر گرفت [9-17]. در سال‌های اخیر پیشرفت زیادی در درک درهم‌تنیدگی کوانتومی صورت گرفته است به طوری که می‌توان از درهم‌تنیدگی کوانتومی برای انجام عملیات اطلاعاتی در مخابرات کوانتومی بهره‌برداری کرد. یکی از اهداف اصلی مخابرات کوانتومی بررسی دقیق درهم‌تنیدگی کوانتومی است. در سیستم‌های مختلف مکانیک کوانتومی، خاصیت مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از این سیستم‌ها، زنجیره اسپینی است [18-22]. زنجیره‌های اسپینی مجموعه‌ای یک بعدی از اسپین‌هایی هستند که بطور دائم باهم برهمکنش داشته و قدرت برهمکنش آنها نیز با فاصله کاهش می‌یابد. زنجیره‌های اسپینی به‌عنوان کاندیداهای اصلی برای انتقال اطلاعات با کیفیتی قابل قبول معرفی شده‌اند. در مکانیک کوانتومی، اسپین‌ها به‌صورت دو قطبی مغناطیسی کوانتیزه شناخته می‌شوند. برهمکنش بین اسپین‌ها با توجه به جهت‌گیری اسپین‌ها، هم‌جهت یا درخلاف جهت‌هم را می‌توان به‌عنوان برهمکنش فرومغناطیس و آنتی‌فرومغناطیس در نظر گرفت. یک مدل شناخته شده و معتبر برای برهمکنش بین اسپین‌ها، برهمکنش هایزنبرگ می‌باشد. این برهمکنش را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$H = \sum_{i=1}^N (J_x S_i^x S_{i+1}^x + J_y S_i^y S_{i+1}^y + J_z S_i^z S_{i+1}^z)$$

که در آن  $S$  عملگر اسپین،  $N$  تعداد کیوبیت‌ها و  $J$  ضریب جفت‌شدگی نزدیک‌ترین همسایه‌ها می‌باشد.  $J < 0$  حالت آنتی‌فرومغناطیس (فرومغناطیس) را توصیف می‌کند. بدلیل همسانگرد بودن، برهمکنش در تمام جهت‌های  $X$  و  $Y$  و  $Z$  یکسان خواهد بود. یک مدل مهم برای بررسی برهمکنش زنجیره‌ی اسپینی مدل  $XY$  می‌باشد، که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$H = \sum_{i=1}^N (J_x S_i^x S_{i+1}^x + J_y S_i^y S_{i+1}^y)$$

---

1- John Bell